



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

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo

**Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e Avaliação de Falhas em Geradores Síncronos por Meio da Monitoração do Campo Magnético Externo**

Florianópolis  
2024

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo

**Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e Avaliação de Faltas em Geradores Síncronos por Meio da Monitoração do Campo Magnético Externo**

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Coorientador: Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.

Florianópolis

2024

Ficha catalográfica gerada por meio de sistema automatizado gerenciado pela BU/UFSC.  
Dados inseridos pelo próprio autor.

Grillo, Luis Otavio Steffenmunsberg  
Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e  
Avaliação de Faltas em Geradores Síncronos por Meio da  
Monitoração do Campo Magnético Externo / Luis Otavio  
Steffenmunsberg Grillo ; orientador, Nelson Jhoe  
Batistela, coorientador, Patrick Kuo Peng, 2024.  
177 p.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa  
Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Elétrica. 2. Gerador síncrono. 3. Campo  
magnético externo. 4. Detecção de faltas. 5. Monitoração da  
condição. I. Batistela, Nelson Jhoe. II. Kuo Peng, Patrick.  
III. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa de  
Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo

**Desenvolvimento de Procedimentos para Detecção e Avaliação de Faltas em Geradores Síncronos por Meio da Monitoração do Campo Magnético Externo**

O presente trabalho em nível de Doutorado foi avaliado e aprovado, em 24 de maio de 2024, pela banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Leandro dos Santos Coelho, Dr.  
Universidade Federal do Paraná

Prof. Aguinaldo Silveira e Silva, Dr.  
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Juliano Bitencourt Padilha, Dr.  
Instituto Federal de Santa Catarina

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

---

Prof. Telles Brunelli Lazzarin, Dr.  
Coordenação do Programa de Pós-Graduação

---

Prof. Nelson Jhoe Batistela, Dr.  
Orientador

---

Prof. Patrick Kuo Peng, Dr.  
Coorientador

Florianópolis, 2024.

Este trabalho é dedicado aos meus queridos pais,  
Marlene e Joaquim Adão.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a minha família pelo apoio durante esta minha jornada, em especial aos meus pais, Marlene e Joaquim Adão, pelo esforço e apoio realizados em prol de minha educação.

Aos meus colegas do GRUCAD, LABSPOT, LABPLAN e demais laboratórios pela troca de conhecimentos e momentos de descontração.

A todos os professores da UFSC que contribuíram para a minha formação, em especial ao meu orientador, professor Nelson Jhoe Batistela, e ao meu coorientador, professor Patrick Kuo-Peng, não só pela orientação dessa tese, mas também pelo apoio, dedicação e paciência ao longo deste período. Agradeço também aos membros da banca avaliadora, professores Aguinaldo Silveira e Silva, Juliano Bitencourt Padilha e Leandro dos Santos Coelho, pelas valiosas contribuições oferecidas.

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo suporte financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa. À Engie Brasil Energia e à Itá Energética S.A. pelo custeio parcial desta pesquisa por meio dos projetos PD-00403-0048/2019, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo”, e do projeto PD 0403-0057/2023, intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo – Lote Pioneiro e Inserção no Mercado”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A no âmbito do programa de P&D ANEEL.

Finalmente agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

*"Flexibility is a requirement for survival."*

(Roger Von Oech)

## RESUMO

A monitoração da condição de geradores síncronos por meio da inspeção do seu campo magnético externo é uma estratégia com potencial de aplicação na manutenção preditiva destas máquinas pela sua característica não invasiva e pela capacidade de detecção de diferentes tipos de faltas. Esta estratégia se baseia na monitoração de componentes do espectro de frequências, obtido pela transformada de Fourier, de formas de onda relativas à derivada temporal do campo magnético externo. As amplitudes de algumas destas componentes espectrais refletem características construtivas e operacionais do gerador síncrono e os conjuntos formados por estas componentes espectrais são denominados de assinatura magnética. A monitoração do histórico destas amplitudes do conteúdo espectral ao longo do tempo possibilita a detecção de faltas incipientes. Uma limitação desta estratégia é a necessidade de avaliação do histórico de amplitudes de centenas ou milhares de componentes espectrais para cada sensor de campo magnético utilizado no sistema de monitoração. Neste contexto, é apresentada nesta tese uma metodologia para detecção de faltas em geradores síncronos por meio da detecção automática de alterações em sua assinatura magnética obtida por meio de medidas de campo magnético externo. Ao contrário de outras pesquisas publicadas onde a detecção de faltas é realizada por inspeção visual, esta tese propõe a aplicação de métodos de gráficos de controle para promover a detecção automática de alterações da assinatura magnética do gerador síncrono. Além disso, a metodologia permite gerar um indicador global de alteração para identificar períodos em que ocorre a detecção de alteração de amplitude de várias componentes espectrais simultaneamente de maneira correlacionada, o que é uma característica constatada na ocorrência de faltas incipientes. A investigação e caracterização da influência de alterações do ponto de operação do gerador síncrono sobre a sua assinatura magnética é outra contribuição desta tese, bem como o conceito de monitoramento do comportamento da assinatura magnética continuada. Esta investigação permitiu o desenvolvimento de uma estratégia de estratificação da assinatura magnética em regiões de operação com pequenas perturbações, que foi incluída na metodologia de detecção de faltas. Com esta etapa de estratificação, a metodologia desenvolvida minimiza a ocorrência de falsos positivos no processo de detecção de faltas, causados por alterações naturais de operação do gerador síncrono. A metodologia é avaliada por meio da análise de dados sintéticos, obtidos por simulação computacional, de dados experimentais, obtidos de ensaios em um gerador síncrono de 10 kVA em uma bancada experimental que permite a imposição controlada de faltas, e de dados obtidos por um equipamento de monitoração do campo magnético externo instalado em um gerador síncrono de 305 MVA em uma usina hidrelétrica. Os resultados obtidos mostram que a metodologia permitiu a detecção automática de diferentes tipos de faltas nos casos avaliados, validando a sua aplicação prática para a monitoração da condição de geradores síncronos.

**Palavras-chave:** Gerador síncrono; Campo magnético externo; Detecção de faltas; Monitoração da condição.

## ABSTRACT

Monitoring the condition of synchronous generators through inspection of their external magnetic field is a strategy with potential application in the predictive maintenance of these machines due to its non-invasive characteristic and its ability to detect different types of faults. This strategy is based on monitoring components of the frequency spectrum, obtained by the Fourier transform, of waveforms related to the time derivative of the external magnetic field. The amplitude of some of these spectral components reflects constructive and operational characteristics of the synchronous generator and the sets formed by these spectral components are called the magnetic signature. Monitoring the history of these spectral content amplitudes over time makes it possible to detect incipient faults. One problem with this strategy is the need to evaluate the amplitude history of hundreds or thousands of spectral components for each magnetic field sensor used in the monitoring system. In this context, this thesis presents a methodology for detecting faults in synchronous generators through the automatic detection of changes in their magnetic signature obtained through external magnetic field measurements. Unlike other works where fault detection is performed by visual inspection, this thesis proposes the application of control chart methods to promote the automatic detection of changes in the magnetic signature of the synchronous generator. Furthermore, the methodology makes it possible to generate a global change indicator to identify periods in which changes in the amplitude of several spectral components are detected simultaneously in a correlated manner, which is a characteristic observed in the occurrence of incipient faults. The investigation and characterization of the influence of changes in the synchronous generator operating point on its magnetic signature is another contribution of this thesis, as well as the concept of monitoring the behavior of the continuous magnetic signature. This investigation allowed the development of a strategy for stratifying the magnetic signature in operating regions with small disturbances, which was included in the fault detection methodology. With this stratification stage, the methodology developed minimizes the occurrence of false positives in the fault detection process, caused by natural changes in the synchronous generator operation. The methodology is evaluated by analyzing synthetic data obtained by computer simulation, experimental data obtained by testing a 10 kVA synchronous generator on an experimental bench that allows the controlled imposition of faults, and data obtained by external magnetic field monitoring equipment installed on a 305 MVA synchronous generator at a hydroelectric power plant. The results obtained show that the methodology enabled the automatic detection of different types of faults in the cases evaluated, validating its practical application for monitoring the condition of synchronous generators.

**Keywords:** Synchronous generator; External magnetic field; Fault detection; Condition monitoring.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Curva de capacidade genérica para um gerador síncrono.....	26
Figura 2. Curva de magnetização de um gerador síncrono. ....	27
Figura 3. Distribuição do fluxo magnético disperso em máquinas elétricas rotativas. .....	31
Figura 4. Arquitetura geral do sistema de aquisição de sinais do campo magnético externo. ....	38
Figura 5. Sinal $dH(t)/dt$ simulado com amplitudes conhecidas e seu espectro de frequências.....	40
Figura 6. Simulação da aquisição de 6 vetores de dados e análise em frequências destes sinais.....	40
Figura 7. Formação do histórico de amplitudes de uma componente de frequência.	41
Figura 8. Aquisição de um sensor de campo por indução no GS de 56 polos. ....	42
Figura 9. Espectro de frequências do sinal apresentado na Figura 8. ....	42
Figura 10. Rastreamento da componente harmônica de ordem $n$ . ....	44
Figura 11. Bancada experimental para imposição controlada de faltas em geradores síncronos.....	48
Figura 12. Equipamento para medição e processamento do campo magnético externo. ....	49
Figura 13. Equipamento para monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos instalado em um GS de eixo vertical em uma usina hidrelétrica. .....	51
Figura 14. Fluxograma do processo de inferência estatística. ....	53
Figura 15. Distribuição normal e interpretação de seu desvio padrão.....	55
Figura 16. Distribuição de uma série temporal composta por 100 amostras de amplitude de uma componente espectral do campo magnético externo.....	56
Figura 17. Distribuição de uma série temporal composta por 37000 amostras de amplitude de uma componente espectral do campo magnético externo.....	56
Figura 18. Exemplo de gráfico de controle com $k = 3$ para uma variável monitorada. .....	59
Figura 19. Exemplo de gráfico de controle com violação do $LSC$ . ....	60
Figura 20. Variável com pequena alteração ( $1,5\sigma$ ) do valor médio em um gráfico de controle $3\sigma$ . ....	62

Figura 21. Gráfico da soma cumulativa.....	63
Figura 22. Gráfico de controle CUSUM tabular.....	65
Figura 23. Gráfico de controle MMEP.....	67
Figura 24. Comportamento da variância de uma variável em diferentes regiões.....	69
Figura 25. Gráfico de controle para a variância móvel.....	70
Figura 26. Intervalo entre o 1° e o 9° decil de um conjunto ordenado de dados.....	71
Figura 27. Coeficiente de correlação de Pearson entre diferentes séries temporais.....	74
Figura 28. Grandezas elétricas medidas no GS de 305 MVA em operação sincronizada em uma usina hidrelétrica.....	79
Figura 29. Grandezas elétricas medidas no GS de 10 kVA em operação sincronizada durante um ensaio experimental.....	81
Figura 30. Matriz de correlação linear entre as grandezas elétricas $S$ , $P$ , $Q$ , $V_t$ e $I_t$ para (a) o GS de 305 MVA e para (b) o GS de 10 kVA.....	82
Figura 31. Comparação entre o despacho de potência ativa e potência aparente e o histórico de amplitudes da $f_e$ para o (a) GS de 305 MVA e para o (b) GS de 10 kVA.....	84
Figura 32. Comparação entre a geração de potência reativa e o histórico de amplitudes da $f_m$ para o (a) GS de 305 MVA e para o (b) GS de 10 kVA.....	85
Figura 33. Histórico de amplitudes da $f_m$ e da $f_e$ obtidos por meio de 6 sensores posicionados em locais distintos ao redor do GS de 305 MVA.....	86
Figura 34. Comportamento do histórico de amplitudes de algumas componentes harmônicas da $f_m$ para o GS de 305 MVA.....	87
Figura 35. Coeficiente de correlação de Pearson entre o histórico de amplitudes de 467 harmônicas da $f_m$ , com relação à $P$ e à $Q$ para o GS de 305 MVA.....	88
Figura 36. Coeficiente de correlação de Pearson entre o histórico de amplitudes de 225 harmônicas da $f_m$ , com relação a $P$ e a $Q$ , para o GS de 10 kVA.....	89
Figura 37. Medições de $P$ e $Q$ no GS de 305 MVA junto com histogramas para identificação de regiões de operação.....	92
Figura 38. Processo de estratificação da assinatura magnética continuada.....	94
Figura 39. Comparação entre as séries temporais com medições de $P$ e $Q$ antes e depois da primeira etapa de estratificação com base em uma faixa limitada de $P$ . ..	96
Figura 40. Histograma para definição de regiões de operação com base em faixas limitadas de $Q$ a partir da série de medições $Q_1$ .....	97

Figura 41. Comparação entre as séries com medições de $P$ e $Q$ antes e depois da primeira etapa de estratificação com base em uma faixa limitada de $P$ e as séries finais obtidas após a segunda etapa de estratificação com base em uma faixa de $Q$ . .....	98
Figura 42. Comparação entre as séries com o histórico de amplitude de $f_m$ e $f_e$ durante os dois processos de estratificação do conjunto de medições.....	99
Figura 43. Fluxograma para aplicação do método de gráficos de controle Shewhart. .....	104
Figura 44. Aplicação do método proposto para identificar ponto de alteração.....	105
Figura 45. Aplicação de gráficos de controle para monitoração contínua.....	106
Figura 46. Método de detecção de alterações permanentes do valor médio.....	107
Figura 47. Matriz de alterações $MAN \times T$ e indicadores parciais de alteração $IPAt$ . .....	108
Figura 48. <i>Dataset</i> com algumas séries contendo o histórico de amplitudes da $f_m$ diante da ocorrência de uma falta incipiente em um GS.....	111
Figura 49. Exemplo de aplicação do método de detecção de alterações em um <i>dataset</i> de exemplo para ilustração dos indicadores de alteração.....	112
Figura 50. Correlograma mostrando a matriz de correlação entre as séries detectadas com alteração no exemplo proposto.....	113
Figura 51. Fluxograma da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs.....	114
Figura 52. Avaliação do histórico de amplitudes da 12 <sup>a</sup> componente harmônica da $f_m$ para uma falta simulada no rotor.....	120
Figura 53. Número de verdadeiros positivos detectados em cada conjunto de dados. .....	121
Figura 54. Avaliação do histórico de amplitudes da 27 <sup>a</sup> harmônica da $f_m$ em uma falta de retirada de espiras de um polo do estator.....	123
Figura 55. Relação de verdadeiros positivos e falsos positivos em dados experimentais.....	124
Figura 56. Alteração do histórico de amplitudes diante da imposição e retirada de uma falta.....	125
Figura 57. Séries detectadas com alteração em ensaio com falta de curto-circuito no núcleo do estator.....	127

Figura 58. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da $f_m$ detectadas no espectro de frequências: falta de curto-circuito no núcleo do estator.....	128
Figura 59. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da $f_m$ detectadas no espectro de frequências: falta de curto-circuito de espiras de um polo do estator. ....	128
Figura 60. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da $f_m$ detectadas com alteração no espectro de frequências: falta de retirada de espiras de um polo do estator. ....	129
Figura 61. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da $f_m$ detectadas no espectro de frequências: falta de retirada de espiras de um polo do rotor. ....	130
Figura 62. Curvas de despacho de potência nos quatro ensaios avaliados.....	133
Figura 63. Percentual de variação ( $PV$ ) para séries detectadas com alteração de amplitude pelo sensor 1 no ensaio 1.....	134
Figura 64. Percentual de séries sensibilizadas e detectadas em cada sensor nos ensaios avaliados.....	137
Figura 65. Percentual de séries sensibilizadas com aumento ou diminuição de amplitude com relação ao número total de séries detectadas com alteração. ....	138
Figura 66. Número de ocorrências de séries detectadas no espectro de frequência. ....	139
Figura 67. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da $f_m$ sensibilizadas pela imposição e pela retirada de uma falta de curto-circuito de espiras de um polo do estator; (b) Evolução do indicador parcial de alterações $IPAt$ . ....	143
Figura 68. (a) Matriz de correlação do conjunto de séries detectadas com alteração no instante de imposição da falta, representada por um gráfico de calor; (b) Matriz de correlação do conjunto reduzido de séries temporais com maiores coeficientes de correlação, representada por um gráfico de calor. ....	144
Figura 69. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de curto-circuito de espiras de uma fase do estator para o sensor 1. ....	145
Figura 70. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de curto-circuito de espiras de uma fase do estator para os sensores 2 e 3. ....	146
Figura 71. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da $f_m$ sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de retirada de espiras de um polo do estator; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica. ....	147

Figura 72. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de retirada de espiras de um polo do estator para os sensores 2 e 3.....	147
Figura 73. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da <i>fm</i> sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica. ....	148
Figura 74. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator para os sensores 2 e 3.....	149
Figura 75. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da <i>fm</i> sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica.....	150
Figura 76. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de retirada de espiras de um polo do rotor para os sensores 2 e 3. ....	151
Figura 77. Série com o histórico de amplitudes da 141° componente harmônica da <i>fm</i> durante a evolução de uma falta de vibração mecânica no GS de 305 MVA....	153
Figura 78. Critérios da norma ISO 7919-5 para vibração do eixo do gerador síncrono, com a indicação dos valores de vibração medidos no GS com a falta e medidos após as ações de reparo pela equipe de manutenção da usina. ....	154
Figura 79. (a) Série com medidas de <i>P</i> no período inicial de avaliação com histograma para identificação das regiões de operação; (b) Série com as medidas de <i>Q</i> resultante da primeira etapa do processo de estratificação com o histograma para identificação das regiões de operação.....	156
Figura 80. Potência ativa e potência reativa do <i>dataset</i> original e do <i>dataset</i> resultante do processo de estratificação. ....	156
Figura 81. Série com o histórico de amplitudes da 141° componente harmônica da <i>fm</i> após as duas etapas do processo de estratificação.....	157
Figura 82. Resposta da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética para o <i>dataset</i> obtido no GS de 305 MVA durante a ocorrência de uma falta incipiente de vibração mecânica. ....	158
Figura 83. Resposta da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética para os <i>datasets</i> obtidos em 6 sensores na monitoração do campo magnético externo durante a ocorrência de uma falta de vibração mecânica. ....	159
Figura 84. Evolução da série com o histórico de amplitudes da 141° componente harmônica da <i>fm</i> .....	160

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1. Características dos padrões de alteração da assinatura magnética obtidas por meio do campo magnético externo e decorrentes de varrições de carregamento do GS ensaiado.....	140
---	-----

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Configuração das técnicas de detecção de anomalias para dados sintéticos. ....	119
Tabela 2. Comparação de desempenho entre as técnicas de detecção de anomalias. ....	120
Tabela 3. Configuração dos métodos de detecção de alterações para dados experimentais. ....	123
Tabela 4. Comparação de desempenho entre as técnicas de detecção de anomalias em dados experimentais. ....	124
Tabela 5. Ensaio experimentais com imposição controlada de faltas. ....	126
Tabela 6. Comparação entre as faltas avaliadas. ....	131
Tabela 7. Ensaio experimentais com variações do ponto de operação do GS de 10 kVA. ....	132
Tabela 8. Percentual de variação de raias sensibilizadas pela alteração do carregamento. ....	135
Tabela 9. Percentual de variação de séries sensibilizadas por diferentes tipos de faltas. ....	136

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D	Analógico/Digital
AMC	Assinatura magnética continuada
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CUSUM	Soma cumulativa ( <i>Cumulative Sum</i> )
FFT	<i>Fast Fourier Transform</i>
FP	Falso positivo
GRUCAD	Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos
GS	Gerador síncrono
INPI	Instituto Nacional da Propriedade Industrial
IQR	<i>Interquartile range</i>
MMEP	Média móvel exponencialmente ponderada
MS	Máquina síncrona
P&D	Pesquisa e Desenvolvimento
S.A.	Sociedade anônima
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
VM	Variância móvel
rpm	Rotações por minuto

## LISTA DE SÍMBOLOS

$V_f$	Tensão de campo do gerador síncrono
$p$	Número de pares de polos
$n_m$	Velocidade mecânica
$V_t$	Tensão terminal
$P$	Potência ativa
$Q$	Potência reativa
$B$	Indução magnética
$H$	Campo magnético
$f_e$	Frequência fundamental elétrica
$\mathcal{P}$	Permeância magnética
$f_h$	Frequência de uma componente harmônica
$f_m$	Frequência fundamental mecânica
$v$	Força eletromotriz
$\Phi$	Fluxo magnético
$\mu_0$	Permeabilidade magnética do ar
$H_{tan}$	Componente tangencial do campo magnético disperso
$H_{nor}$	Componente normal do campo magnético disperso
$f_s$	Frequência de amostragem
$T$	Período
$df$	Resolução espectral
$N_s$	Número de amostras
$f_{m_{real}}$	Frequência fundamental mecânica real
$f_{m_{nominal}}$	Frequência fundamental mecânica nominal
$LIB$	Limite inferior de busca
$LSB$	Limite superior de busca
$RB$	Região de busca
$\mathcal{F}_{mm}$	Força magnetomotriz
$E_a$	Tensão interna induzida
$\mu$	Média aritmética
$\sigma$	Desvio padrão
$LMC$	Linha média central

$LIC$	Limite inferior de controle
$LSC$	Limite superior de controle
$C$	Indicador de soma cumulativa
$C^+$	CUSUM unilateral superior
$C^-$	CUSUM unilateral inferior
$\delta$	Grau de alteração
$z$	Média móvel exponencialmente ponderada
$\lambda$	Constante de ponderação
$L$	Distância do intervalo de confiança da estatística MMEP
$w$	Tamanho de uma janela móvel
$\sigma_M^2$	Variância móvel
$v$	Largura do limite de controle para o método da variância móvel
$D$	Decil
$Q$	Quartil
$\rho$	Coefficiente de correlação de Pearson
$S$	Potência aparente
$v_a, v_b, v_c$	Tensões nas fases a, b e c, respectivamente
$i_a, i_b$ e $i_c$	Correntes nas fases a, b e c, respectivamente
$V_t$	Tensão terminal
$I_t$	Corrente terminal
$R$	<i>Range</i>
$n_r$	Número de amostras da região de referência
$I_{PA}$	Indicador parcial de alteração
$I_{GA}$	Indicador Global de alteração
$MA$	Matriz de alterações
$M_\rho$	Matriz de correlação
$\overline{M_\rho}$	Métrica que indica a média da matriz de correlação
$f_r$	Frequência de ranhura
$N_r$	Número de ranhuras dos estator do gerador síncrono
$S_{nominal}$	Potência aparente nominal
$PV$	Percentual de variação

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>16</b>
1.1	OBJETIVO GERAL .....	20
1.2	OBJETIVOS METODOLÓGICOS .....	20
1.3	CONTRIBUIÇÕES .....	21
1.4	ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO .....	22
<b>2</b>	<b>GERADOR SÍNCRONO E MONITORAÇÃO DA CONDIÇÃO</b> .....	<b>24</b>
2.1	GERADOR SÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE .....	24
2.1.1	<b>Estrutura física e princípio de funcionamento do GS</b> .....	<b>24</b>
2.1.2	<b>Características de operação do GS em regime permanente</b> .....	<b>25</b>
2.1.3	<b>Campo magnético do GS em regime permanente</b> .....	<b>28</b>
2.2	MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO PARA DETECÇÃO DE FALTAS .....	29
2.2.1	<b>Monitoração do campo magnético externo</b> .....	<b>30</b>
2.3	CONTEXTO ATUAL DE MONITORAÇÃO DA CONDIÇÃO DE GS .....	34
2.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	36
<b>3</b>	<b>MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO E OBTENÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA DO GS</b> .....	<b>37</b>
3.1	ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO.....	37
3.2	GERAÇÃO DO HISTÓRICO DE AMPLITUDES DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO .....	39
3.2.1	<b>Espectro de frequências de um sinal simulado</b> .....	<b>39</b>
3.2.2	<b>Espectro de frequências do campo magnético externo para um GS</b> ...	<b>41</b>
3.2.3	<b>Rastreamento de raias</b> .....	<b>43</b>
3.3	FONTE DOS <i>DATASETS</i> AVALIADOS .....	45
3.3.1	<b>Dados sintéticos</b> .....	<b>45</b>
3.3.2	<b>Dados experimentais com imposição controlada de faltas em um GS</b>	<b>47</b>
3.3.3	<b>Dados de equipamento instalado em uma usina hidrelétrica</b> .....	<b>50</b>
3.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	51
<b>4</b>	<b>FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIA EM SÉRIES TEMPORAIS</b> .....	<b>52</b>
4.1	TEORIA BASE PARA APLICAÇÃO .....	52

4.1.1	<b>Inferência Estatística .....</b>	<b>52</b>
4.1.2	<b>Estacionariedade de séries temporais .....</b>	<b>54</b>
4.2	<b>MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS .....</b>	<b>56</b>
4.2.1	<b>Aplicação da técnica de gráficos de controle .....</b>	<b>57</b>
4.2.2	<b>Gráfico de controle Shewhart .....</b>	<b>58</b>
4.2.3	<b>Gráfico de controle CUSUM .....</b>	<b>61</b>
4.2.4	<b>Gráfico de controle MMEP .....</b>	<b>65</b>
4.2.5	<b>Gráfico de controle baseado na variância móvel.....</b>	<b>68</b>
4.2.6	<b>Precisão dos elementos do gráfico de controle.....</b>	<b>71</b>
4.3	<b>CORRELAÇÃO ENTRE SÉRIES TEMPORAIS.....</b>	<b>72</b>
4.4	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....</b>	<b>74</b>
<b>5</b>	<b>INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DO GS NO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO .....</b>	<b>76</b>
5.1	<b>VARIAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DO GS .....</b>	<b>76</b>
5.2	<b>RELAÇÕES ENTRE GRANDEZAS ELÉTRICAS DO GS.....</b>	<b>78</b>
5.3	<b>CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ELÉTRICAS E O CAMPO MAGNÉTICO.....</b>	<b>83</b>
5.3.1	<b>Comparação entre a potência ativa e o histórico de amplitudes da <math>f_e</math>.....</b>	<b>83</b>
5.3.2	<b>Comparação entre a potência reativa e o histórico de amplitudes da <math>f_m</math> .....</b>	<b>84</b>
5.3.3	<b>Padrões de correlação entre as séries temporais monitoradas .....</b>	<b>86</b>
5.4	<b>ESTRATIFICAÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA COM RELAÇÃO AO PONTO DE OPERAÇÃO .....</b>	<b>90</b>
5.4.1	<b>Identificação das regiões de operação .....</b>	<b>91</b>
5.4.2	<b>Processo de estratificação da assinatura magnética continuada .....</b>	<b>93</b>
5.4.3	<b>Aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética continuada no GS de 305 MVA.....</b>	<b>95</b>
5.5	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....</b>	<b>99</b>
<b>6</b>	<b>METODOLOGIA PARA MONITORAÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA .....</b>	<b>100</b>
6.1	<b>PREMISSAS BÁSICAS PARA PROPOSIÇÃO DA METODOLOGIA .....</b>	<b>100</b>
6.1.1	<b>Contextualização do problema .....</b>	<b>100</b>
6.1.2	<b>Detecção de alterações no valor médio das amplitude.....</b>	<b>101</b>
6.1.3	<b>Indicador global de alterações.....</b>	<b>102</b>

6.2	MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES NO VALOR MÉDIO....	103
6.3	METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO PERIÓDICA DA ASSINATURA MAGNÉTICA.....	113
6.4	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	115
<b>7</b>	<b>RESULTADOS .....</b>	<b>117</b>
7.1	COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS..	117
7.1.1	<b>Resultados obtidos com dados sintéticos .....</b>	<b>118</b>
7.1.2	<b>Resultados obtidos com dados de ensaios experimentais.....</b>	<b>122</b>
7.2	DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS .....	125
7.2.1	<b>Avaliação da falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator .....</b>	<b>126</b>
7.2.2	<b>Avaliação da falta de curto-circuito entre espiras do estator .....</b>	<b>128</b>
7.2.3	<b>Avaliação da falta de retirada de espiras de um polo do estator.....</b>	<b>129</b>
7.2.4	<b>Avaliação da falta de retirada de espiras de um polo do rotor .....</b>	<b>129</b>
7.2.5	<b>Comparação dos resultados obtidos para os diferentes tipos de faltas .</b>	<b>130</b>
7.2.6	<b>Desempenho do método de detecção de alterações.....</b>	<b>131</b>
7.3	AVALIAÇÃO DE ENSAIOS COM VARIAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO..	131
7.3.1	<b>Ensaio de variação do ponto de operação com o GS sincronizado.</b>	<b>132</b>
7.3.2	<b>Alterações espectrais causadas por variações de operação do GS ..</b>	<b>134</b>
7.3.3	<b>Comparação entre alterações da assinatura magnética causadas pela imposição de faltas e pela variação do ponto de operação .....</b>	<b>135</b>
7.3.4	<b>Avaliação complementar das alterações da assinatura magnética devido às variações do ponto de operação .....</b>	<b>136</b>
7.4	APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO PERIÓDICA DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA DO GS .....	141
7.4.1	<b>Datasets obtidos em ensaios experimentais em laboratório.....</b>	<b>141</b>
7.4.2	<b>Dataset obtido em um GS de uma usina hidrelétrica .....</b>	<b>151</b>
7.5	CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO .....	160
<b>8</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>162</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>167</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A utilização de geradores síncronos é amplamente difundida em diferentes sistemas de geração de energia elétrica (Kundur, 1994). Este tipo de máquina é predominantemente usado em usinas hidrelétricas, em termelétricas e em várias plantas de energia eólica, sendo responsável por grande parte da geração de energia elétrica a nível mundial. A segurança e confiabilidade dos grandes sistemas interligados de energia elétrica dependem diretamente da disponibilidade destas máquinas. Paradas não programadas de plantas de geração tendem a causar problemas de estabilidade em diferentes níveis nestes sistemas interligados, podendo ocasionar interrupção no fornecimento de energia para os consumidores e, neste caso, causar prejuízos socioeconômicos e possíveis multas para as empresas geradoras.

A manutenção de unidades geradoras, além de indesejada do ponto de vista da operação e disponibilidade da máquina, apresenta como limitação o alto valor financeiro associado à correção de defeitos, tais como o recondicionamento ou a substituição de componentes. Este valor tende a ser proporcional à potência do gerador, sendo então de maior monta em geradores de grande potência, como os utilizados em usinas hidrelétricas e termelétricas.

Neste contexto, a manutenção da disponibilidade deste tipo de máquina é importante para o setor de geração de energia elétrica. Esta manutenção é dividida em diferentes níveis de maneira a aumentar a confiabilidade da planta de geração e a reduzir esforços de manutenção e gastos financeiros associados a estas atividades. Para otimizar estas práticas, existe a tendência de aplicar técnicas modernas de manutenção de modo a gerar um conjunto de estratégias complementares que aumente a confiabilidade deste processo. Os níveis de manutenção comumente adotados são o corretivo, o preventivo e o preditivo (Bevilacqua; Braglia, 2000; Mobley, 2002).

A manutenção corretiva consiste em procedimentos de correção de falhas, podendo ser planejada ou não planejada. Neste caso, a máquina fica indisponível para operação e é o pior cenário no processo de manutenção, quando comparado aos outros níveis de manutenção preventiva e preditiva. A programação das paradas para manutenção corretiva é uma forma de minimizar o ônus deste tipo de operação (Mobley, 2002).

A manutenção preventiva consiste em estabelecer um conjunto de ações para evitar falhas e, desta maneira, reduzir o número de intervenções corretivas na máquina ou evitar faltas catastróficas. Normalmente este nível de manutenção é executado por meio do planejamento de paradas programadas para acompanhamento e substituição de componentes do sistema. Este tipo de manutenção apresenta como desvantagens a geração de custos adicionais devido a paradas desnecessárias, que podem ser evitadas com o acompanhamento da condição dos diferentes componentes do sistema de geração (Mobley, 2002).

Com o objetivo de potencializar a eficiência do programa de manutenção de plantas de geração, a manutenção preditiva propõe o acompanhamento de variáveis ou de parâmetros de diferentes componentes do sistema de geração, de modo a avaliar o desempenho e a condição destes componentes ao longo do tempo. O acompanhamento e a análise de variáveis físicas do sistema podem permitir a detecção de faltas incipientes, que são faltas em um estágio inicial com potencial para evoluir para uma falha na máquina. Esta estratégia permite programar de maneira eficiente as ações de manutenção, evitando paradas desnecessárias ou até mesmo evitando faltas que possam evoluir para um estado crítico dentro dos períodos de paradas programadas pela manutenção preventiva (Bevilacqua; Braglia, 2000; Fogliato; Ribeiro, 2011; Mobley, 2002). Com a constante evolução dos sistemas de sensoriamento de diferentes variáveis do sistema de geração e o crescente desenvolvimento e a otimização de técnicas de monitoração da condição dos ativos deste sistema, a manutenção preditiva vem sendo amplamente requerida nas plantas de geração de energia como forma de aumentar a disponibilidade e a confiabilidade destes sistemas. A tendência de utilização de tecnologias modernas, tanto para o sensoriamento dos ativos de geração quanto para a análise de dados e integração com os sistemas de manutenção e operação das usinas, coloca a manutenção preditiva com um dos pilares da Indústria 4.0 (Zonta *et al.*, 2020).

Para a monitoração preditiva de geradores síncronos (GSs) existem diversas técnicas para avaliar diferentes variáveis elétricas, magnéticas, mecânicas e ambientais destas máquinas. Cada uma delas permite a monitoração de determinadas características, de modo que a monitoração conjunta destas variáveis aumenta ainda mais a capacidade de detecção de faltas incipientes em diferentes componentes da planta de geração, aumentando a confiabilidade da gestão de

manutenção deste sistema e, por consequência, a confiabilidade e a disponibilidade da planta de geração (IEEE STD 1129-1992, 1992).

O acompanhamento das variáveis de interesse para a monitoração da máquina, em geral, é realizado de forma contínua ao longo da operação e compõe os chamados sistemas de monitoração da condição da máquina (Han; Song, 2003). Estes sistemas monitoram a máquina, de maneira *online* ou *offline*, e são aptos a emitir alertas de perturbações que podem estar associadas com faltas incipientes ou estabelecidas. Assim, estes sistemas se impõem como uma importante abordagem para a operação de ativos de geração de energia, possibilitando o acompanhamento contínuo da condição da máquina monitorada e a detecção de faltas incipientes.

Com relação às técnicas de monitoração das características magnéticas dos GSs, a monitoração do campo magnético interno, medido no entreferro da máquina, já é difundida no meio industrial, existindo métodos consolidados para a análise desta grandeza e equipamentos a nível comercial para executar esta função (Sasic; Campbell; Lloyd, 2011; Zamudio-Ramirez *et al.*, 2022). A monitoração do campo magnético externo irradiado, por outro lado, é uma técnica pouco investigada na literatura em máquinas síncronas, mas com potencial para agregar informações e indicadores de análise para detecção de faltas e monitoração da condição de GSs. Esta técnica pode ser baseada na monitoração da assinatura magnética da máquina, que é a característica esperada do espectro de frequências obtido a partir da transformada de Fourier de medidas do campo magnético com a máquina operando na condição de regime permanente em uma determinada condição de operação, ou seja, do campo estabelecido após a máquina atingir o equilíbrio eletromagnético. Em aplicações no ambiente industrial, como o ponto de operação dos GSs é variável e não se tem uma condição de regime estacionária, pequenas variações nesta característica são observadas e consideradas naturais. Contudo, alterações na estrutura física do GS, como a incidência de uma falta incipiente, podem alterar consideravelmente sua assinatura magnética e podem ser detectadas e classificadas. Esta técnica apresenta como vantagem o fato de permitir a monitoração não invasiva do GS, sem a necessidade de parada e de desmontagem de partes ativas da máquina para instalação ou manutenção destes sistemas de monitoramento.

Neste contexto, esta tese aborda a monitoração de GSs por meio do campo magnético externo da máquina explorando as diversas possibilidades de padrões de

faltas que podem ser observados pela análise desta grandeza. Esta iniciativa é investigada por meio da aplicação de técnicas analíticas de detecção de anomalias na assinatura magnética da máquina, com o objetivo de detectar padrões de alterações que estejam associados com a evolução de uma falta incipiente e que permitam gerar um indicativo de falta no GS. A influência das variações do ponto de operação da máquina sobre a sua assinatura magnética é investigada e são propostos procedimentos para monitorar a condição do GS em condições de operação com pequenas perturbações das grandezas elétricas onde a assinatura magnética apresenta um comportamento estacionário. A junção deste procedimento com o uso de técnica para detecção de anomalias é realizada para desenvolver uma metodologia de monitoração da condição de GS robusta que permite a detecção de faltas por meio da monitoração da assinatura magnética da máquina e que minimiza a ocorrência de falsos alarmes decorrentes das variações de operação do GS. A automatização desses processos de análise em uma metodologia computacional é apresentada como uma maneira de otimizar o tempo e a qualidade da avaliação destes sinais. Como efeito deste processo, tem-se a possibilidade de aplicação prática destes métodos em sistemas de monitoração da condição de GSs e a identificação de padrões de falta que contribuem para a consolidação desta estratégia de manutenção preditiva.

As variáveis monitoradas e analisadas nesta tese são as formas de onda provenientes da derivada temporal do campo magnético externo, seguindo a metodologia experimental de Rigoni *et al.* (2020), Rigoni (2014) e Santos (2021). Como o conteúdo harmônico (as raiais espectrais) da forma de onda derivada é o mesmo que o do campo magnético devido às características do sensor e seu tratamento pelo *hardware* empregado, nesta tese refere-se nominalmente esta grandeza, isto é, o campo magnético externo. A derivada temporal tem a propriedade de aumentar as amplitudes das harmônicas, proporcionalmente às suas ordens, fato usufruído para aumentar a sensibilidade da coleta das características contidas no campo magnético externo da máquina.

O trabalho de pesquisa apresentado nesta tese foi motivado e parcialmente custeado no âmbito do programa de P&D ANEEL e desenvolvido 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” e no projeto PD 0403-0057/2023,

intitulado “Equipamento não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo – Lote Pioneiro e Inserção no Mercado”, realizado em parceria com a empresa AQTech Engenharia e Instrumentação S.A. O CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) também custeou parcialmente esta pesquisa.

Esta tese é uma continuidade da linha de pesquisas sobre o assunto no Grupo de Concepção e Análise de Dispositivos Eletromagnéticos (GRUCAD) do Departamento de Engenharia Elétrica e Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). A metodologia desenvolvida é inovadora para esta aplicação e serve como ferramenta de avaliação dos históricos de amplitude de características do campo magnético externo obtidos pelas metodologias experimentais propostas por Rigoni *et al.* (2020), Rigoni (2014) e Santos (2021).

## 1.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta tese é apresentar o desenvolvimento e a validação de uma metodologia para monitoração periódica da assinatura magnética de geradores síncronos, obtida a partir de medidas do campo magnético externo, que permita a detecção de faltas incipientes e leve em consideração as influências do ponto de operação da máquina sobre a assinatura magnética a fim de limitar a ocorrência de falsos positivos no processo de detecção de faltas.

## 1.2 OBJETIVOS METODOLÓGICOS

A seguir são descritos os objetivos metodológicos dessa tese, necessários para atingir o objetivo geral de maneira otimizada e seguindo a metodologia científica:

- Avaliar as características do campo magnético externado em máquinas síncronas na condição de regime permanente e avaliar técnicas já existentes para a monitoração do campo magnético para detecção de faltas;
- Realizar o levantamento dos procedimentos de medição do campo magnético externo em GSs, assim como o processamento das medidas para a extração da assinatura magnética da máquina;

- Obter dados sintéticos, a partir de simulação computacional, que representem o comportamento de uma falta incipiente e coletar dados por meio de medições do campo magnético externo em GSs em condições de falta, para validação da metodologia proposta;
- Avaliar técnicas analíticas para detecção de anomalias em séries temporais, com o objetivo de avaliar as características do campo magnético externo ao longo da operação do GS;
- Avaliar a influência de variações do ponto de operação sobre o espectro de frequências do sinal do campo magnético externo coletado em GSs;
- Desenvolver uma metodologia de monitoração da assinatura magnética que incorpore as técnicas de detecção de anomalias e os processos para limitar a influência de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética da máquina;
- Aplicar a metodologia desenvolvida em dados sintéticos, em dados de ensaios realizados em uma bancada para imposição de faltas e em dados provenientes de medições por equipamentos instalados em uma usina hidrelétrica, para a validação do método proposto.

### 1.3 CONTRIBUIÇÕES

Esta tese contribui para o aprimoramento de metodologias de detecção de faltas incipientes em geradores síncronos por meio do campo magnético externo, que não dispõem de ferramentas para a avaliação automática do comportamento desta grandeza. A automatização deste processo facilita a implantação de sistemas de monitoração da condição de máquinas que permitam a monitoração de GSs de maneira autônoma e ágil, para geração de alertas ou indicativos de falta, sendo uma importante ferramenta para a aplicação prática desta técnica de monitoração preditiva em plantas de geração de energia. Mais especificamente, essa tese apresenta as seguintes contribuições originais: i) aplicação de técnicas analíticas de detecção de alterações na avaliação da assinatura magnética de GS para detecção de faltas; ii) análise e avaliação da influência de variações do ponto de operação da máquina sobre a assinatura magnética do GS e as implicações desta influência sobre os métodos de detecção de faltas; iii) desenvolvimento de uma metodologia

de monitoração periódica da assinatura magnética que considere as influências do ponto de operação do GS sobre seu campo magnético externo e que permita a detecção de faltas incipientes, mostrando a necessidade do monitoramento da assinatura magnética de maneira continuada ao longo do tempo; iv) no monitoramento de GSs, propõe-se a aplicação deste conceito de assinatura magnética continuada para a definição das variáveis a serem utilizadas para monitorar a condição da máquina. Os testes da metodologia de monitoração com dados sintéticos, obtidos por simulação computacional, dados obtidos por meio de ensaios experimentais em GSs com a imposição controlada de diferentes tipos de faltas e dados de equipamentos instalados em geradores síncronos operando em uma usina hidrelétrica conectada ao sistema elétrico brasileiro também são contribuições importantes para validar a metodologia proposta e a aplicação desta tecnologia no meio industrial.

Como contribuição geral dessa tese, tem-se a melhoria dos processos de análise e avaliação das características do campo magnético externo de geradores síncronos, promovendo uma metodologia de análise para aplicações práticas que aumenta a possibilidade de observação de padrões de faltas. As conclusões e os resultados obtidos consolidam premissas indicadas nos trabalhos anteriores do GRUCAD e na literatura científica apresentados no capítulo seguinte, além de fornecer subsídios para a continuidade de pesquisas e a expansão dessa técnica de monitoração preditiva.

#### 1.4 ORGANIZAÇÃO DO DOCUMENTO

Este documento está dividido em oito capítulos como descritos a seguir. No capítulo 1 foi apresentada uma introdução ao tema desenvolvido, mostrando a contextualização e motivação da tese, seus objetivos gerais e metodológicos e suas contribuições. No capítulo 2 é descrita uma revisão bibliográfica de algumas características associadas à interpretação do comportamento do campo magnético externo de GSs e de trabalhos que utilizam a monitoração desta variável para fins de manutenção preditiva da máquina. No capítulo 3 são relatados os princípios de medição e o processamento de medidas do campo magnético externo, indicando as etapas de formação dos históricos de amplitudes e a fonte dos conjuntos de dados (*datasets*) utilizados para teste e validação da metodologia desenvolvida. No

capítulo 4 é exposta uma revisão de alguns métodos analíticos para monitoração de tendência e detecção de anomalias em séries temporais. No capítulo 5 é apresentado um estudo sobre a influência de variações do ponto de operação sobre as características do campo magnético externo. No capítulo 6 é descrita a metodologia desenvolvida para detecção de faltas em GS por meio do campo magnético externo. No capítulo 7 são apresentados os resultados das técnicas de detecção de anomalias e da metodologia de detecção de faltas proposta, abordando os padrões de comportamento observados na avaliação de dados sintéticos, dados experimentais de ensaios em laboratório e dados de equipamentos instalados em um gerador de uma usina hidrelétrica. Por fim, no capítulo 8 são apresentadas as conclusões da tese e as sugestões para trabalhos futuros.

## **2 GERADOR SÍNCRONO E MONITORAÇÃO DA CONDIÇÃO**

Neste capítulo são abordados alguns conceitos teóricos sobre GSs, os quais são importantes para a interpretação de características do comportamento do campo magnético externado. Uma breve revisão da bibliografia sobre técnicas de detecção de faltas em máquinas elétricas utilizando a monitoração do seu campo magnético é apresentada, com ênfase nas iniciativas de monitoração de GSs por meio do campo magnético externo.

### **2.1 GERADOR SÍNCRONO EM REGIME PERMANENTE**

O GS é o ativo do sistema de geração de energia elétrica de interesse nesta tese, sendo responsável pela conversão de energia mecânica em energia elétrica. A predominância de sua aplicação nas plantas de geração de energia elétrica motiva o melhoramento contínuo de técnicas de monitoração deste ativo, assim como a pesquisa de novas maneiras de monitorar seu comportamento durante a operação. A seguir são descritos brevemente o seu princípio de funcionamento e algumas características físicas que são de interesse para a compreensão e o desenvolvimento da metodologia de análise e monitoração apresentada nesta tese.

#### **2.1.1 Estrutura física e princípio de funcionamento do GS**

O GS é formado pelo conjunto de duas estruturas principais: o estator e o rotor. O estator corresponde à parte fixa do conjunto e é alojado dentro de uma estrutura metálica comumente denominada de carcaça. O rotor constitui a parte móvel, centralizado do interior do conjunto, e é responsável por receber o torque mecânico em seu eixo a partir de uma máquina primária, constituída por uma turbina hidráulica, a vapor, a gás ou eólica, dependendo do tipo de planta de geração.

A conversão de energia mecânica em energia elétrica pelo GS ocorre a partir da aplicação de um torque no eixo da máquina e da aplicação de uma tensão de excitação no enrolamento do rotor, também denominado de enrolamento de campo. Há geradores síncronos em que a excitação é realizada por ímãs permanentes. Este tipo não é abordado nesta tese, mas a metodologia aqui tratada pode ser também aplicada neste tipo de máquina.

A tensão de campo ( $V_f$ ) é contínua e gera um campo magnético no entreferro. Ao ser aplicado um torque ao eixo do GS, o movimento do rotor faz com que exista um movimento relativo entre este campo magnético e os enrolamentos do estator. Esta interação gera uma variação de fluxo magnético que atravessa os enrolamentos do estator, induzindo tensões nos terminais destes enrolamentos, conforme previsto pela Lei de Faraday (Bastos, 2004). A frequência elétrica da tensão gerada é função do número de pares de polos do GS ( $p$ ) e da velocidade mecânica ( $n_m$ ) de rotação do eixo, de modo que em regime permanente a frequência elétrica se encontra em sincronismo com a velocidade de rotação (Bim, 2012).

Para geradores síncronos trifásicos convencionais, o posicionamento dos enrolamentos do estator é projetado para gerar um conjunto trifásico de tensões com formas de onda sinusoidais. A conexão do GS a uma carga ou a um sistema de potência faz circular correntes alternadas pelos enrolamentos do estator, que geram um campo magnético rotativo (campo magnético girante) na máquina, interagindo com o campo magnético produzido pelo rotor, resultando o campo magnético presente no entreferro da máquina. Sob o campo produzido pelo rotor, há então o efeito conhecido como reação da armadura, que compõem o campo magnético estabelecido no gerador síncrono operando em regime permanente (Chapman, 2013). Este campo magnético em regime tem seu comportamento detalhado na sequência desta tese e apresenta características que refletem aspectos construtivos e de operação de cada máquina em particular, constituindo-se em uma importante grandeza para monitorar a condição do GS nos processos de manutenção preditiva.

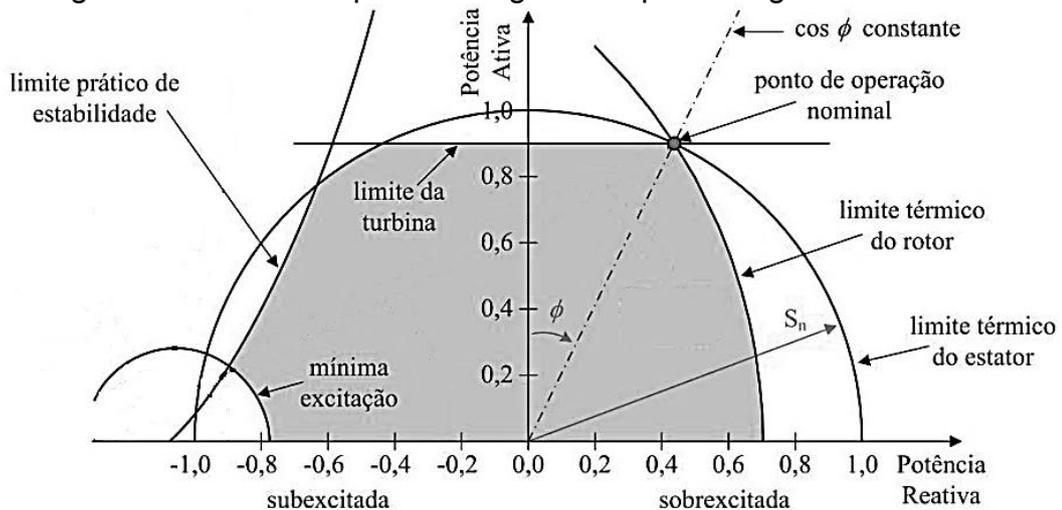
### **2.1.2 Características de operação do GS em regime permanente**

O GS pode ter sua operação controlada pelo ajuste da  $n_m$  e pelo ajuste da  $V_f$  (Umans, 2014). Com o GS operando de maneira isolada, o ajuste da  $n_m$  altera a frequência elétrica das tensões e das correntes geradas; e o ajuste de  $V_f$  altera a magnitude da tensão terminal ( $V_t$ ) do gerador. Por outro lado, para o GS operar sincronizado com um sistema de potência, a  $V_t$  e a frequência elétrica são impostas pelo sistema no ponto de conexão, de modo que o ajuste de  $n_m$  altera o despacho

de potência ativa ( $P$ ) e o ajuste da  $V_f$  altera o despacho ou absorção de potência reativa ( $Q$ ). O ajuste dessas variáveis de entrada possibilita operar uma máquina síncrona como gerador, com fatores de potência indutivo, capacitivo ou resistivo, além de possibilitar a operação como compensador de reativos (Bim, 2012).

A operação do GS é limitada por características construtivas dos elementos do grupo gerador e por critérios de estabilidade. A curva de capacidade de um GS, conforme apresentada na Figura 1, mostra as regiões de operação possíveis para um gerador síncrono operar de maneira segura. Os limites desta curva variam de acordo com as características do grupo gerador e suas definições são detalhadas na literatura (Chapman, 2013; Guimarães, 2003; Sen, 2013). As plantas de geração de energia elétrica, em geral, procuram manter o GS operando dentro destes limites por meio de sistemas de controle e proteção, garantindo a operação segura da máquina.

Figura 1. Curva de capacidade genérica para um gerador síncrono.



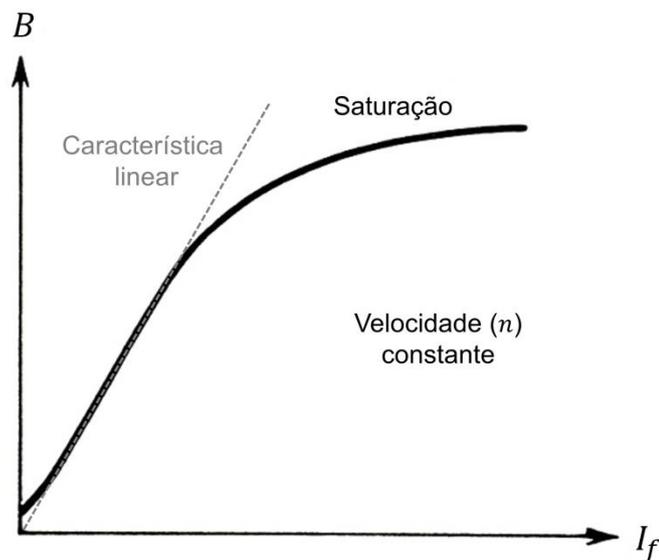
Fonte: Adaptado de Guimarães (2003).

Com base na curva de capacidade, o ponto de operação de um GS operando em regime permanente pode ter diferentes configurações de despacho de  $P$  e  $Q$ . Para cada configuração de operação, as correntes do estator irão apresentar amplitudes proporcionais ao despacho de potência, o que gera a formação de campos magnéticos com características distintas para cada ponto de operação (Chapman, 2013). Neste cenário, tem-se uma assinatura magnética diferente para cada ponto de operação, mesmo a máquina operando na condição sadia.

Outra característica importante na operação de GSs é a saturação de seu circuito magnético. A indução magnética ( $B$ ) produzida pela corrente do enrolamento

de campo ( $I_f$ ) apresenta característica não linear devido à saturação dos circuitos magnéticos, principalmente do rotor. Este efeito pode ser observado na Figura 2, que apresenta a curva de magnetização para um GS. O ajuste do despacho de  $Q$ , e como consequência o controle de tensão, realizado pelo ajuste da corrente  $I_f$ , altera a tensão interna da máquina de forma não linear, pois esta é proporcional à indução magnética ( $B$ ) gerada por  $I_f$ . Essa resposta não linear é estendida à tensão induzida nos enrolamentos do estator e conseqüentemente ao campo magnético ( $H$ ) estabelecido na máquina em uma condição de regime permanente (Chapman, 2013; Sen, 2013). Este fenômeno, somado a pequenas variações de velocidade, que ocorrem durante a operação, dificultam a determinação exata das características do campo magnético a partir das variáveis de entrada ( $n_m$  e  $V_f$ ).

Figura 2. Curva de magnetização de um gerador síncrono.



Fonte: Adaptado de Sen (2013).

Em plantas de geração de energia as variações da assinatura magnética da máquina são difíceis de serem previstas com exatidão, pois dependem de diversos fatores como o ponto de operação do gerador, a saturação de seu circuito magnético, os caminhos do fluxo magnético e a localização do ponto de observação (localização dos sensores). Estes fenômenos são de fundamental importância para a monitoração do campo magnético de geradores síncronos, de modo que a consideração das influências das variações do ponto de operação do GS na

monitoração de sua condição por meio do campo magnético externo é um importante alvo desta tese.

### **2.1.3 Campo magnético do GS em regime permanente**

A monitoração do campo magnético, para fins de detecção de faltas, deve ser realizada em condições próximas as de regime permanente, onde o ponto de operação apresenta pequenas variações, de modo que a assinatura magnética da máquina também permaneça aproximadamente constante. Nestas condições, eventuais alterações de padrões da assinatura magnética podem ser vinculadas com faltas, incipientes ou estabelecidas.

O campo magnético em regime é resultante das interações entre os campos magnéticos gerados pelas correntes dos enrolamentos do rotor, do estator, dos enrolamentos amortecedores presentes no rotor e, em uma escala menor, por correntes parasitas estabelecidas no núcleo do estator e do rotor. Neste campo magnético em regime, a ocorrência de faltas que gerem alteração do circuito magnético da máquina tende a alterar sua assinatura magnética. Como exemplo, faltas de curto-circuito entre espiras, do estator ou rotor, ou curto-circuito entre chapas do núcleo estatórico geram novos laços de correntes, ou alteram os já existentes, modificando o campo magnético nestas regiões. Da mesma maneira, faltas de origem mecânica como o desbalanceamento, estático e dinâmico, alteram a configuração do circuito magnético da máquina, alterando o campo magnético estabelecido (Capolino *et al.*, 2019).

A monitoração da assinatura magnética do GS pode ser realizada medindo o campo magnético no seu interior ou no seu exterior. O campo magnético interno pode ser medido por sensores alojados no entreferro, apresentando amplitudes maiores do que o campo disperso. O campo magnético externo pode ser monitorado por meio de sensores posicionados próximos à carcaça do estator. Dependendo da posição do sensor, e devido principalmente à atenuação causada pela carcaça metálica, o campo magnético disperso externo apresenta intensidade menor do que o interno.

As regiões de maior intensidade de campo magnético em GSs, em geral, são no entreferro (parte interna) e na parte externa em regiões próximas a partes ativas, como cabeças de bobina, fechamento de barramentos de neutro e de saída

do gerador, que podem não ser blindados e gerar campos de alta intensidade em sua proximidade (superiores a 2000 A/m). Estes campos podem mascarar aspectos construtivos e de simetria magnética existentes no interior da máquina, diferente do campo magnético disperso através da carcaça do gerador síncrono (na superfície do estator é da ordem de dezenas a centenas de Ampères por metro), que é um reflexo do campo magnético interno da máquina.

Nessa tese, o campo magnético monitorado preferencial é o campo disperso através da carcaça do estator que, mesmo possuindo baixa amplitude devido a sua atenuação, possui informações que podem ser utilizadas para detecção e localização de faltas. Além disso, há nos sensores também a presença dos campos gerados pelas correntes nas cabeças de bobina/barramentos. Neste contexto, posicionam-se os sensores de modo a evitar ou a atenuar a influência de tais campos. Por outro lado, para certos defeitos elétricos, os campos magnéticos gerados pelas cabeças de bobina/barramentos também podem conter informações de interesse, fornecendo uma maior sensibilidade à detecção do defeito. Este último cenário não é investigado nesta tese, embora as técnicas de análise e de monitoração aqui propostas possam ser aplicadas na avaliação destes casos.

Para a medição do campo magnético disperso por meio da carcaça do GS, utilizam-se as propriedades de refração do campo magnético na passagem entre dois meios com permeabilidades distintas. Neste caso, a passagem do campo magnético da estrutura metálica para o ar provoca a refração deste campo, de maneira que sua componente tangencial é conservada nesta transição (Bastos, 2004). Com isso, o campo magnético tangencial tem a ordem de grandeza dos valores do campo no interior do núcleo do estator. Desta maneira, uma estratégia eficiente para a medição do campo magnético disperso é posicionar os sensores próximos à carcaça de modo que estes sejam sensibilizados preferencialmente por sua componente tangencial (Rigoni, 2014).

## 2.2 MONITORAÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO PARA DETECÇÃO DE FALTAS

A monitoração do campo magnético interno é a técnica mais explorada na literatura neste segmento (Kedjar; Merkhouf; Al-Haddad, 2020; Mazaheri-Tehrani; Faiz, 2022; Zamudio-Ramirez *et al.*, 2022), com pesquisa publicada a partir de 1971 (Albright, 1971) e publicações recentes na investigação de faltas em máquinas

elétricas (Afrandideh *et al.*, 2020; Ehya *et al.*, 2020; Wu *et al.*, 2023). Este tipo de monitoração é normalmente realizado por meio da medição do fluxo magnético no entreferro da máquina. Trata-se de um método invasivo, pois necessita de intervenção na operação da máquina para instalação ou manutenção de sensores na região do entreferro, que é de difícil acesso dependendo do tipo da unidade geradora. Sua eficiência na detecção de faltas de rotor é amplamente comprovada na literatura, gerando inclusive equipamentos comerciais destinados a esta função (Sasic; Campbell; Lloyd, 2011). Embora seja uma técnica já utilizada no meio industrial, não há nenhuma norma técnica que oriente sua aplicação ou defina padrões de falta para este tipo de sistema de monitoração.

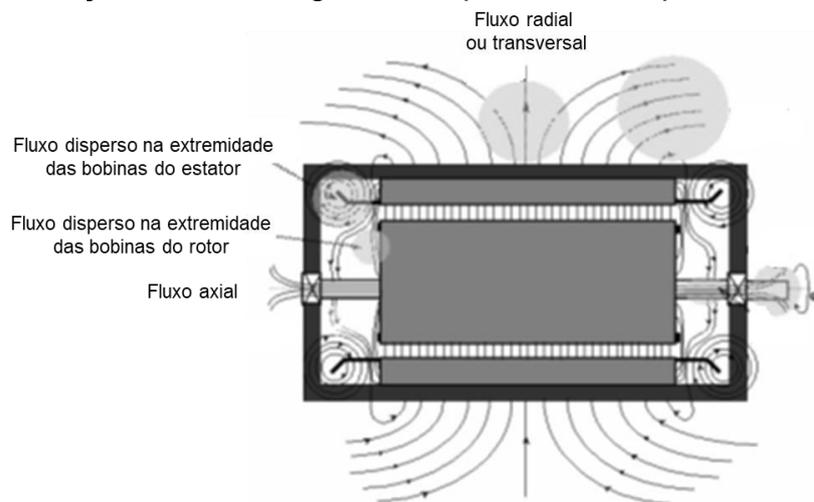
A monitoração do campo magnético externo dos GSs, por outro lado, é uma técnica abordada em menor grau na literatura científica, quando comparada com a monitoração do campo magnético interno. Contudo, algumas pesquisas atestam a viabilidade e o potencial desta técnica na detecção de falta incipientes, que apresenta como diferencial a possibilidade de realização da monitoração da característica magnética da máquina de maneira não invasiva. Este fato coloca esta classe de monitoração como uma tendência no diagnóstico de faltas em máquinas elétricas (Henao *et al.*, 2014). A aplicação desta técnica é relatada por Rigoni (2014), Capolino *et al.* (2019) e Santos (2021) No conjunto destas referências, é evidenciado a aplicação desta técnica na detecção de faltas de curto-circuito nos enrolamentos do rotor e do estator em um estágio inicial, faltas mecânicas, curto-circuito entre lâminas do núcleo e rompimento de enrolamentos amortecedores. Uma breve revisão da literatura desta técnica de monitoração é apresentada a seguir.

### **2.2.1 Monitoração do campo magnético externo**

A monitoração do campo magnético externo de máquinas elétricas teve seu início a partir da investigação do fluxo magnético disperso na parte externa de motores de indução (Howe; Hammond, 1974; Tavner, 1978; Thompson *et al.*, 1979; Le Coat *et al.*, 1999). As características desta grandeza logo se mostraram atrativas para monitorar a condição destas máquinas, originando uma série de trabalhos aplicando esta classe de monitoração para detecção de faltas em máquinas assíncronas (Ceban; Pusca; Romary, 2012; Kliman *et al.*, 1988; Rigoni *et al.*, 2012; Zamudio-Ramirez *et al.*, 2019).

Embora os motores de indução tenham características distintas com relação às máquinas síncronas (MS), algumas características do campo disperso são comuns para máquinas rotativas. Entre elas, alguns trabalhos fazem a distinção entre os campos dispersos de origem radial (ou transversal) e axial em máquinas elétricas (Ceban; Pusca; Romary, 2012; Romary; Roger; Brudny, 2009; Thompson, 1999), como apresentado na Figura 3, constatando experimentalmente que o campo axial, ou disperso nas extremidades da máquina, pode apresentar amplitude superior ao campo radial, que é atenuado pelo circuito magnético do estator e carcaça. Zidat *et al.* (2010) apresenta a decomposição do campo transversal em componentes tridimensionais: axial (com relação ao eixo da máquina), normal e tangencial, as duas últimas com relação a superfície da carcaça do estator; além de indicar a posição preferencial de sensores de campo para a medição de cada componente.

Figura 3. Distribuição do fluxo magnético disperso em máquinas elétricas rotativas.



Fonte: Adaptado de Thompson (1999).

A investigação do campo magnético externo em máquinas síncronas para detecção de faltas é mais recente do que os estudos direcionados a máquinas assíncronas. Um dos primeiros trabalhos nesta temática foi desenvolvido por Thailly *et al.* (2006), abordando a detecção de faltas de estator e rotor por meio do espectro do campo magnético externo de uma máquina síncrona. Neste trabalho, observou-se que a adição de uma falta de curto-circuito em um enrolamento do estator promoveu alterações significativas das amplitudes de componentes

harmônicas associadas à frequência fundamental elétrica ( $f_e$ )<sup>1</sup>. Para uma falta de curto-circuito no rotor, observou-se um aumento da densidade do espectro do sinal e a variação de amplitude de uma componente espectral com frequência igual a  $f_e$  dividida pelo número de pares de polos ( $p$ ), além de algumas componentes harmônicas desta frequência.

A investigação do espectro de frequências de grandezas eletromagnéticas da máquina síncrona para detecção de faltas teve contribuições adicionais com os trabalhos publicados por Neti, Dehkordi e Gole (2008) e Neti e Nandi (2009). Nestes trabalhos, foram utilizadas formulações analíticas da indução magnética no entreferro em função da permeância ( $\mathcal{P}$ ) que indicam a aparição de componentes no espectro de frequências abaixo da  $f_e$  e entre as harmônicas da  $f_e$ . A determinação destas componentes harmônicas ( $f_h$ ) pode ser realizada por

$$f_h = k \frac{f_e}{p} \quad (1)$$

onde  $k$  é um inteiro natural positivo. Esta definição formalizou alguns resultados observados por Thailly *et al.* (2006).

Estas componentes foram associadas a pequenas assimetrias eletromecânicas na estrutura da máquina, estando sempre presentes em máquinas reais. A avaliação da corrente de armadura (Neti; Dehkordi; Gole, 2008), da corrente de campo e do sinal de um sensor de campo magnético instalado no rotor de uma máquina síncrona (Neti; Nandi, 2009) comprovaram que tais frequências podem ser sensibilizadas por faltas de estator e de rotor, sendo fortes candidatas para monitorar a ocorrência de faltas. Rigoni (2014) aprimorou o desenvolvimento da formulação analítica para a indução magnética no entreferro e reforçou as conclusões de Neti, Dehkordi e Gole (2008), evidenciando que a frequência fundamental do campo magnético (interno e externo) é definida por (1), fazendo  $k = 1$ . Neste caso, tem-se que a frequência fundamental destes sinais está associada à frequência de rotação da máquina, sendo denominada por frequência fundamental mecânica ( $f_m$ )<sup>2</sup> e definida por  $f_e/p$  em GSs.

<sup>1</sup> A frequência fundamental elétrica refere-se à frequência elétrica de operação da máquina (normalmente 50 ou 60 Hz).

<sup>2</sup> O termo frequência fundamental mecânica, amplamente utilizado nesta tese, é assim denominado em virtude da sua associação com a frequência de giro da máquina. Ressalta-se que a definição desta variável é realizada a partir de grandezas elétricas e magnéticas da máquina, juntamente com parâmetros construtivos, não estando associada, neste contexto, a grandezas mecânicas ou medições associadas a estas grandezas.

A detecção de faltas em MSs por meio do espectro de frequências do campo magnético externo também foi abordada por Cuevas (2016), que avaliou experimentalmente um GS comparando o espectro do campo externo da máquina saudável com o espectro do campo após a inserção de uma falta de curto-circuito de espiras no rotor. Os resultados apontaram a sensibilidade do espectro diante da falta, sendo estes resultados comprovados por ensaios de avaliação do espectro de vibrações mecânicas nesta mesma máquina. Irhoumah *et al.* (2018, 2019, 2021) exploram faltas no estator de máquinas síncronas e assíncronas por meio do espectro do campo magnético externo medido por dois sensores posicionados na carcaça destas máquinas, deslocados em  $180^\circ$  entre si em uma circunferência centrada com o eixo da máquina. Neste caso a detecção de faltas é realizada pela correlação entre as amplitudes de determinadas componentes harmônicas dos sinais dos dois sensores, com a máquina operando a vazio e com carga. A assimetria magnética causada pela falta provoca diferenças nas amplitudes observadas por cada sensor dependendo da condição de operação, alterando a correlação entre as amplitudes comparadas. Uma abordagem semelhante para detecção de faltas de estator em máquinas síncronas é apresentado por Pusca *et al.* (2021), onde a detecção de faltas é realizada avaliando as alterações de amplitude de componentes harmônicas com a máquina operando na condição sadia e com defeito, diante de alterações de carga, também por meio da comparação dos sinais de dois sensores. Estes trabalhos apresentam resultados satisfatórios para máquinas síncronas de baixa potência (até 11 kW) em ensaios de laboratório com o GS em operação isolada.

No contexto de detecção de faltas por meio do campo magnético externo de máquinas síncronas, o GRUCAD tem contribuído na investigação dessas técnicas, principalmente por meio dos trabalhos desenvolvidos por Rigoni (2014) e Santos (2021).

O trabalho de Rigoni (2014), além de contribuir com a análise analítica da indução magnética no entreferro justificando a existência da componente fundamental mecânica e suas harmônicas no campo magnético em regime da máquina, apresentou premissas de sensoriamento e condicionamento do sinal do campo magnético externo em GSs para fins de detecção de faltas. Como resultados, Rigoni (2014) desenvolveu um protótipo de medição de sinais por meio destas premissas, detectando faltas de curto-circuito de espiras de um polo do rotor em um

GS de polos salientes de 10 kVA, por meio do acompanhamento das amplitudes das componentes harmônicas da  $f_m$  em baixa frequência (abaixo da  $f_e$ ).

Continuando na mesma linha de pesquisa de Rigoni (2014), Santos (2021) ampliou a modelagem da indução no entreferro da máquina, considerando a máquina síncrona como um gerador de sinais, onde a forma de onda da indução magnética no entreferro resulta de um processo de modulação entre as forças magnetomotrizes, geradas pelos enrolamentos do estator e do rotor, e as variações de permeância no entreferro. Esta abordagem teórica evidenciou a possibilidade de detecção de faltas de estator e de rotor por meio da análise em frequência do campo magnético externo, sendo avaliada por meio de simulações numéricas e por meio de análise experimental. Com relação a esta última abordagem, Santos (2021) propôs melhorias no circuito de aquisição e condicionamento, em equipamentos protótipos desenvolvidos por Santos (2016), além de melhorias no processamento dos sinais do campo magnético externo, possibilitando a detecção de faltas de curto-circuito nos enrolamentos do estator, faltas de curto-circuito no núcleo do estator, faltas em enrolamentos do rotor, faltas associadas à retirada de barras de amortecimento e faltas mecânicas, como excentricidade estática e vibrações mecânicas. A detecção desta ampla variedade de faltas foi resultado da monitoração do espectro de frequências do campo magnético externo da máquina, desde a região de baixa frequência (menores do que 300 Hz para o GS operando sincronizado a 60 Hz) até regiões de alta frequência (aproximadamente 4 kHz).

Com os resultados obtidos, Santos (2021) gerou diretrizes preliminares para a detecção de faltas e sua possível localização, contribuindo para o diagnóstico de máquinas síncronas por meio deste tipo de monitoração. Além disso, este trabalho foi um dos primeiros a realizar a avaliação do campo magnético externo com a máquina sincronizada à rede elétrica comercial. O autor destaca a atenção adicional que deve ser dada à influência do ponto de operação da máquina sobre o espectro do campo magnético externo, uma vez que alterações na condição de carga da máquina podem gerar mudanças de amplitude, prejudicando o processo de detecção de faltas, ou conduzindo a conclusões equivocadas.

### 2.3 CONTEXTO ATUAL DE MONITORAÇÃO DA CONDIÇÃO DE GS

Alguns dos trabalhos elencados nesta revisão bibliográfica apresentam resultados consolidados na detecção de faltas por meio da monitoração do espectro de frequências do campo magnético externo de máquinas elétricas. Contudo, a maioria dos trabalhos tem sua comprovação realizada por meio de ensaios de laboratório com aquisições pontuais e de curta duração, que evidenciam a possibilidade ou não de detecção de falta. Estas conclusões, em sua maioria, são realizadas por inspeção visual dos resultados obtidos. Este cenário, entretanto, não apresenta um suporte adequado para aplicações reais onde um GS monitorado pode levar meses ou anos para apresentar uma falta, gerando um histórico de dados relativamente extenso para análise, além de ocorrer mudanças de seu ponto de operação ao longo do tempo. Metodologias complexas, tal como a proposta por Santos (2021), preveem a monitoração simultânea de centenas ou milhares de componentes harmônicas de interesse para a detecção de faltas em cada sensor, dependendo do caso de aplicação, o que agrava a dificuldade de análise por um especialista e remete à necessidade de metodologias de monitoração automáticas dos sinais coletados e armazenados. Além disso, não são relatados estudos sobre a influência de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética da máquina e sobre o impacto destas variações no processo de detecção de faltas, que são necessários para a monitoração contínua do campo magnético externo ao longo da operação do GS.

Neste contexto, essa tese propõe uma metodologia automática de detecção de alterações na assinatura magnética do GS obtida por meio de medidas do campo magnético externo. Esta metodologia computacional avalia simultaneamente todas as variáveis monitoradas para a automatização do processo de detecção de faltas em processos de monitoração contínua da condição de máquinas elétricas, agilizando a análise de grandes conjuntos de dados e a identificação de padrões de faltas. Além disso, a geração de indicadores de faltas extraídos desta metodologia tem potencial aplicação em sistemas de monitoração da condição de GSs, de maneira que esta tese trás contribuições teóricas e práticas para o tema abordado. Além disso, é apresentada uma avaliação da influência de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética da máquina, que permitiu adequar a metodologia desenvolvida para considerar as variações do ponto de operação do GS sincronizado com a rede elétrica. Esta aplicação permite a monitoração contínua do GS ao longo de sua operação, minimizando a ocorrência de falsos positivos

devido às variações das grandezas elétricas da máquina e viabilizando a aplicação desta metodologia em plantas de geração de energia elétrica.

## 2.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram abordadas as principais características associadas aos GSs operando em regime permanente que são necessárias para a contextualização desta tese. Uma breve revisão bibliográfica das técnicas de detecção de faltas por meio do campo magnético externo foi apresentada, assim como o posicionamento desta tese neste contexto de aplicação. No capítulo seguinte é abordado o processo de aquisição dos sinais do campo magnético externo e a formação dos históricos de amplitudes, bem como a origem dos conjuntos de dados avaliados nessa tese.

### 3 MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO E OBTENÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA DO GS

A monitoração do campo magnético externo do GS para fins de detecção de faltas é realizada, nesta tese, por meio do acompanhamento e da análise dos históricos de amplitude de componentes espectrais desta grandeza magnética. Neste contexto, este capítulo apresenta os princípios e a arquitetura básica de medição do campo magnético externo, as técnicas de processamento de dados para geração dos históricos de amplitudes na forma de séries temporais e a fonte dos *datasets*<sup>3</sup> utilizados para a análise, e a validação das metodologias de monitoração e de detecção de faltas em GSs propostos neste documento.

#### 3.1 ARQUITETURA GERAL DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO

O aparato experimental utilizado para realização de medições do campo magnético externo em GS segue as especificações apresentadas por Santos (2016, 2021), onde o transdutor utilizado é um sensor de campo magnético por indução. O princípio de funcionamento deste sensor obedece a Lei de Faraday, que garante a geração de uma força eletromotriz nos terminais de uma bobina, aqui com núcleo de ar, em virtude da variação temporal do fluxo magnético ( $\Phi$ ) através de sua seção (Bastos, 2004). A tensão nos terminais de um sensor de indução com  $N$  espiras e seção  $S$  é definida por

$$v(t) = -N\mu_0 S \frac{dH(t)}{dt} \quad (2)$$

onde  $\mu_0$  é a permeabilidade magnética do ar e  $H$  é o campo magnético.

Por meio de (2), pode-se obter a derivada temporal do campo magnético ( $dH/dt$ ) por meio da razão entre a resposta em tensão do sensor,  $v(t)$ , e uma constante dependente das características construtivas do sensor ( $N\mu_0 S$ ). Nesta tese, como já mencionado, o campo magnético externo do GS é monitorado por meio de sua derivada temporal, que é proporcional a  $H$  e promove a amplificação natural das

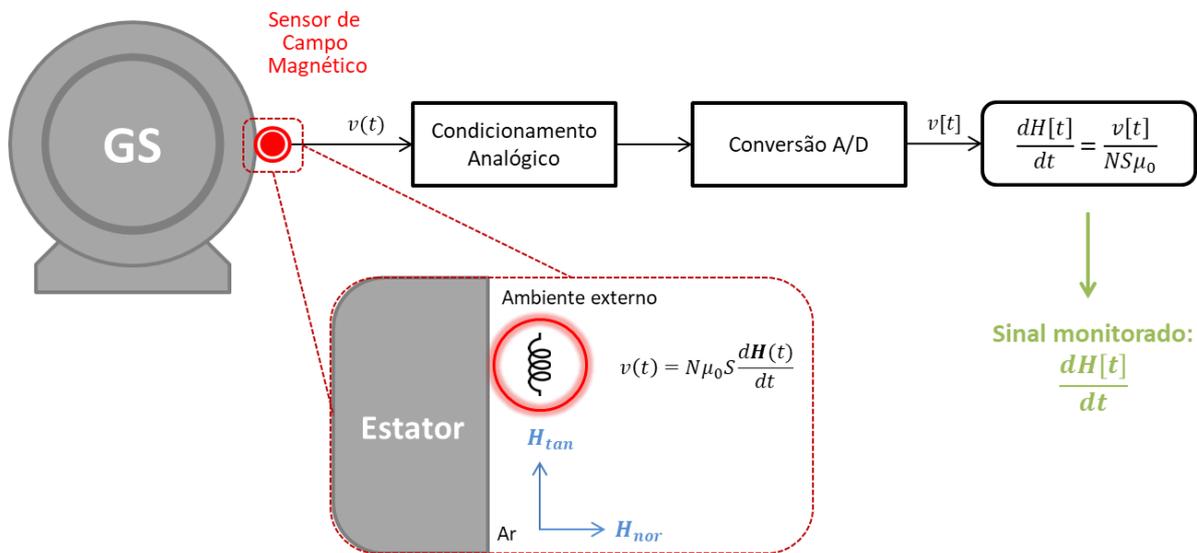
---

<sup>3</sup> *Datasets* são conjunto de dados tabulados contendo informações sobre características de um processo ou variável, utilizados no segmento de análise de dados para extração de características do processo, testes, aferição e validação de modelos de análise.

componentes de alta frequência, normalmente atenuadas pela carcaça, e que são úteis para a detecção de faltas em GSs (Rigoni *et al.*, 2020; Santos, 2021).

A arquitetura geral do sistema de medição do campo magnético externo é apresentada na Figura 4, que evidencia o posicionamento do sensor de campo por indução para a detecção da componente tangencial ( $H_{tan}$ ) do campo disperso e o sistema de aquisição e condicionamento dos sinais.

Figura 4. Arquitetura geral do sistema de aquisição de sinais do campo magnético externo.



Fonte: Autor.

A baixa amplitude do campo magnético disperso concatenado pela seção do sensor gera uma tensão com amplitude também reduzida, que pode variar em escalas de milivolts ou até microvolts, dependendo da potência do GS, da espessura da carcaça e da posição do sensor. Isso implica na necessidade de uma etapa de condicionamento analógico deste sinal, composta por estágios de amplificação e filtragem para garantir boa relação sinal/ruído e elevar a amplitude do sinal para a etapa de conversão analógico/digital (A/D), propiciando uma melhor resposta para o sinal coletado.

A saída da etapa de digitalização é o vetor de tensão discreto ( $v[t]$ ), amostrado a uma frequência  $f_s$  (frequência de amostragem) durante um período ( $T$ ), definido de acordo com as características desejadas para a análise do espectro de frequências obtido pela transformada de Fourier do sinal. Para avaliar a derivada temporal do campo magnético externo,  $dH[t]/dt$ , divide-se a tensão,  $v[t]$ , pela

constante  $N\mu_0 S$  do sensor e por eventuais ganhos adicionados na etapa de condicionamento, para reconstrução do sinal medido no sensor.

### 3.2 GERAÇÃO DO HISTÓRICO DE AMPLITUDES DO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO

O espectro de frequência do sinal digitalizado,  $dH[t]/dt$ , pode ser obtido por meio do cômputo da Transformada Rápida de Fourier (FFT, do inglês *Fast Fourier Transform*). Este espectro é composto por pontos de amplitude chamados de raias espectrais. A resolução espectral ( $df$ ), capacidade de identificar frequências distintas, é definida por

$$df = \frac{1}{T} = \frac{f_s}{N_s} \quad (3)$$

onde  $N_s$  é o número de amostras coletadas no período de aquisição  $T$ .

#### 3.2.1 Espectro de frequências de um sinal simulado

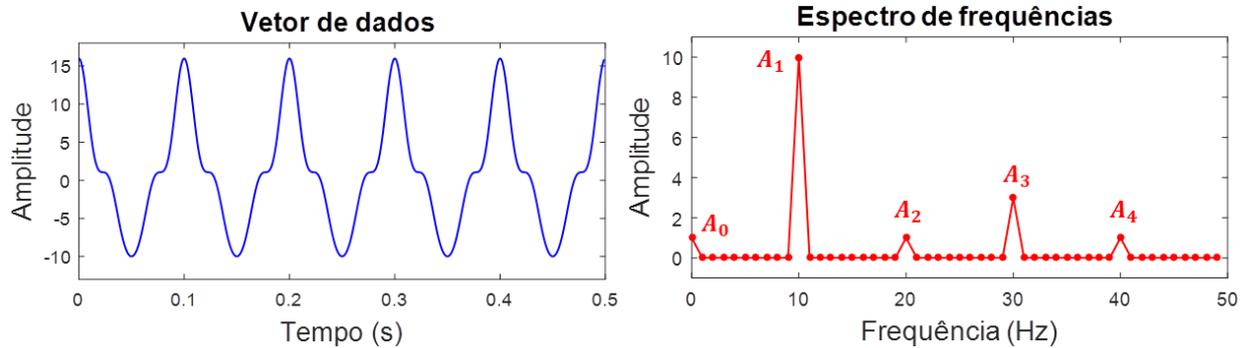
Como exemplo ilustrativo, pode-se simular um vetor genérico  $dH(t)/dt$  utilizando a função definida por

$$dH(t)/dt = A_0 + A_1 \cos(2\pi ft) + A_2 \cos(4\pi ft) + A_3 \cos(6\pi ft) + A_4 \cos(8\pi ft) \quad (4)$$

que fornece uma onda senoidal de frequência fundamental  $f$ . A componente fundamental deste sinal tem amplitude  $A_1$  e a segunda, terceira e quarta harmônicas têm amplitudes  $A_2$ ,  $A_3$  e  $A_4$ , respectivamente. O nível contínuo do sinal tem amplitude  $A_0$ .

A Figura 5 apresenta o sinal  $dH(t)/dt$  simulado no tempo, com uma frequência fundamental de 10 Hz e com amplitudes conhecidas definidas para exemplificar a análise do sinal simulado ( $A_0 = 1$ ,  $A_1 = 10$ ,  $A_2 = 1$ ,  $A_3 = 3$  e  $A_4 = 1$ ), além do espectro de frequência deste sinal, que evidencia as amplitudes das componentes utilizadas em (4) para simulação.

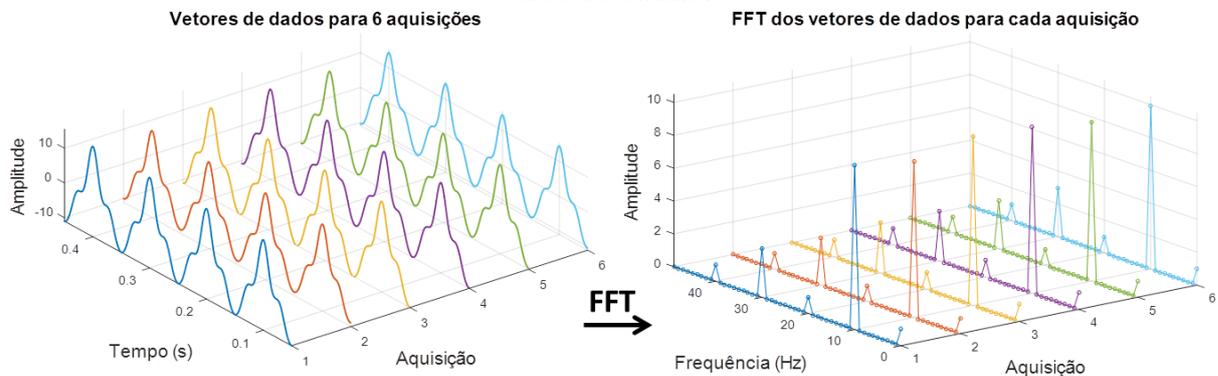
Figura 5. Sinal  $dH(t)/dt$  simulado com amplitudes conhecidas e seu espectro de frequências.



Fonte: Autor.

A monitoração do espectro de frequências da variável  $dH(t)/dt$  é realizada por meio da obtenção de novos conjuntos de amostras de forma periódica ao longo do tempo e do acompanhamento da amplitude de suas raias espectrais. A Figura 6 apresenta a simulação de 6 conjuntos de amostras de  $dH(t)/dt$  com amplitudes variando de forma aleatória, em torno de seu valor inicial, e seus respectivos espectros de frequência dispostos em cascata.

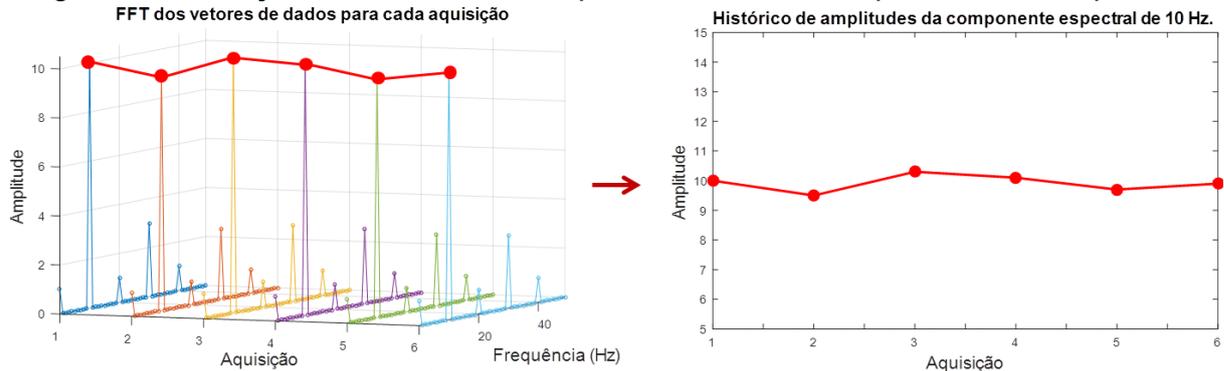
Figura 6. Simulação da aquisição de 6 vetores de dados e análise em frequências destes sinais.



Fonte: Autor.

Elegendo raias de interesse nos espectros destes sinais, as suas amplitudes podem ser acompanhadas individualmente ao longo do tempo por meio de linhas de tendência para cada uma destas componentes. A Figura 7 apresenta a tendência de amplitude da raia correspondente à frequência fundamental do sinal simulado (10 Hz) ao longo do tempo, formando uma série temporal que origina o histórico de amplitudes desta componente de frequência.

Figura 7. Formação do histórico de amplitudes de uma componente de frequência.



Fonte: Autor.

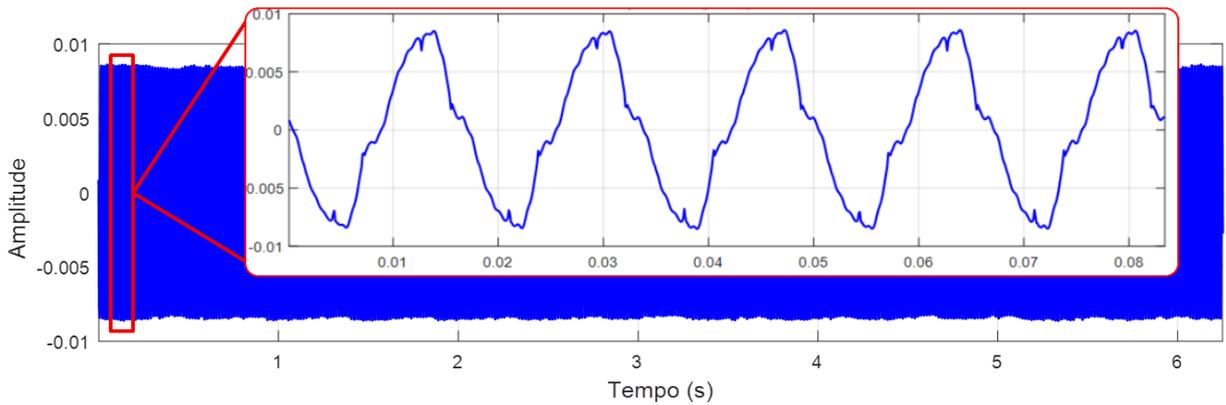
A monitoração do histórico de amplitudes de componentes de frequência de interesse do sinal avaliado permite acompanhar o comportamento destas componentes ao longo do tempo, o que possibilita inferir características ao processo que origina o sinal  $dH(t)/dt$ . A monitoração destas séries temporais individualmente facilita a manipulação da informação contida no espectro de frequência, diminuindo consideravelmente a quantidade de dados para análise e facilitando a extração de características.

### 3.2.2 Espectro de frequências do campo magnético externo para um GS

O sinal proveniente do sensor de campo magnético por indução apresenta um espectro de frequências denso, composto por harmônicas da frequência fundamental mecânica ( $f_m$ ) e outras componentes advindas do ruído ambiente, que podem estar presentes no meio industrial. Entre as harmônicas da  $f_m$ , a frequência fundamental elétrica ( $f_e$ ) e algumas de suas ímpares têm amplitudes geralmente preponderantes com relação às demais componentes do sinal medido.

A Figura 8 apresenta o sinal  $dH(t)/dt$  de uma aquisição de 6,25 segundos, proveniente de um sensor de campo magnético por indução, coletada na parte externa de um GS de 305 MVA e 56 polos em uma usina hidrelétrica. A frequência de operação desta máquina é 60 Hz ( $f_e = 60$  Hz), com fundamental mecânica ( $f_m$ ) de aproximadamente 2,14 Hz. É possível observar que a forma de onda do sinal é aproximadamente senoidal, com a  $f_e$  sendo a frequência preponderante no sinal (período de aproximadamente 16,67 ms).

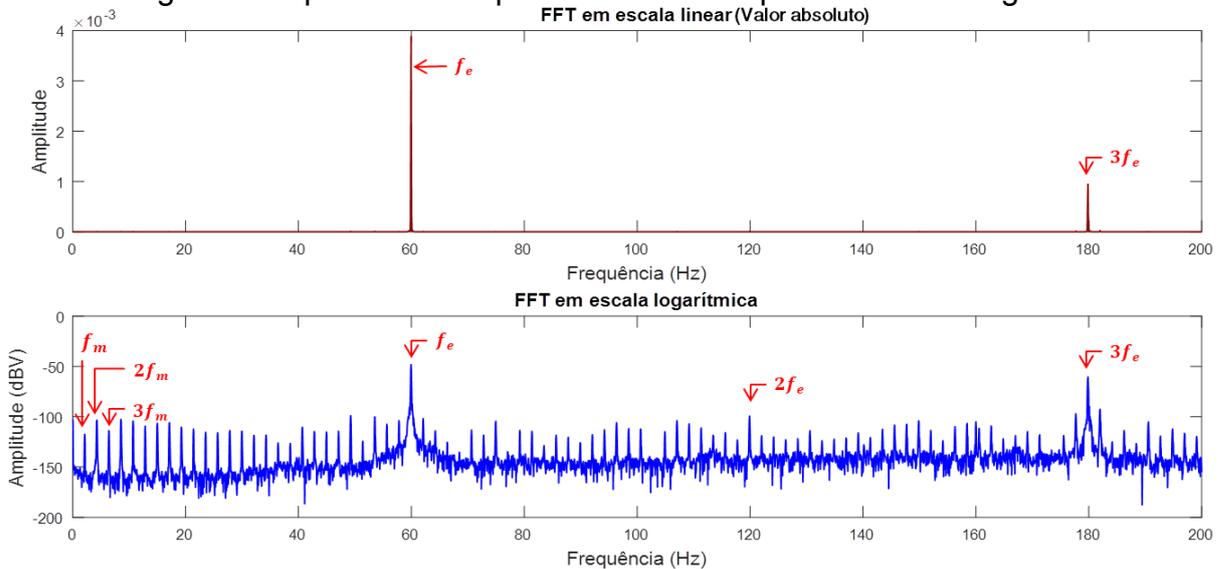
Figura 8. Aquisição de um sensor de campo por indução no GS de 56 polos.



Fonte: Autor.

A análise em frequência deste sinal é apresentada na Figura 9, que mostra o espectro de frequências do sinal até 200 Hz. Em escala linear, a diferença de amplitudes entre a  $f_e$  e a  $f_m$ , que pode ser na ordem de centenas ou milhares de vezes, dificulta a visualização da maioria das harmônicas de interesse, sendo notadas apenas a  $f_e$  e suas harmônicas ímpares. Neste sinal, a  $f_e$  tem componente com amplitude na ordem de milivolts, enquanto as harmônicas da  $f_m$  têm suas componentes com amplitude na ordem de poucos microvolts. Na Figura 9 também é apresentado o espectro de frequências em escala logarítmica, que contorna o problema de diferença entre as amplitudes e facilita a visualização da  $f_m$  e suas harmônicas. Neste documento, o espectro de frequências será sempre avaliado em escala logarítmica.

Figura 9. Espectro de frequências do sinal apresentado na Figura 8.



Fonte: Autor.

As amplitudes da  $f_m$  e de cada uma de suas harmônicas para uma aquisição da  $dH(t)/dt$  representam a assinatura magnética do GS para a condição na qual foi realizada a medição. A monitoração da condição do GS ao longo de sua operação é realizada por meio da monitoração da assinatura magnética continuada, formada pelo armazenamento das amplitudes das componentes de interesse ao longo do tempo, obtidas por meio da análise em frequência de sinais  $dH(t)/dt$  medidos periodicamente, como representado na Figura 7.

As amplitudes de cada componente harmônica de interesse para a detecção de faltas (múltiplas da  $f_m$ ) são dependentes de diversos fatores, como o ponto de operação da máquina, a posição do sensor na parte externa do GS, a exposição ao ruído ambiente e as configurações do sensor e do circuito de medição utilizados para a coleta dos sinais. Estes fatores podem gerar uma variabilidade natural na linha de tendência de amplitude de cada raia monitorada, as quais podem formar séries temporais com características distintas no valor médio, na variabilidade, na estacionariedade e na confiabilidade para monitoração da condição do GS.

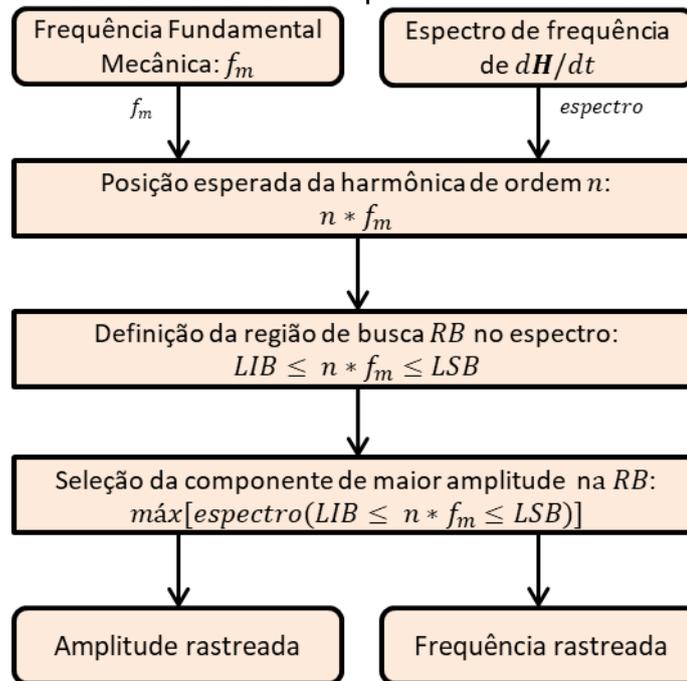
### 3.2.3 Rastreamento de raias

Uma etapa para a formação dos históricos de amplitudes, que são a assinatura magnética continuada da máquina, é a identificação automática das componentes harmônicas de interesse e o armazenamento das respectivas amplitudes. Este processo é denominado rastreamento de raias e requer uma série de cuidados para sua correta execução e formação de um *dataset* confiável para a monitoração da máquina. A confiabilidade deste processo e dos seus dados obtidos implica na confiabilidade de todo processo de monitoramento realizado a partir da avaliação da assinatura magnética continuada do GS.

As raias espectrais de interesse são componentes múltiplas inteiras da  $f_m$ , o que possibilita a sua localização por meio da definição de uma região de busca (*RB*) no espectro de frequências no entorno da posição estimada da harmônica de ordem  $n$ , definida por um limite inferior de busca (*LIB*) e um limite superior de busca (*LSB*). Este processo pode ser executado por um algoritmo, como o apresentado na Figura 10, onde a amplitude da componente harmônica de ordem  $n$  é identificada como o ponto de máximo do espectro dentro da região de busca. Este processo

minimiza problemas de imprecisão dos valores reais da  $f_m$  e de resolução espectral, para os casos em que a harmônica estimada ( $nf_m$ ) não corresponda a um ponto exato do espectro de frequências.

Figura 10. Rastreamento da componente harmônica de ordem  $n$ .



Fonte: Autor.

A precisão deste processo depende das duas variáveis de entrada: o vetor contendo o espectro de frequências e o valor real da frequência fundamental mecânica da máquina ( $f_{m_{real}}$ ). O espectro de frequência deve ser obtido com características que facilitem a identificação da amplitude das componentes harmônicas de interesse. Em geral, o sinal do sensor de campo é coletado durante um período  $T$  com uma frequência de amostragem  $f_s$  definida para garantir uma resolução espectral ( $df$ ) que facilite a identificação da amplitude das componentes harmônicas da  $f_m$  do GS monitorado.

Com relação à frequência fundamental mecânica, seu valor real ( $f_{m_{real}}$ ) normalmente sofre pequenos desvios ( $\Delta f_m$ ) com relação ao seu valor nominal ( $f_{m_{nominal}}$ ) devido às pequenas variações de frequência presentes no sistema elétrico de potência ao qual o GS encontra-se sincronizado, ou do próprio giro mecânico da máquina primária (turbina mecânica). Este desvio de frequência ( $\Delta f_m$ ), mesmo com amplitude muito baixa, pode dificultar a localização de componentes

harmônicas em alta frequência, já que a frequência real de uma componente harmônica de ordem  $n$  estará deslocada de seu valor teórico através de um fator  $n\Delta f_m$ . Desta maneira, se a busca das componentes harmônicas for realizada por meio da frequência nominal, a partir de determinada ordem a componente harmônica da fundamental mecânica real  $n(f_{m_{nominal}} \pm \Delta f_m)$  pode estar localizada fora da região de busca especificada:  $n(f_{m_{nominal}} \pm \Delta f_m) \notin LIB \leq f_{m_{nominal}} \leq LSB$ . Este fato pode fazer o processo de rastreamento identificar uma amplitude errônea para esta componente e para as próximas, degradando a confiabilidade dos dados coletados para esta faixa de frequências. Por este motivo, deve-se fornecer uma estimativa do valor real da frequência elétrica (ou mecânica) para garantir a confiabilidade da busca de componentes harmônicas em toda a faixa de frequência que se deseja monitorar.

### 3.3 FONTE DOS DATASETS AVALIADOS

Nesta seção são apresentadas as fontes dos *datasets* gerados e utilizados na validação da aplicação de métodos analíticos para detecção de alterações na assinatura magnética continuada e para avaliar o método de diagnóstico do gerador síncrono proposto nesta tese.

#### 3.3.1 Dados sintéticos

A geração de dados sintéticos, obtidos por simulação computacional, que procuram retratar o comportamento do campo magnético externo de MSs surgiu devido a dificuldades associadas à obtenção de dados característicos de faltas em ensaios de laboratório. Entre estas dificuldades, destaca-se o grande tempo necessário para realização de ensaios que forneçam um histórico de amplitudes com quantidade de pontos suficientes para fazer a caracterização estatística adequada dos eventos e, principalmente, a impossibilidade até o momento de realizar ensaios de imposição de faltas graduais ou com progressão lenta, que são características de faltas incipientes em MSs. Além disso, mesmo para a máquina considerada sadia, há certas não homogeneidades ou faltas incipientes com níveis desprezíveis.

A geração destes dados pode ser obtida por meio do modelo analítico da indução magnética no entreferro, como proposto por Santos (2021). Neste trabalho, considera-se que a forma de onda da indução magnética no entreferro é definida por

$$B(t) = \mathcal{F}_{mm}(t)\mathcal{P}(t) \quad (5)$$

onde  $\mathcal{F}_{mm}(t)$  é a função que representa a força magnetomotriz proveniente do rotor e  $\mathcal{P}(t)$  é a função que caracteriza a densidade de permeância magnética ao longo do entreferro. A função  $\mathcal{P}(t)$  é composta por uma parcela fixa associada à espessura média do entreferro e uma parcela variável em função do número de ranhuras da máquina. A multiplicação destas duas funções no domínio do tempo, o equivalente a uma convolução no domínio da frequência, descreve uma modulação em amplitude, onde a forma de onda da função  $\mathcal{P}(t)$  é o sinal portador e a forma de onda da função  $\mathcal{F}_{mm}(t)$  é o sinal modulante (Aurich, 2022; Santos, 2021).

O modelo descrito por (5) foi implementado computacionalmente em um simulador desenvolvido no *software* LabVIEW da empresa *National Instruments* que, além de processar o cálculo da forma de onda da indução magnética do entreferro, realiza a análise em frequência do sinal obtido, rastreando as raias espectrais de interesse e fornecendo a amplitude das componentes harmônicas rastreadas. Este processo é repetido de forma interativa para gerar diversos vetores contendo formas de onda da indução magnética e fornecer como saída o histórico de amplitudes das componentes harmônicas de interesse para a detecção de faltas. Este simulador foi desenvolvido em um Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação (Aurich, 2022), sob orientação do autor dessa tese.

Neste simulador, tem-se como entradas as configurações do gerador síncrono, da falta que se deseja investigar e do ruído, além de parâmetros de processamento das variáveis e geração dos históricos de amplitudes.

A configuração da máquina é realizada por meio da definição da frequência de operação, número de polos e número de ranhuras. As pequenas assimetrias associadas aos polos e ranhuras, necessárias para a obtenção numérica da frequência fundamental mecânica e suas componentes harmônicas (Santos, 2021), são definidas de forma automática por meio da geração de números aleatórios associados às funções de densidade de probabilidade dos parâmetros dos polos e ranhuras. Estes parâmetros são utilizados para o cômputo de  $\mathcal{F}_{mm}(t)$  e de  $\mathcal{P}(t)$ , que geram os vetores contendo a forma de onda da indução magnética (Aurich, 2022).

A simulação da imposição de faltas deve ser configurada para realizar a alteração de parâmetros das funções  $\mathcal{F}_{mm}(t)$  e  $\mathcal{P}(t)$ . Para simulação de faltas de rotor é alterado um semiciclo da  $\mathcal{F}_{mm}(t)$  e para faltas de estator é alterado um semiciclo da função  $\mathcal{P}(t)$ . Estas alterações são impostas de forma gradual por meio de uma função sigmoide, para caracterizar um período de evolução da falta.

Por fim, a simulação de ruído pode ser configurada por meio da adição de diferentes tipos de ruído na geração das formas de onda da indução magnética. Uma possibilidade é a adição de ruído na frequência de operação do GS, fazendo o sinal variar senoidalmente em torno do valor nominal de velocidade no cômputo de  $B(t)$ . Com isso é possível simular, de forma parcial, pequenas variações de velocidade de uma máquina real. Uma segunda possibilidade é a adição de um ruído de fundo diretamente ao sinal  $B(t)$ , simulando o ruído sempre presente na medição de campos magnéticos externos com sensores de campo por indução.

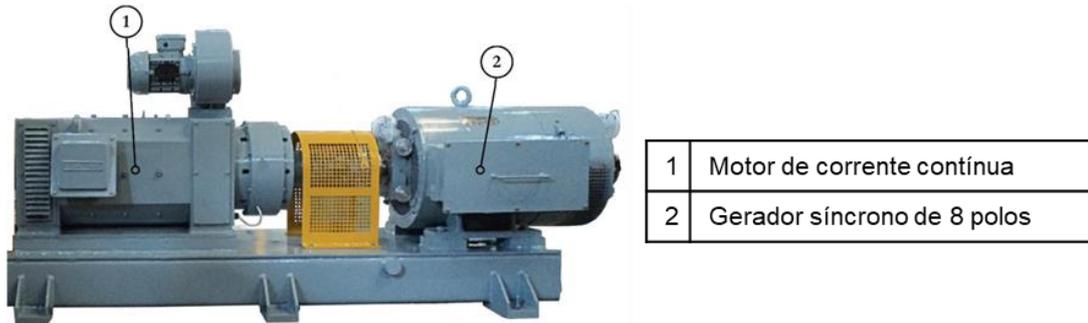
Este simulador foi utilizado para geração de históricos de amplitudes referentes a um GS de 8 polos, 72 ranhuras e operando em 60 Hz, com frequência fundamental mecânica de 15 Hz (simulação numérica do GS da bancada do laboratório, onde foram obtidos resultados de ensaios conforme apresentado adiante). Os históricos abrangem 134 harmônicas da  $f_m$ , ou seja, podem ser monitoradas componentes harmônicas até a frequência de 2025 Hz. Foram simuladas faltas de estator e rotor, de maneira gradual, sem ruído, com adição de ruído em frequência e ruído aleatório. Os históricos de amplitudes obtidos são apresentados no Capítulo 7 e utilizados na avaliação das técnicas analíticas de detecção de anomalias em séries temporais.

### 3.3.2 Dados experimentais com imposição controlada de faltas em um GS

Um gerador síncrono de 10 kVA, 8 polos (salientes) e 72 ranhuras, pertencente à bancada apresentada na Figura 11, foi utilizado para a realização de ensaios experimentais e medição de sinais do campo magnético externo. Este GS tem como máquina primária um motor de corrente contínua e é parte de uma bancada de ensaios customizada que permite a imposição controlada de diferentes tipos de faltas. Este conjunto conta com um sincronoscópio que permite operar o GS em sincronismo com a rede elétrica comercial, aproximando as características de

operação desta máquina com a dos GSs operando em plantas de geração de energia elétrica.

Figura 11. Bancada experimental para imposição controlada de faltas em geradores síncronos.



Fonte: Adaptada de Rigoni (2014).

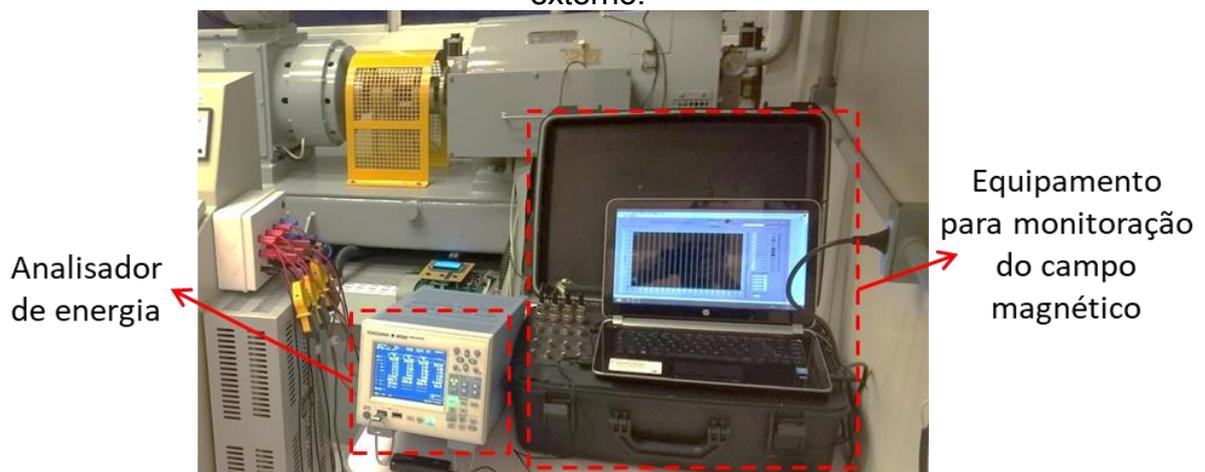
Este GS foi projetado com conexões internas, denominadas de tap's, que permitem a imposição de faltas de curto-circuito ou a retirada de espiras de um polo do estator em três graus de severidade, podendo-se remover ou curto-circuitar 16,7%, 50% ou 100% das espiras de um polo de cada uma das três fases. A falta de retirada de espiras pode ser aplicada também no rotor, por meio da remoção de 20%, 50% ou 100% das espiras de um polo. A imposição de falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator é possível por meio de um tap que chaveia uma espira curto-circuitada que enlaça uma seção do pacote estatórico. Estas faltas podem ser impostas de maneira *online*, ou seja, com o gerador síncrono em operação, por meio de um dispositivo projetado para realizar o fechamento e abertura destes tap's por meio de comandos do operador. Esta estratégia possibilita a obtenção de históricos de amplitude de forma contínua, sem a necessidade de parada da máquina, permitindo a avaliação exclusiva do efeito da falta sobre a assinatura magnética da máquina.

Além destas faltas, o GS possui conectores removíveis para o fechamento ou abertura do enrolamento amortecedor e permite a imposição de faltas de natureza mecânica, como introdução de excentricidade ou desbalanceamento mecânico. Estas faltas necessitam de parada do GS para sua imposição, podendo causar uma descontinuidade no histórico de amplitudes observado: mesmo após a máquina voltar a operar na condição com falta ou sem falta, há impossibilidade de que na volta esteja no exato ponto de operação da condição anterior à parada, seja para a introdução ou para a retirada de um defeito. Como esta manobra pode gerar

perturbações no histórico de amplitudes não associadas com a falta imposta, estas faltas não foram abordadas na avaliação das técnicas analíticas de detecção de alterações exploradas nesta tese.

O campo magnético externo é monitorado por meio de um equipamento que segue a arquitetura apresentada na Figura 4. Este equipamento está programado para realizar aquisições do sinal dos sensores de campo magnético durante 10 segundos com uma frequência de amostragem de 10 kHz. Esta configuração resulta em vetores de tensão amostrados de 100000 pontos com período entre amostras de 100  $\mu$ s. A análise em frequência do sinal resultante fornece um espectro de frequências com resolução espectral ( $df$ ) de 0,1 Hz, adequada para a execução do processo de rastreamento de raias neste GS. O equipamento conta com um *software* desenvolvido no *LabVIEW*, que processa o sinal digitalizado, computando a FFT, executando o processo de rastreamento de raias e armazenando os dados em arquivos com o histórico de amplitudes na forma de séries temporais. Para o desenvolvimento desta tese, foi realizado um *upgrade* neste *software* para permitir a integração do equipamento com um analisador de energia, permitindo a monitoração e o armazenamento do ponto de operação do GS, agregando-o com o histórico de amplitudes das harmônicas de maneira sincronizada. Este equipamento é apresentado na Figura 12.

Figura 12. Equipamento para medição e processamento do campo magnético externo.



Fonte: Autor.

Este sistema permite monitorar a imposição da falta de maneira *online* com o GS operando em sincronismo com a rede elétrica, fornecendo um cenário próximo

ao de GSs operando em plantas de geração de energia elétrica. Assim, este aparato experimental se apresenta como uma importante ferramenta para a validação das técnicas analíticas para detecção de anomalias em séries temporais e da metodologia de monitoração da assinatura magnética desenvolvida nesta tese, além de permitir a observação de padrões de falta para este GS. Mesmo com um cenário otimista para a análise, esta máquina apresenta características que a distingue de GSs comerciais, como a característica linear entre a corrente de campo ( $I_f$ ) e a tensão interna induzida da máquina ( $E_a$ ). Esta característica evidencia um efeito praticamente nulo da saturação do circuito magnético, característica causada pelo entreferro relativamente grande projetado de maneira a permitir o deslocamento vertical do eixo para a simulação de faltas de excentricidade. Com isso, as características e os padrões de faltas observados por meio da análise do histórico de amplitudes do campo magnético externo nestes ensaios não abrangem, significativamente, efeitos de saturação.

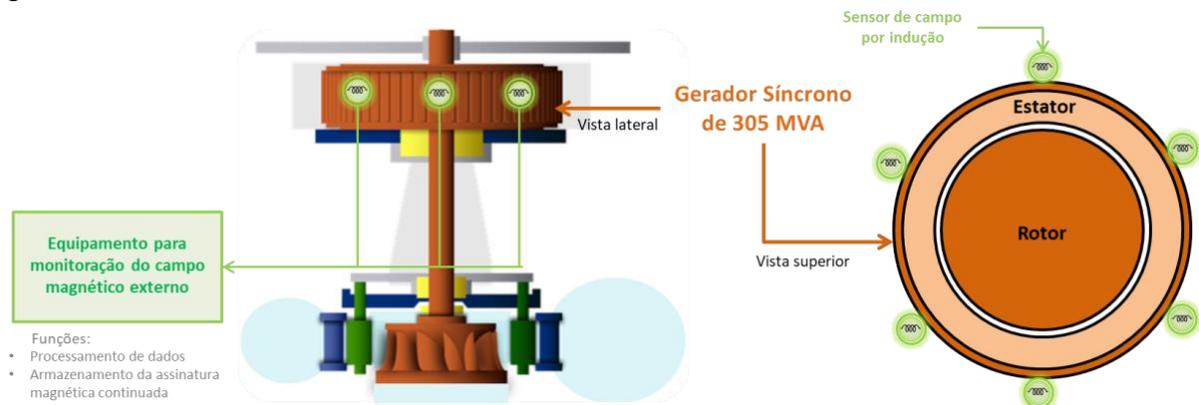
### 3.3.3 Dados de equipamento instalado em uma usina hidrelétrica

Uma terceira fonte de dados disponíveis para análise é composta por um equipamento instalado na usina hidrelétrica de Itá no GS de 305 MVA de eixo vertical, tensão de 16 kV e frequência de 60 Hz, sendo sua máquina primária uma turbina Francis. Este equipamento segue a arquitetura geral apresentada na Figura 4 e tem sua especificação detalhada por Santos (2016) e Freitas *et al.* (2019), sendo desenvolvido no projeto de P&D ANEEL PD-0403-0033/2012, intitulado “Desenvolvimento de um equipamento para detecção de falhas em geradores síncronos através do campo magnético externo”, realizado entre a Engie Brasil Energia, Itá Energética S.A. e USFC. Este equipamento e muitos dos conhecimentos envolvidos em sua concepção proporcionaram a concessão da patente de invenção INPI Nº BR1020150114389, concedida em 2020 (Rigoni *et al.*, 2020).

A arquitetura de instalação deste equipamento, apresentada na Figura 13, está programado para realizar aquisições de 6 sensores de campo magnético por indução durante 6,25 segundos com uma frequência de amostragem de 10 kHz. Esta configuração resulta em vetores de tensão amostrados com 62500 pontos e com período entre amostras de 100  $\mu$ s. A análise em frequência do sinal resultante

fornece um espectro de frequências com resolução espectral de 0,16 Hz, que se mostrou adequada para a execução do processo de rastreamento de raias. A unidade geradora monitorada tem 56 polos, resultando em uma frequência fundamental mecânica de aproximadamente 2,1428 Hz. São monitoradas 467 raias espectrais para cada sensor, contendo a  $f_m$  e suas harmônicas até aproximadamente 1000 Hz.

Figura 13. Equipamento para monitoração do campo magnético externo de geradores síncronos instalado em um GS de eixo vertical em uma usina hidrelétrica.



Fonte: Adaptada de Grillo *et al.* (2022a).

### 3.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas as etapas básicas para medição e condicionamento dos sinais provenientes dos sensores de campo magnético externo, assim como o processamento destes dados para formação dos históricos de amplitudes das componentes harmônicas monitoradas para a detecção de falta. Foram apresentadas também as fontes destes dados, que podem ser obtidos por simulação computacional (dados sintéticos), ensaios experimentais em uma bancada de ensaios customizada para imposição controlada de faltas e dados provenientes de um equipamento instalado em um GS de uma planta de geração hidrelétrica. Estes dados formam os *datasets* a serem avaliados para fins de monitoração da condição da máquina, e utilizados para validar a metodologia de monitoração apresentada nessa tese. No capítulo seguinte, métodos analíticos de detecção de alterações (ou anomalias) são propostos para avaliar estes conjuntos de dados.

## 4 FERRAMENTAS PARA ANÁLISE DE TENDÊNCIA EM SÉRIES TEMPORAIS

A assinatura magnética continuada da máquina formada pelo histórico de amplitudes de cada componente harmônica da  $f_m$  é armazenada na forma de uma série temporal, ou seja, as observações desta grandeza são armazenadas de forma periódica ao longo do tempo. Desta maneira, pode-se aplicar técnicas estatísticas já estabelecidas para caracterizar este tipo de conjunto de dados. A abordagem inicial é realizada considerando períodos em que o GS opera em condição próxima a de regime permanente, de modo que as séries temporais avaliadas sejam estacionárias e que seja possível utilizar conceitos de estacionariedade para identificar eventos que gerem anomalias no histórico de amplitudes.

Diante disso, este capítulo apresenta de maneira concisa as premissas básicas utilizadas para avaliação dos históricos de amplitudes, bem como as ferramentas estatísticas utilizadas para detecção de anomalias nas séries temporais e para avaliar a correlação entre as séries temporais de interesse.

### 4.1 TEORIA BASE PARA APLICAÇÃO

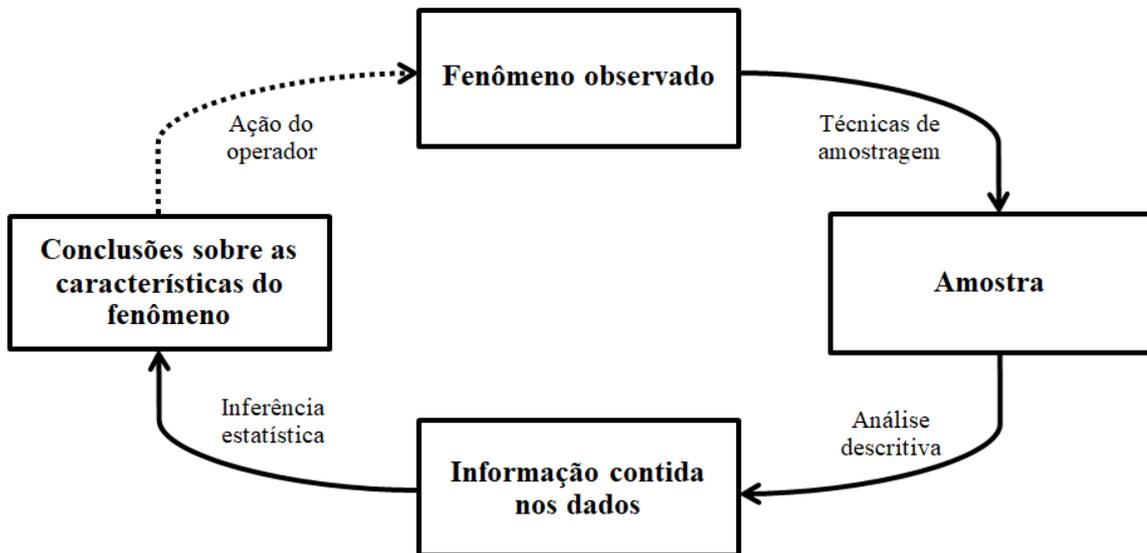
A estratégia inicial para avaliar as características das séries temporais monitoradas é a aplicação de técnicas analíticas baseadas em indicadores estatísticos. Nesta seção alguns conceitos estatísticos são apresentados para referenciar estas aplicações.

#### 4.1.1 Inferência Estatística

O processo que utiliza uma pequena quantidade de indicadores estatísticos para caracterizar o comportamento de um grande conjunto de dados a partir de valores amostrais é denominado inferência estatística. O fluxograma apresentado na Figura 14 retrata a arquitetura deste processo. O fenômeno observado é amostrado ao longo do tempo e a série temporal originada neste processo é avaliada por meio de indicadores estatísticos (análise descritiva) para extrair as informações contidas no conjunto de dados. A partir da interpretação destes indicadores é possível inferir as características da série temporal analisada, permitindo avaliar a condição do

fenômeno observado e prever seu comportamento futuro dentro da condição avaliada.

Figura 14. Fluxograma do processo de inferência estatística.



Fonte: Autor.

Como resposta deste processo, tem-se o levantamento das características da série temporal monitorada e a possibilidade de atuar sobre o processo diante de anomalias identificadas durante a monitoração do fenômeno.

A análise da amostra é realizada por meio de estatística descritiva, que se presta a caracterizar um conjunto de dados quanto à sua posição e dispersão, de maneira a organizar e sintetizar as características deste conjunto para uma melhor avaliação. As medidas de posição, ou medidas de tendência central, são medidas que indicam a posição típica de uma série de dados, representando e quantificando a tendência desses dados a se agruparem em torno de valores centrais. Como medidas de posição, pode-se citar a média aritmética e as separatrizes (mediana, quartis, decis e percentis). As medidas de dispersão são parâmetros estatísticos que caracterizam o grau de variabilidade ou dispersão do conjunto de dados, podendo-se citar a amplitude (ou *range*), a variância, o desvio padrão, o coeficiente de variação e a amplitude interquartílica como indicadores básicos. Juntas, as medidas de posição e dispersão fornecem a primeira descrição estatística da série temporal observada no processo de inferência estatística (Bussab; Morettin, 2017).

Na presente aplicação, o processo de inferência estatística é utilizado para avaliar a estacionariedade do fenômeno em uma condição específica, ou seja, avaliar a estacionariedade das séries temporais compostas pela amplitude de uma componente harmônica ao longo do tempo para uma determinada condição de operação do gerador síncrono.

#### 4.1.2 Estacionariedade de séries temporais

A estacionariedade de séries numéricas pode ser caracterizada por indicadores estatísticos de posição e de dispersão. Em geral, variáveis estacionárias tendem a permanecer com estes indicadores aproximadamente constantes. Nestas séries temporais, a alteração destes indicadores pode indicar uma mudança da condição do sistema, que pode migrar de uma condição estável para outra condição também estável. Este fenômeno é frequente na análise das amplitudes de harmônicas do campo magnético externo, que se alteram com a variação do ponto de operação do GS.

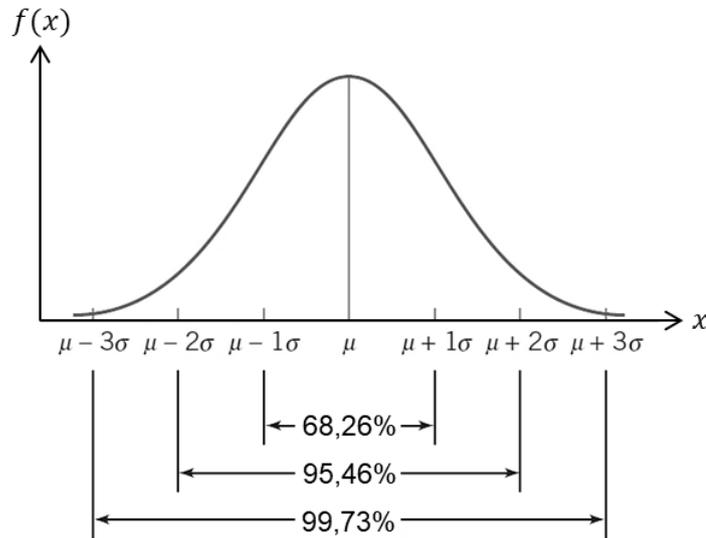
Para fins de monitoração da série temporal, os indicadores de posição e de dispersão podem ser utilizados para prever a região de ocorrência de amostras futuras desta série, permitindo monitorar a estacionariedade dela ao longo do tempo e detectar alterações de condição. Para esta finalidade, é comum o uso da distribuição normal e suas propriedades para caracterizar a região de confiança da variável monitorada.

A distribuição normal ou gaussiana é provavelmente a distribuição de probabilidades mais importante na análise estatística, visto que uma grande quantidade de fenômenos naturais tem distribuição normal. Isso permite que tais fenômenos sejam avaliados utilizando as propriedades já bem estabelecidas para esta distribuição, com boa precisão. Se uma variável genérica  $x$  pode ser aproximada por uma distribuição normal, pode-se utilizar a notação  $x \sim N(\mu, \sigma)$ , onde  $\mu$  é a média aritmética e  $\sigma$  é o desvio padrão de  $x$ . A distribuição normal de uma variável  $x$  é definida pela função densidade de probabilidade definida por

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2} \quad (6)$$

O formato visual de uma distribuição normal é uma curva simétrica ao redor da média  $\mu$ , com formato de sino, como mostra a Figura 15.

Figura 15. Distribuição normal e interpretação de seu desvio padrão.

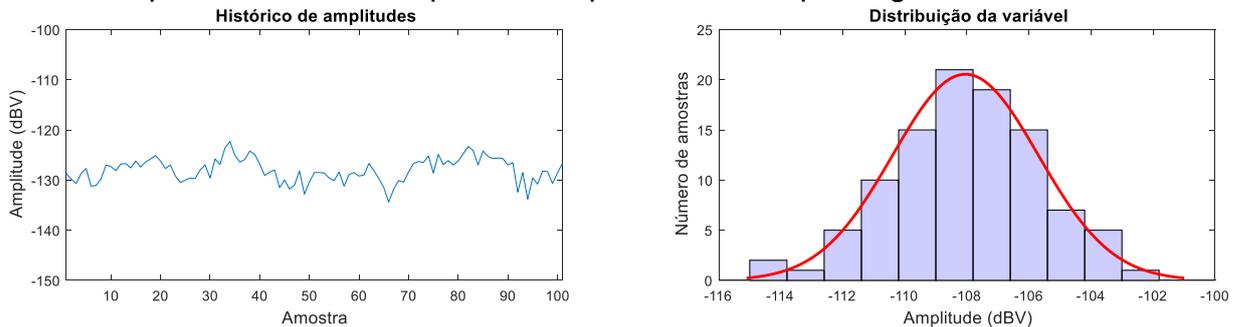


Fonte: Adaptada de Montgomery (2019).

Para uma série temporal estacionária com distribuição normal, a tendência é que as amostras se concentrem ao redor da média, diminuindo a probabilidade de ocorrência à medida que se afasta de  $\mu$ . De maneira complementar, a interpretação do desvio padrão em uma distribuição normal é representada na Figura 15 e é uma propriedade útil para a detecção de alterações e rejeição de valores discrepantes (*outliers*) em séries temporais estacionárias. Se a variável apresentar distribuição normal, aproximadamente 68,26% dos dados estarão entre os limites definidos pela média mais ou menos um desvio padrão ( $\mu \pm 1\sigma$ ), aproximadamente 95,46% dos dados estarão no intervalo  $\mu \pm 2\sigma$  e aproximadamente 99,73% dos dados estarão no intervalo  $\mu \pm 3\sigma$ . Esses limites de probabilidade podem também ser usados para prever a região de ocorrência de amostras futuras obtidas para esta variável (Montgomery, 2019).

A distribuição das amostras de séries temporais estacionárias pode ser aproximada por uma distribuição normal. A Figura 16 apresenta uma série temporal composta pelo histórico de 100 amostras de amplitude de uma componente harmônica da  $f_m$ , obtida de medições do campo magnético externo, com comportamento estacionário e a distribuição de ocorrências das amostras. Nota-se a proximidade a uma distribuição normal.

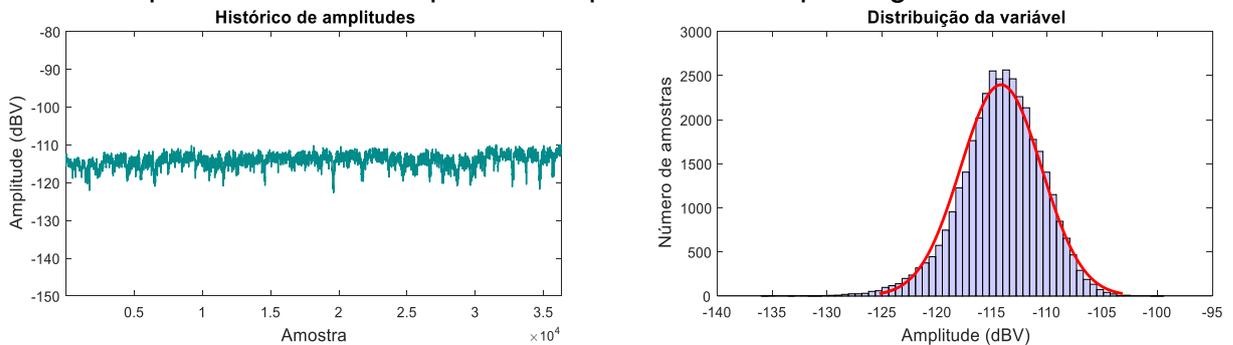
Figura 16. Distribuição de uma série temporal composta por 100 amostras de amplitude de uma componente espectral do campo magnético externo.



Fonte: Autor.

A Figura 17 apresenta uma série temporal estacionária composta pelo histórico de 37000 amostras de amplitudes de uma componente harmônica da  $f_m$  obtida por meio de medidas do campo magnético externo, observada por aproximadamente oito meses em um gerador síncrono em operação contínua. Observa-se a aderência da distribuição desta série temporal com a curva de uma distribuição normal ajustada aos dados desta amostra.

Figura 17. Distribuição de uma série temporal composta por 37000 amostras de amplitude de uma componente espectral do campo magnético externo.



Fonte: Autor.

Esta aproximação possibilita a utilização de várias propriedades estatísticas associadas à distribuição normal e permite a aplicação do conceito de gráficos de controle, que é uma estratégia básica e eficiente para monitorar a estacionariedade de variáveis e de processos, como apresentado a seguir.

## 4.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS

A estratégia para monitorar a assinatura magnética continuada do GS, obtida por meio da medição do campo magnético externo, é avaliar a

estacionariedade do histórico de cada componente harmônica da  $f_m$  de maneira independente, detectando anomalias nas séries temporais, para posteriormente avaliar suas causas. Nesta seção são apresentados alguns métodos estatísticos para detecção de anomalias em séries temporais, que são utilizados posteriormente na proposta da metodologia monitoração periódica da assinatura magnética continuada do GS (Grillo *et al.*, 2022a). Optou-se pela utilização de técnicas de detecção de anomalias de fácil implementação computacional para facilitar sua aplicação junto a equipamentos de monitoração que possuem capacidade de processamento limitada, principalmente para agregar como ferramenta em um equipamento comercial (Freitas *et al.*, 2019; Grillo *et al.*, 2022b) .

#### **4.2.1 Aplicação da técnica de gráficos de controle**

O gráfico de controle é uma técnica utilizada para monitorar variações nas características de um processo com base na própria variabilidade esperada para ele. Os dados representados em um gráfico de controle podem formar a base para a melhoria do processo, pois revelam quando este se altera e necessita de intervenção. Considerando a amplitude de cada componente harmônica de interesse como uma variável característica do processo monitorado, os gráficos de controle do processo são denominados por gráficos de controle para variáveis (Montgomery, 2019).

Em termos de estrutura, os gráficos de controle são definidos por uma variável, ou estatística, monitorada por meio de limites que controlam a estacionariedade de seu valor médio e sua variabilidade, permitindo a detecção de anomalias ou mudanças de condição de estacionariedade, como a alteração do valor médio do processo. Estes limites de controle devem ser definidos com base nas próprias características da distribuição da variável monitorada em uma condição estacionária de referência (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2009).

A teoria de gráfico de controle permite a automatização da monitoração de múltiplas séries temporais, permitindo a geração de alarmes diante de violações nos critérios de estacionariedade de cada série de forma individual ou conjunta. Esta é uma característica muito útil para a presente aplicação, onde se busca identificar variações do valor médio ou de tendência da amplitude de cada componente

harmônica do campo magnético externo, de maneira individual, que apresentam amplitudes e características de variabilidade distintas entre si.

A teoria sobre o método de monitoração de processos com gráficos de controle é amplamente utilizada e difundida na literatura, principalmente na área de controle estatístico de processos (Montgomery, 2019). A norma ISO 7870-2:2013 apresenta diversos conceitos e especificações para a aplicação de gráficos de controle na monitoração de processos e de variáveis.

#### 4.2.2 Gráfico de controle Shewhart

Um gráfico de controle de Shewhart, ou gráfico de controle  $3\sigma$ , possibilita a avaliação de uma série temporal ao longo do tempo em função de três linhas horizontais paralelas definidas a partir de um conjunto de amostras em condição estacionária, tomadas como referência para esta série. A primeira linha, denominada linha média central (*LMC*) representa o valor médio ( $\mu$ ) do conjunto de amostras de referência. As duas outras linhas são denominadas de limite inferior de controle (*LIC*) e limite superior de controle (*LSC*), e são localizadas a uma distância de  $k$  desvios padrões ( $k\sigma$ ) da linha média central. A detecção de alteração do valor médio da série temporal, ou mudança de tendência, é identificada a partir da violação persistente de um dos limites de controle por amostras consecutivas ao longo do tempo.

Analiticamente, para uma região de referência da série temporal monitorada  $x$  definida por  $n$  amostras, as linhas que definem o gráfico de controle podem ser definidas por

$$LMC = \mu = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (7)$$

$$LSC = \mu + k\sigma = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) + k \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ x_i - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \right]^2} \quad (8)$$

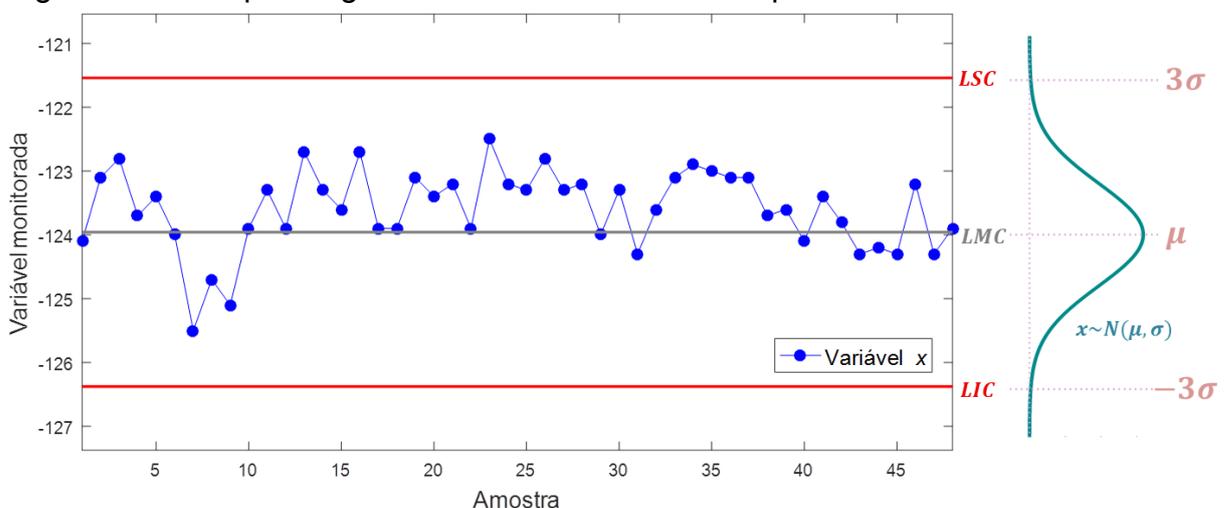
$$LIC = \mu - k\sigma = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n x_i \right) - k \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ x_i - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \right) \right]^2} \quad (9)$$

O intervalo entre os dois limites de controle é denominado região de controle ou intervalo de confiança. O parâmetro  $k$ , que define a distância dos limites de controle em relação à  $LMC$ , pode ser configurado de acordo com a amplitude de alteração que se deseja identificar. É comum atribuir o valor 3 a este parâmetro, para o intervalo de confiança abranger aproximadamente 99,7% das amostras em uma condição estacionária, assumindo que a região de referência pode ser representada por uma distribuição normal como apresentado na Figura 15. Para séries temporais com grande variabilidade ou não estacionárias, valores superiores do parâmetro  $k$  podem ser atribuídos para detectar alterações no valor médio superiores a  $3\sigma$ .

A utilização de limites adaptativos para a variável monitorada com base em suas próprias características de variabilidade torna a definição dos limites de controle mais robusta para avaliar o sistema monitorado em diferentes condições. Além disso, permite a avaliação das variáveis individualmente em um sistema multivariado, adaptando os limites para as características individuais de cada variável. O uso de limites adaptativos tem grande vantagem para a análise de sistemas multivariados, apresentando eficiência superior com relação à especificação de limites fixos para este caso (Montgomery, 2019).

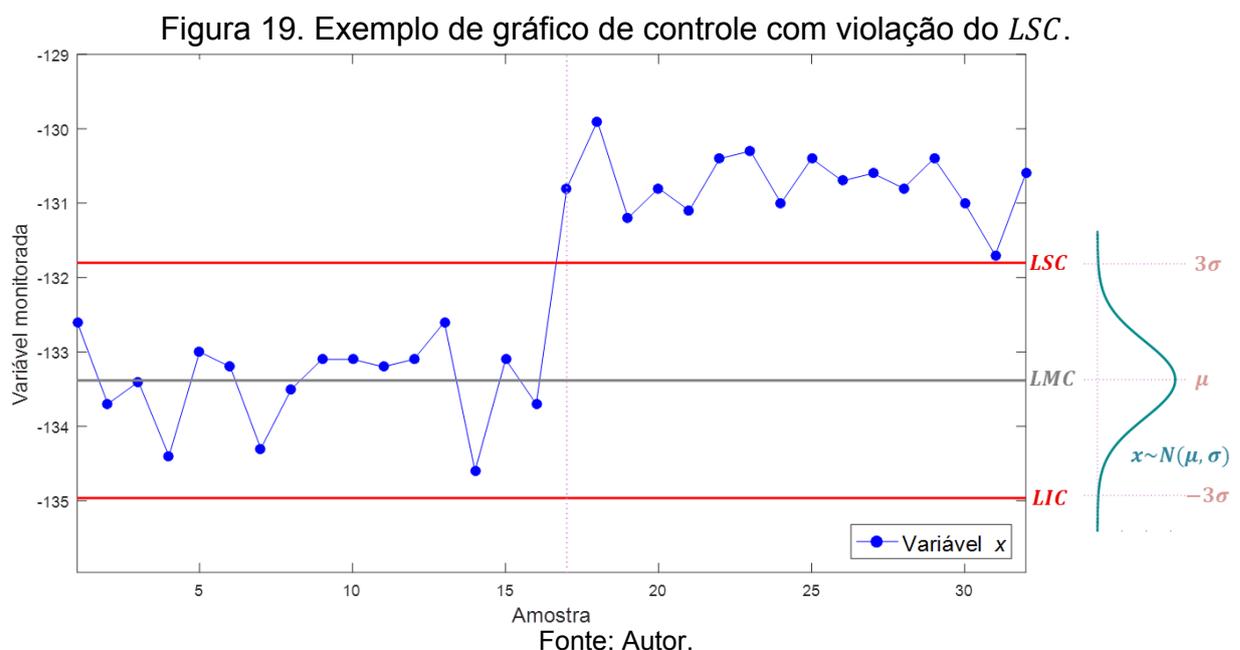
Estes conceitos podem ser ilustrados pela Figura 18, onde são adotados limites de controle configurados a uma distância de  $3\sigma$  do valor médio da série temporal que representa as medidas da variável monitorada.

Figura 18. Exemplo de gráfico de controle com  $k = 3$  para uma variável monitorada.



A interpretação de um gráfico de controle pode ser realizada de maneira visual. Se a variável monitorada apresentar seu valor medido dentro da região delimitada pelos limites de controle, conclui-se que o processo está estacionário ou a variável está mantendo seu valor médio sem alteração de tendência. Por outro lado, se um valor medido desta variável estiver fora da região de controle, então o processo deve permanecer em alerta. Se apenas uma medida aleatória apresentar esta violação, este ponto pode ser considerado um *outlier* e o processo pode continuar monitorando a variável sem alertas. Se uma sequência de medidas consecutivas apresentarem essa violação, pode-se constatar que o sistema está em uma condição não estacionária e um alerta deve ser gerado. Neste caso, pode-se detectar uma alteração de tendência ou no valor médio da variável.

Dessa maneira, a variável monitorada na Figura 18, que é a amplitude de uma componente harmônica do campo magnético externo do GS de 10 kVA, apresenta comportamento estacionário no período analisado no gráfico, já que não há violação recorrente dos limites de controle. Em contrapartida, a Figura 19 mostra uma variável cuja amplitude apresenta comportamento estacionário nos primeiros instantes da análise, mas apresenta violação recorrente do *LSC* a partir de determinado instante, indicando uma alteração do seu valor médio.



De fato, a variável tomada como exemplo na Figura 19 é também a amplitude de uma harmônica do campo magnético de um gerador síncrono obtida

por meio de ensaios na bancada experimental no GS de 10 kVA, onde foi imposta uma falta de curto-circuito em um enrolamento do estator da máquina, no intervalo entre a tomada das amostras 16 e 17. Neste caso, a alteração no valor médio pode ser constatada visualmente pelo gráfico de controle e pode ser gerado também um alerta automático por meio de um software de monitoramento que implemente esta técnica de detecção de anomalias.

Os gráficos de controle Shewhart são eficientes para detecção de alterações superiores a 2 desvios padrões ( $2\sigma$ ). Para um problema multivariável, séries temporais com diferentes características de variabilidade e de estacionariedade podem ser analisadas conjuntamente, de modo que limites mais amplos podem ser utilizados para detectar grandes alterações dentro deste conjunto, evitando falsos positivos. Estes conceitos apresentados sobre gráficos de controle têm aplicabilidade tanto em sistemas supervisórios de monitoração, com análise gráfica de variáveis específicas, quanto para a geração de alarmes em sistemas que exijam a monitoração contínua de inúmeras variáveis de maneira simultânea. Assim, sua aplicação se mostra interessante para a monitoração da assinatura magnética continuada de GSs.

### 4.2.3 Gráfico de controle CUSUM

Os gráficos de controle da soma cumulativa (CUSUM, do inglês *Cumulative Sum*) expressam as somas cumulativas dos desvios das amostras com relação a uma média de referência, tomada em uma região onde a série temporal se encontre na condição estacionária. As somas cumulativas incorporam toda a informação na sequência dos valores da amostra, memorizando os deslocamentos anteriores. Este fato torna o gráfico CUSUM mais sensível a pequenas alterações da média da variável como, por exemplo, alterações menores que  $2\sigma$ , onde os gráficos de controle de Shewhart não apresentam bom desempenho (Montgomery, 2019).

Dado uma variável  $x$  com média de referência  $\mu_0$ , que será a referência de estacionariedade desta variável, a estatística que proporciona a observação do processo de soma cumulativa pode ser expressa por

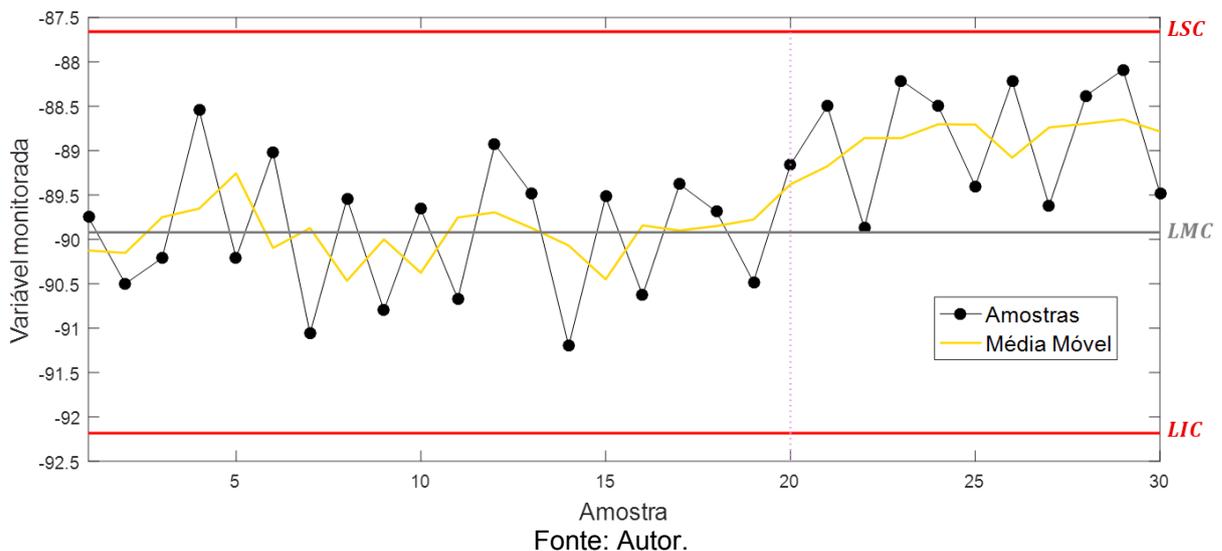
$$C_i = \sum_{j=1}^i (x_j - \mu_0) = (x_i - \mu_0) + C_{i-1} \quad (10)$$

Neste caso, a estatística  $C_i$  é a soma acumulada dos desvios à  $\mu_0$  até a  $i$ -ésima amostra. Para o cômputo de  $C_i$ , a condição inicial  $C_0 = 0$  é assumida para a primeira amostra avaliada.

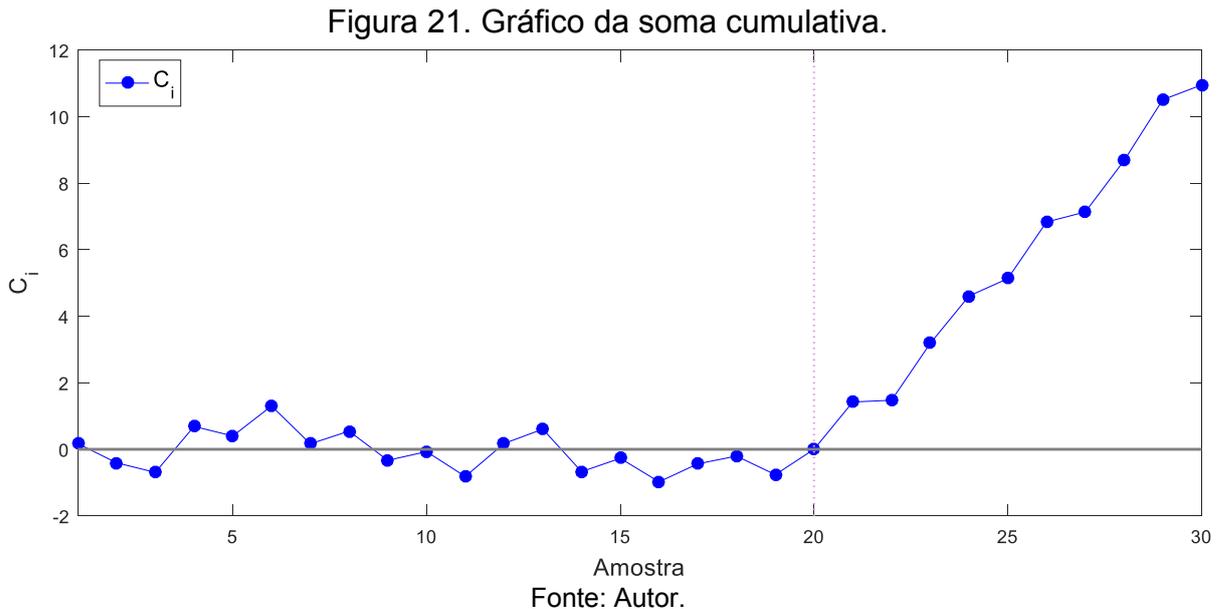
Para a estatística  $C_i$  existem três padrões possíveis de se observar. Se a variável se mantiver estacionária com a média aproximadamente constante, os desvios positivos e negativos devem se anular, não sendo observadas tendências significativas na série de somas cumulativas. Se ocorrer um aumento da média da variável, uma sequência de desvios positivos será observada a partir desta alteração, de modo que a estatística  $C_i$  apresentará uma tendência de crescimento. Por outro lado, se ocorrer uma diminuição da média da variável, os desvios observados serão negativos e uma tendência decrescente será observada em  $C_i$ .

Como exemplo de aplicação, a variável monitorada apresentada na Figura 20, composta pelo histórico de amplitudes de uma harmônica do campo magnético externo no GS de 10 kVA, tem amostras estacionárias em torno de um valor médio de referência ( $LMC$ ) nas vinte primeiras amostras com um desvio padrão de aproximadamente 0,7. A partir da amostra 20, há um deslocamento do valor médio da variável, mantendo o desvio padrão aproximadamente igual ao primeiro período ( $\sigma \cong 0,7$ ). A pequena variação do valor médio, que pode ser observada também pela média móvel das amostras, foi de aproximadamente  $1,5\sigma$ , não sendo detectada pelo gráfico de controle Shewhart com limites a  $3\sigma$ .

Figura 20. Variável com pequena alteração ( $1,5\sigma$ ) do valor médio em um gráfico de controle  $3\sigma$ .



Para a variável apresentada na Figura 20, o gráfico de somas cumulativas, seguindo a definição em (10), é apresentado na Figura 21, onde se observa a estacionariedade da estatística  $C_i$  em torno de zero nas vinte primeiras amostras e uma tendência crescente após este período, indicando a alteração do valor médio da variável observada.



Para montar um gráfico de controle eficiente com o conceito de soma cumulativa, com a definição de limites de controle, é utilizado o processo chamado de CUSUM Tabular: acumulam-se desvios positivos do valor médio em uma estatística  $C_i^+$  e desvios negativos em uma estatística  $C_i^-$ , gerando os chamados CUSUMs unilaterais superior ( $C_i^+$ ) e inferior ( $C_i^-$ ), que são monitorados simultaneamente. Estas duas estatísticas são regidas pelas somas cumulativas definidas por

$$C_i^+ = \max[0, x_i - (\mu_0 + K) + C_{i-1}^+] \quad (11)$$

$$C_i^- = \max[0, (\mu_0 - K) - x_i + C_{i-1}^-] \quad (12)$$

onde  $C_0^+ = C_0^- = 0$  (Montgomery, 2019).

A constante  $K$  é chamada de valor de referência, ou valor de tolerância, e é definida como a metade da diferença entre a média de referência da variável ( $\mu_0$ ) e a média fora de controle que se deseja identificar ( $\mu_1$ ). Essa constante pode ser definida por

$$K = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{2} = \frac{\delta}{2}\sigma \quad (13)$$

Onde a constante  $\delta$  é utilizada caso o grau de alteração, que se deseja identificar, for expresso em unidades de desvio padrão como em

$$\mu_1 = \mu_0 + \delta\sigma \quad (14)$$

sendo  $\delta$  então definido por

$$\delta = \frac{|\mu_1 - \mu_0|}{\sigma} \quad (15)$$

Com relação ao comportamento dos CUSUMs unilaterais, o aumento da estatística  $C_i^+$  indica aumento da média da variável e o aumento da estatística  $C_i^-$  indica a diminuição da média, ambas acumulando desvios da média de referência ( $\mu_0$ ) maiores que  $K$ . As duas estatísticas são limitadas a valores positivos ou nulos para evitar seu decréscimo indefinido. Para fins de monitoração da variável, é utilizado um intervalo de decisão  $H$  definido por

$$H = h\sigma \quad (16)$$

de maneira que se algum dos CUSUMs unilaterais exceder esse limite é constatado a alteração do valor médio desta variável.

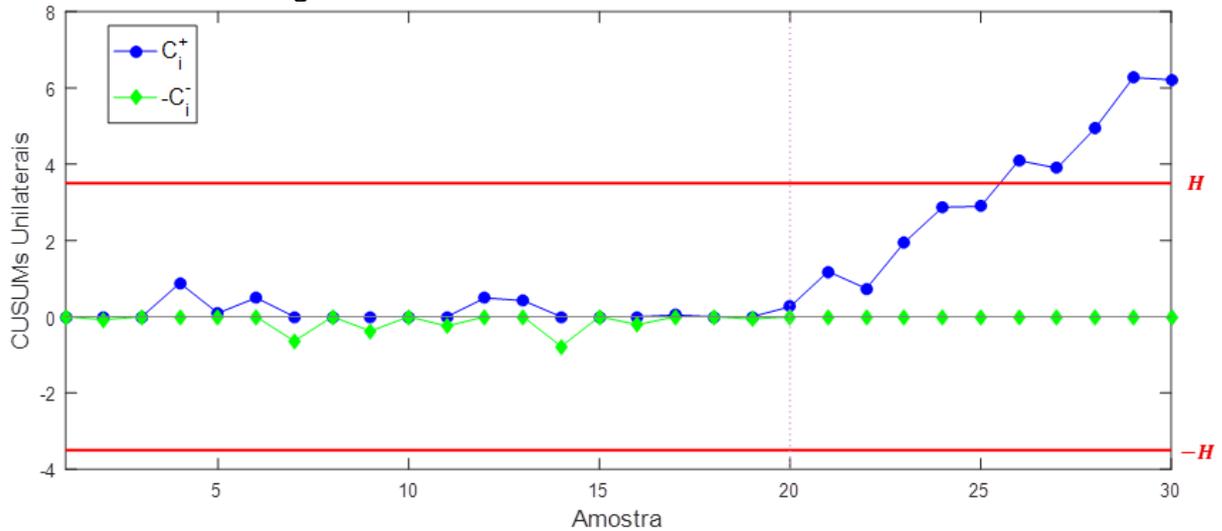
A constante  $h$  pode ser definida de acordo com as características do processo que se está monitorando. Em geral, recomenda-se a utilização de  $h = 5$ , que apresenta resultados positivos para variações do valor médio na faixa  $0,5\sigma \leq |\mu_1 - \mu_0| \leq 1,5\sigma$  (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2009).

Para visualizar o comportamento deste método, as estatísticas  $C_i^+$  e  $C_i^-$  foram calculadas para o conjunto de dados apresentado na Figura 20, correspondente a uma variável com uma pequena alteração em seu valor médio. O desempenho do CUSUM tabular é apresentado na Figura 22, onde os limites de controle  $H$  foram definidos como  $H = \pm 5\sigma$ . Nota-se que os CUSUMs unilaterais oscilam em torno de zero até a amostra vinte, i.e., região onde a variável encontra-se em condição estacionária. A partir da amostra vinte, o CUSUM unilateral superior ( $C_i^+$ ) apresenta uma tendência crescente, violando o limite do intervalo de decisão  $H$  a partir da amostra 26.

Para a monitoração de várias variáveis simultaneamente, que caracterizem um mesmo processo, a busca por pequenas alterações de amplitude (inferiores a  $2\sigma$ , por exemplo) pode provocar o aumento da incidência de falsos positivos quanto à estacionariedade do processo como um todo, devido a diferentes características

de variabilidade das variáveis deste conjunto. Nesses casos, pode-se configurar o valor de referência  $K$  para encontrar alterações com maiores amplitudes, inicialmente e, posteriormente, investigar alterações de menor amplitude nas variáveis individualmente.

Figura 22. Gráfico de controle CUSUM tabular.



Fonte: Autor.

#### 4.2.4 Gráfico de controle MMEP

O gráfico de controle da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) é um método alternativo ao CUSUM para detecção de alterações do valor médio da variável monitorada, apresentando vantagens em relação ao gráfico de controle de Shewhart na detecção de alterações menores que  $2\sigma$ . Assim como o CUSUM, o gráfico MMEP é um gráfico de controle ponderado no tempo, pois o valor da estatística plotada em um dado instante de tempo incorpora valores de amostras anteriores na forma de uma média ponderada (Montgomery, 2019).

A estatística monitorada pelo gráfico de controle MMEP, chamada  $z_i$ , é definida por

$$z_i = \lambda \sum_{j=0}^{i-1} (1 - \lambda)^j x_{i-j} + (1 - \lambda)^i z_0 \quad (17)$$

para cada amostra  $i$ , onde  $\lambda$  é a constante de ponderação das amostras ( $0 < \lambda \leq 1$ ) e  $x$  é a variável monitorada.

A condição inicial da estatística  $z_i$ , em  $i = 1$ , é a média de referência da variável para a condição analisada ( $z_0 = \mu_0$ ). Pela análise de (17), nota-se que  $z_i$  é uma média ponderada dos valores amostrais anteriores, em que os pesos  $\lambda(1 - \lambda)^j$  decrescem geometricamente de acordo com a distância da amostra atual. Por esta razão, a MMEP é, algumas vezes, denominada média móvel geométrica. A equação (17) pode ser expressa de forma simplificada por meio de

$$z_i = \lambda x_i + (1 - \lambda)z_{i-1} \quad (18)$$

Para especificar um gráfico de controle para a estatística  $z_i$ , deve-se definir limites de controle para monitorar esta nova variável. Se as amostras de referência da variável monitorada  $x$  apresentam variância  $\sigma_0^2$ , a variância da estatística  $z_i$  ( $\sigma_{z_i}^2$ ) é definida por

$$\sigma_{z_i}^2 = \sigma_0^2 \left( \frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}] \quad (19)$$

Os limites de controle para o gráfico MMEP podem ser especificados de forma dinâmica por meio de (19), sendo definidos por

$$LSC_i = \mu_0 + L\sigma_0 \sqrt{\left( \frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (20)$$

$$LMC_i = \mu_0 \quad (21)$$

$$LIC_i = \mu_0 - L\sigma_0 \sqrt{\left( \frac{\lambda}{2 - \lambda} \right) [1 - (1 - \lambda)^{2i}]} \quad (22)$$

para cada amostra  $i$ , onde  $\sigma_0$  é o desvio padrão na região de referência.

Na especificação de (20) e (22), a constante  $L$  define a largura dos limites de controle. Além disso, o termo  $[1 - (1 - \lambda)^{2i}]$  tende a 1 à medida que mais amostras vão sendo avaliadas (à medida que  $i$  aumenta), de modo que durante a monitoração contínua os limites  $LSC$  e  $LIC$  tendem a valores de estado estacionário definidos respectivamente por

$$LSC = \mu_0 + L\sigma_0 \sqrt{\left( \frac{\lambda}{2 - \lambda} \right)} \quad (23)$$

$$LIC = \mu_0 - L\sigma_0 \sqrt{\left( \frac{\lambda}{2 - \lambda} \right)} \quad (24)$$

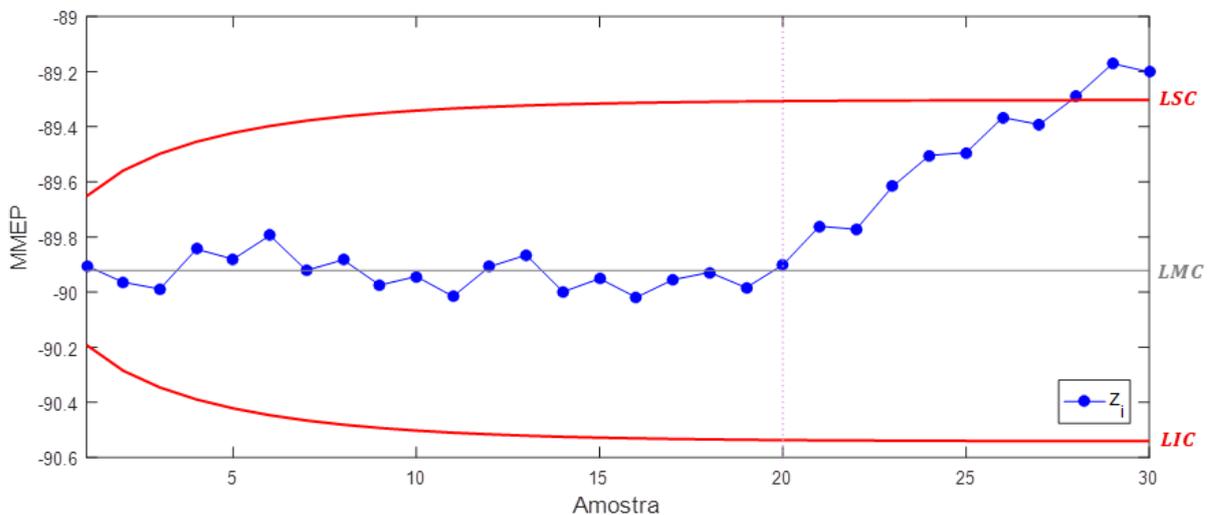
Em geral, recomenda-se utilizar os limites de controle definidos na forma completa em (20) e (22), pois garante maior robustez no início do período de

análise, onde os limites ficam mais próximos à linha média central, facilitando a detecção de alterações nos primeiros instantes de monitoração (Montgomery, 2019).

A configuração deste gráfico de controle é realizada pela escolha dos parâmetros  $\lambda$  e  $L$ . Em geral,  $\lambda$  pode assumir valores no intervalo  $0 \leq \lambda \leq 1$ , de modo que quanto menor o valor de  $\lambda$ , menor é a alteração que o método poderá detectar. Na prática, valores de  $\lambda$  no intervalo  $0,05 \leq \lambda \leq 0,25$  são recomendados para detecção de pequenas alterações. Como extremos, para  $\lambda = 0$  o peso de qualquer amostra é nulo e  $z_i = \mu_0$ . Por outro lado, para  $\lambda = 1$ , as amostras anteriores não têm nenhuma influência na estatística  $z_i$ , de modo que o MMEP apresenta desempenho similar ao gráfico de controle de Shewhart. A constante  $L$  é geralmente fixada em 3 para desempenho similar aos limites  $3\sigma$  apresentados na Figura 15, embora valores maiores ou menores possam ser utilizados, dependendo das características das variáveis analisadas (Montgomery, 2019).

O desempenho deste método é demonstrado por meio da Figura 23, onde a estatística  $z_i$  é calculada para o conjunto de dados apresentado na Figura 20, correspondente a uma variável com uma alteração inferior a  $2\sigma$  em seu valor médio. Os limites de controle foram configurados com  $L = 3$  e  $\lambda = 0,2$ . O comportamento da estatística  $z_i$  é estacionário em torno do valor médio até a amostra 20 e apresenta uma tendência de crescimento após esta amostra, refletindo a pequena alteração do valor médio da variável monitorada neste período. O limite superior de controle é violado após a amostra 28, de modo que a alteração é detectada por este método.

Figura 23. Gráfico de controle MMEP.



Fonte: Autor.

#### 4.2.5 Gráfico de controle baseado na variância móvel

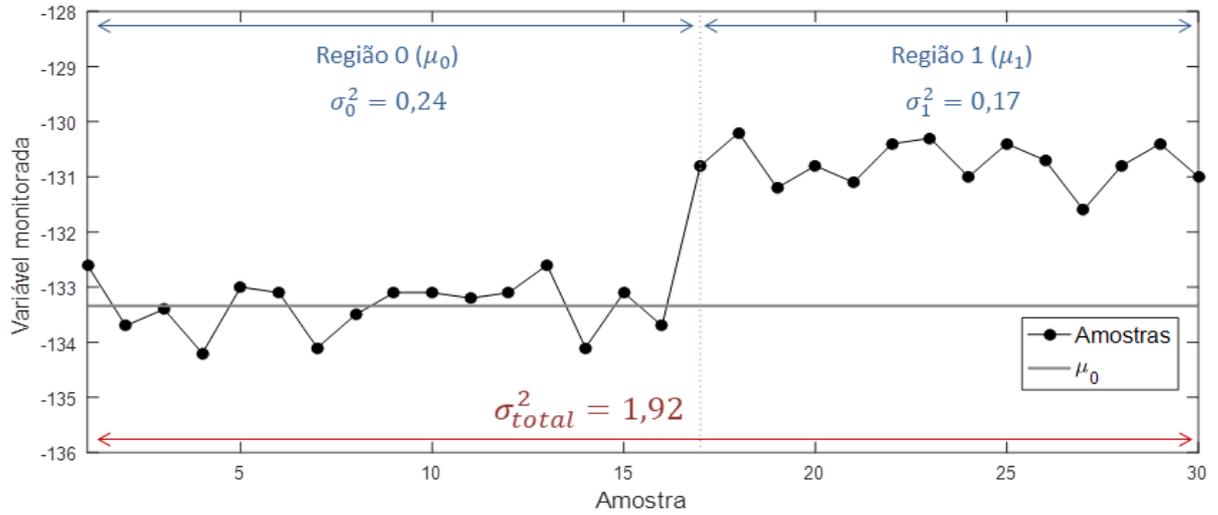
Uma maneira alternativa de detectar a alteração no valor médio de uma variável é observar a variabilidade do conjunto de dados e como esta característica se comporta ao longo do tempo. Uma estatística simples para monitorar a variabilidade de uma série temporal é a variância amostral, definida por

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu_0)^2 \quad (25)$$

que permite calcular a média do desvio quadrático das amostras com relação ao valor médio do conjunto de dados (Montgomery, 2019).

Se a série temporal for estacionária ao longo do tempo, mantendo seu valor médio próximo ao seu valor de referência ( $\mu_0$ ), a variância amostral de segmentos desta série se mantém em uma escala próxima de valores. Por outro lado, se esta série apresentar uma alteração no valor médio, a variância de um conjunto de amostras no entorno do ponto de alteração irá apresentar um valor maior que o inicial, devido à alteração da média do conjunto de dados em (25). Este fenômeno pode ser observado na Figura 24, onde a variável monitorada apresenta alteração do seu valor médio a partir da amostra 17, migrando de uma média  $\mu_0$  na região inicial (Região 0) para uma média  $\mu_1$  na região pós-alteração (Região 1). As variâncias nestas duas regiões ( $\sigma_0^2$  e  $\sigma_1^2$ ), analisadas separadamente, estão em uma escala próxima indicando que a variabilidade da variável se manteve estacionária após a alteração. Por outro lado, a variância do conjunto total de dados, incluindo a região de alteração, está em uma escala cerca de 8 vezes maior do que a variância da região de referência ( $\sigma_{total}^2 = 8\sigma_0^2$ ) o que é reflexo da alteração do valor médio da variável monitorada.

Figura 24. Comportamento da variância de uma variável em diferentes regiões.



A monitoração da variância, para fins de detecção de alterações no valor médio, pode ser realizada por meio de uma estatística móvel deste parâmetro, computada sobre uma janela móvel de  $w$  amostras ao longo do tempo, de maneira similar aos filtros digitais do tipo média móvel. A variância móvel pode então ser computada pela estatística  $\sigma_{M_i}^2$  definida por

$$\sigma_{M_i}^2 = \frac{1}{w-1} \sum_{j=i-w+1}^i \left( x_j - \frac{1}{w} \sum_{k=i-w+1}^i x_k \right)^2 \quad (26)$$

para cada amostra  $i$ , considerando as  $w-1$  amostras anteriores. Se a variável monitorada for estacionária, sua variância móvel irá oscilar dentro de uma faixa definida, já que as amostras estarão distribuídas próximas à média de referência da variável ( $\mu_0$ ). Por outro lado, se ocorrer uma alteração significativa do valor médio da variável, a variância móvel poderá aumentar consideravelmente seu valor no período de transição, pois a janela móvel pode englobar amostras referentes aos dois patamares do valor médio da variável, aumentando a variância dentro deste período.

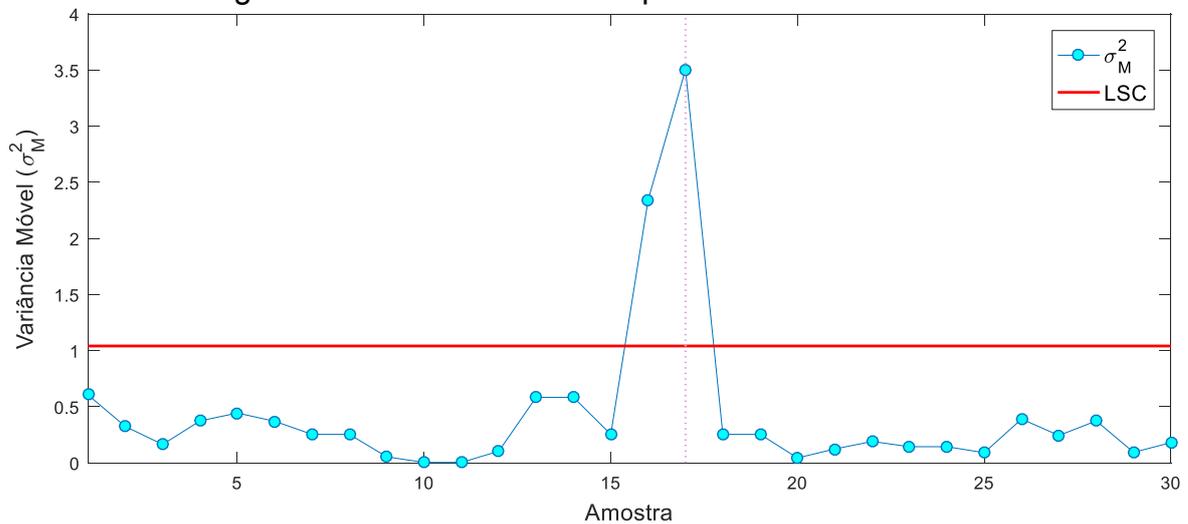
Para formar o gráfico de controle desta estatística, é necessário definir apenas um limite de controle superior ( $LSC$ ), não sendo necessário o limite inferior, já que a variância, por sua definição em (25), resulta em um número real positivo ( $\sigma^2 \in \mathbb{R}_+$ ). A definição do  $LSC$  pode ser realizada por meio de

$$LCS = \frac{1}{n} \left( \sum_{i=1}^n \sigma_{Mi}^2 \right) + v \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ \sigma_{Mi}^2 - \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \sigma_{Mi}^2 \right) \right]^2} \quad (27)$$

de maneira análoga aos gráficos de controle de Shewhart, considerando a própria estatística  $\sigma_M^2$  como variável monitorada e estabelecendo uma região de referência estável de  $n$  amostras para definir este limite. Nesta definição,  $v$  é uma constante que multiplica o desvio padrão da estatística  $\sigma_M^2$ , para definir a região de controle.

O desempenho deste método é representado no exemplo da Figura 25, onde a estatística  $\sigma_M^2$  é calculada para o conjunto de dados apresentado na Figura 24, que contém uma variável com alteração de seu valor médio. A variância móvel tem um comportamento estável, com exceção da região próxima ao ponto onde ocorre a alteração (amostra 17), apresentando um pico indicando a alteração brusca da variância durante a transição do valor médio para o novo patamar. O número de pontos que excedem o limite é função do tempo de transição da alteração e do tamanho da janela móvel ( $w$ ) onde se está calculando a variância.

Figura 25. Gráfico de controle para a variância móvel.



Fonte: Autor.

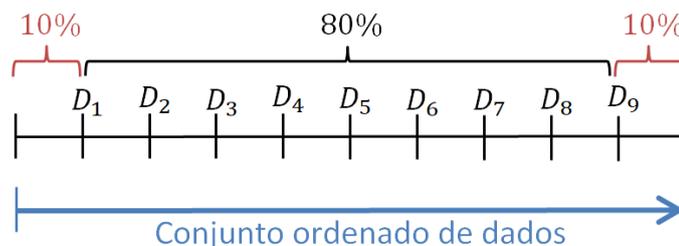
A monitoração da variância móvel é restrita para variáveis estacionárias e presta-se para detecção de grandes alterações de média. Um ponto negativo é a alta sensibilidade à *outliers* presentes no conjunto de amostras avaliadas, que pode gerar falsos alarmes dependendo das características do sinal/grandeza monitorada (Costa; Epprecht; Carpinetti, 2009).

#### 4.2.6 Precisão dos elementos do gráfico de controle

A precisão dos elementos do gráfico de controle e, conseqüentemente, do seu desempenho na monitoração da estacionariedade de séries temporais, está essencialmente ligada à qualidade da região de referência escolhida para caracterizar a estacionariedade da variável. A ocorrência de amostras com valores afastados do valor médio, chamadas de *outliers* ou valores atípicos, pode descaracterizar a região de referência, alterando de forma significativa os indicadores estatísticos utilizados como a média e o desvio padrão, e comprometer o desempenho dos métodos na detecção de anomalias. Para garantir a eficiência da aplicação destas metodologias em sistemas aplicados em ambiente industrial, onde a ocorrência de *outliers* é comum, é necessário filtrar os valores atípicos da região de referência para garantir uma correta caracterização.

A rejeição de *outliers* pode ser realizada por meio de medidas de posição, como as separatrizes (mediana, quartis, decis e percentis). Estas medidas são indicadores de estatística de ordem, ou seja, os dados do conjunto analisado são ordenados em ordem crescente ou decrescente para a realização desta separação. Uma técnica simples é a utilização do intervalo interdecil do conjunto de referência. Os decis são valores que dividem um conjunto de amostras em dez partes iguais. Na Figura 26 os decis são identificados por  $D_1, D_2, D_3 \dots D_9$  e o intervalo interdecil é definido como o intervalo entre  $D_1$  e  $D_9$ , selecionado o conjunto de dados entre o primeiro e o nono decil (80% dos dados) e excluindo 20% das amostras nos extremos do conjunto ordenado, descartando eventuais valores atípicos do conjunto (Bussab; Morettin, 2017).

Figura 26. Intervalo entre o 1° e o 9° decil de um conjunto ordenado de dados.



Fonte: Autor.

Uma segunda técnica pode ser aplicada por meio da rejeição de amostras  $x$  consideradas atípicas no conjunto de dados, como definido em

$$outlier = \begin{cases} x > Q_3 + 1,5IQR \\ x < Q_1 - 1,5IQR \end{cases} \quad (28)$$

onde  $Q_1$  é o primeiro quartil,  $Q_3$  é o terceiro quartil e  $IQR$  (*Interquartile range*) é definido por  $IQR = Q_3 - Q_1$  (Bussab; Morettin, 2017).

A rejeição de valores atípicos na região de referência permite a definição de limites de controle mais robustos para monitorar a variável em análise, aumentando o desempenho dos métodos de monitoração de estacionariedade baseados em gráficos de controle.

### 4.3 CORRELAÇÃO ENTRE SÉRIES TEMPORAIS

As amplitudes das componentes harmônicas do campo magnético externo são sensibilizadas de forma distinta pelas variações do ponto de operação do GS, apresentando desde variações significativas facilmente detectáveis até variações de baixa amplitude dificilmente detectáveis. A detecção de tais alterações na assinatura magnética continuada do GS pode causar falsos positivos no processo de detecção de faltas. Neste cenário, estabelecer a relação de sensibilidade da assinatura magnética continuada com as variações do ponto de operação é uma tarefa necessária para o desenvolvimento de uma metodologia de monitoração da assinatura magnética de GSs.

Uma estratégia clássica para estabelecer a relação entre duas séries temporais é a utilização do coeficiente de correlação Pearson ( $\rho$ ) que estabelece o grau de correlação linear entre duas grandezas quantitativas, além de indicar a direção dessa correlação (positiva ou negativa). Para séries temporais, onde as grandezas são amostradas ao longo do tempo, é necessário que ambas estejam sincronizadas para o correto cálculo deste coeficiente.

Para duas variáveis genéricas  $x$  e  $y$ , o coeficiente de correlação de Pearson entre elas ( $\rho_{xy}$ ) é dado por

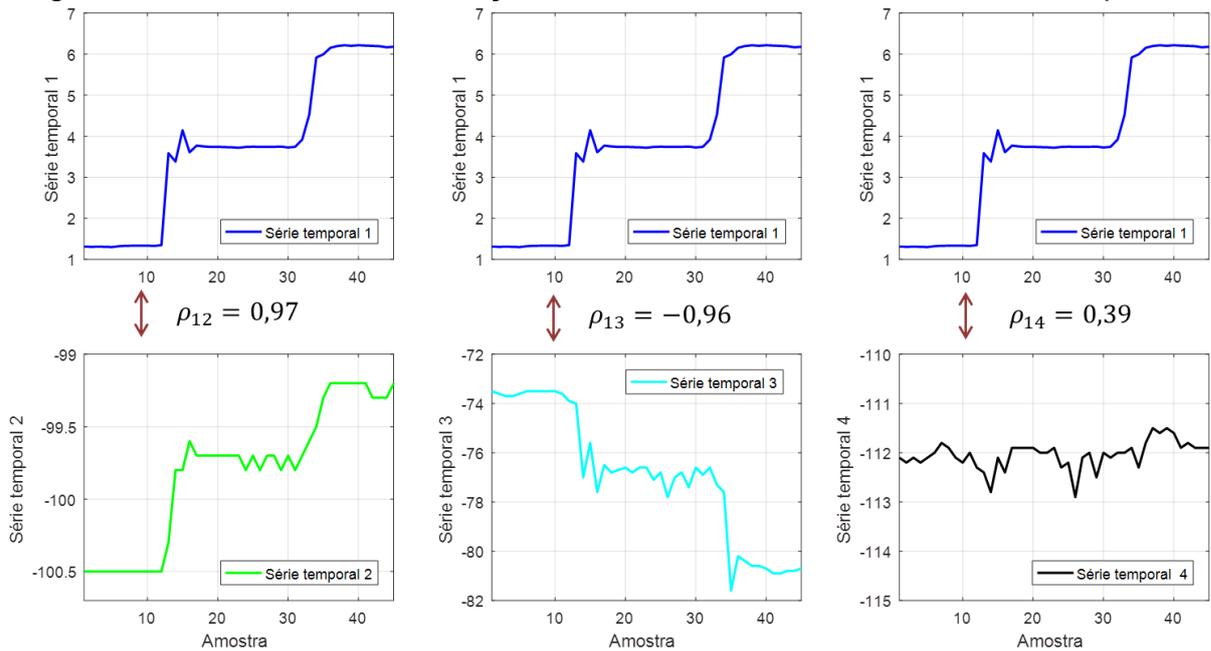
$$\rho_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \sigma_y} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(x_i - \bar{y})}{(n-1) \sqrt{[\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2] \cdot [\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{y})^2]}} \quad (29)$$

onde  $cov(x, y)$  é a covariância entre as duas variáveis, indicando como estas variam conjuntamente,  $\sigma_x$  e  $\sigma_y$  são os desvios padrões das duas variáveis, utilizados para

padronizar a covariância e permitir a comparação de duas variáveis dadas em unidades de medida diferentes, e  $\bar{x}$  e  $\bar{y}$  são as médias aritméticas das duas variáveis. Como o coeficiente de correlação é uma medida padronizada, seu valor varia de -1 a 1. Se  $|\rho_{xy}| = 1$ , tem-se uma correlação perfeita entre as variáveis  $x$  e  $y$ . Se  $|\rho_{xy}| = 0$ , constata-se a ausência de correlação entre as variáveis. Uma correlação positiva indica que as duas variáveis variam no mesmo sentido, ou seja, quando uma apresenta aumento de amplitude a outra também aumenta. Por outro lado, uma correlação negativa indica variações em sentidos opostos, ou seja, quando uma aumenta a outra diminui. Para efeito de análise, uma correlação forte entre duas variáveis é caracterizada por  $|\rho_{xy}| \geq 0,7$  (Bussab; Morettin, 2017).

O desempenho deste indicador pode ser visualizado na Figura 27, onde são estabelecidos os coeficientes de correlação entre duas séries temporais sincronizadas no tempo e compostas por 45 amostras, em três cenários distintos. No primeiro cenário, a série temporal 1 é correlacionada com a série temporal 2, apresentando uma correlação forte positiva ( $\rho_{12} = 0,97$ ) que é observada visualmente pela alteração conjunta dos patamares de amplitude. No segundo cenário, comparando as séries temporais 1 e 3, obtém-se uma correlação forte negativa ( $\rho_{13} = -0,96$ ) identificada visualmente pela relação inversamente proporcional entre as alterações de amplitude. No último cenário, comparando as séries temporais 1 e 4, obtém-se uma correlação fraca ( $\rho_{14} < 0,5$ ) indicando a ausência de correlação. As séries temporais comparadas são compostas por amostras da potência aparente de um GS (série temporal 1) e pelo histórico de amplitude de três componentes harmônicas do campo magnético externo (séries temporais 2, 3 e 4).

Figura 27. Coeficiente de correlação de Pearson entre diferentes séries temporais.



Fonte: Autor.

Além disso, o coeficiente de correlação depende de alguns fatores, como do tamanho do conjunto de amostras avaliado e da condição de estacionariedade dos dados. Para este último fator, a análise de correlação entre séries temporais estacionárias ou com pequenas alterações pode fornecer um  $\rho$  com valor elevado, mesmo não havendo correlação direta entre as variáveis. Este fenômeno, conhecido como correlação espúria, pode depreciar a qualidade e assertividade das análises estatísticas, impactando no resultado do processo avaliado. Para contornar este problema é adequado avaliar o coeficiente de correlação frente a algum transitório presente nas séries temporais (alteração entre condições de regime), onde o efeito da correlação pode então apresentar um valor mais assertivo para as análises estatísticas.

#### 4.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentados os conceitos básicos de estacionariedade de séries temporais obtidas por um sistema em regime permanente. Com base nestas características, foram apresentadas diversas técnicas de detecção de anomalias em séries temporais, que podem ser aplicadas para a detecção de alterações no valor médio nos históricos de amplitude do campo magnético e servir como ferramenta para detecção e caracterização destas

alterações. As técnicas apresentadas, relacionadas ao conceito de gráfico de controle, são amplamente difundidas em sistemas supervisórios e no controle da qualidade de processos, existindo ampla bibliografia e normas que especificam tais metodologias. Mesmo não havendo relatos na literatura sobre a aplicação destas técnicas no monitoramento de características do campo magnético do GS, a natureza dos dados aqui avaliados (séries temporais) viabiliza sua aplicação ao problema investigado. Por fim, foi abordada a correlação linear de Pearson entre séries temporais, necessária para estabelecer a relação entre o ponto de operação do GS e o histórico de amplitudes monitorado. Estes conceitos são utilizados na avaliação das influências da variação do ponto de operação do GS sobre sua assinatura magnética continuada e para a proposição de uma metodologia de monitoração da assinatura magnética continuada do GS, apresentadas nos capítulos seguintes.

## 5 INFLUÊNCIA DAS VARIAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DO GS NO CAMPO MAGNÉTICO EXTERNO

Neste capítulo é apresentada uma investigação teórica e experimental sobre o comportamento da assinatura magnética continuada do GS diante de variações naturais do ponto de operação da máquina, que não estão associadas com faltas incipientes ou estabelecidas. A estratégia utilizada para promover essa comparação é a avaliação da correlação entre os históricos de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  com os históricos de medidas de grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação do GS. Com o apoio dos resultados desta comparação, é proposta uma metodologia para a estratificação do histórico de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  (assinatura magnética continuada) de acordo com o ponto de operação do GS, permitindo a monitoração do GS em condições próximas à condição de regime permanente. Nas investigações apresentadas na literatura, atualmente este aspecto não é considerado na monitoração da assinatura magnética em GS em operação sincronizada, que estão sujeitos a variações frequentes de operação, sendo apenas apontado por Santos (2021) como uma necessidade na monitoração contínua da máquina em operação.

### 5.1 VARIAÇÕES DO PONTO DE OPERAÇÃO DO GS

As variações do ponto de operação dos GSs são frequentes, tanto em operação isolada quanto em operação sincronizada com a rede. Em ambos os modos de operação, estas variações estão associadas ao impacto de mudanças de carga e aos controles executados para garantir o fornecimento de potência, mantendo requisitos básicos de tensão e frequência nominais exigidos pelo sistema ou pela carga diretamente conectada. Em outras palavras, as variações do ponto de operação do GS prestam-se a garantir o equilíbrio carga-geração, necessário para manter o fornecimento de energia para a carga em condições adequadas e para manter a estabilidade do sistema elétrico (Kundur, 1994; Sen, 2013).

Embora os GSs sejam também utilizados em sistemas isolados, a sua aplicação em plantas de geração de energia elétrica conectadas de maneira sincronizada a sistemas elétricos de potência é muito mais significativa. Como a operação sincronizada é mais frequente, esta tese aborda este modo de conexão

para explorar as características e impactos de variações do ponto de operação sobre o campo magnético externo e suas influências na aplicação de técnicas de detecção de faltas em GS utilizando esta grandeza. Contudo, muitas das conclusões obtidas aqui podem ser estendidas para o GS no modo de operação isolada, considerando as particularidades de controle de operação deste tipo de aplicação.

Com o GS operando sincronizado com um grande sistema de potência, a tensão terminal e a frequência de operação são regidas pelo próprio sistema no ponto de conexão. A frequência de operação do GS é mantida estreitamente próxima ao valor nominal, garantindo o sincronismo com a frequência do sistema. Neste caso, o controle de velocidade mecânica de rotação ( $n_m$ ), ou controle da máquina primária, tem como função realizar (assegurar) o despacho de potência ativa ao sistema. Por outro lado, a tensão terminal do GS sofre pequenas variações em torno de seu valor nominal com o objetivo de fornecer ou consumir potência reativa, para colaborar na manutenção dos níveis de tensão do sistema. Neste caso, a alteração da corrente de campo ( $I_f$ ) do GS controla o fluxo de potência reativa da máquina de acordo com as necessidades do sistema ao qual o GS está conectado (Kundur, 1994). Como as cargas de um sistema de potência estão em constante mudança, as alterações de despacho de potências ativa e reativa são frequentes ao longo da operação do GS.

As alterações do despacho de potências dos GSs estão diretamente relacionadas com as alterações de amplitude do campo magnético estabelecido no interior da máquina e, conseqüentemente, no campo magnético externo disperso que é um reflexo do campo interno atenuada pelo núcleo do estator e pela carcaça, como já mencionado. Como exemplo elucidativo, as alterações de potência ativa têm como reflexo direto as alterações de correntes terminais de fase e, por consequência, a alteração do campo magnético estabelecido no GS. As alterações da corrente de campo da máquina, utilizadas para controlar o despacho de potência reativa, tem impacto direto sobre o fluxo magnético gerado no entreferro ( $\Phi$ ) e sobre a tensão interna induzida ( $E_a$ ), impactando diretamente no fluxo magnético interno e externo. Além disso, a variação do ângulo de carga do GS também altera a distribuição local da indução internamente na máquina, principalmente na região dos polos do rotor e dos dentes do estator, alterando também a permeabilidade dos materiais ferromagnéticos. De maneira geral, quaisquer alterações dos controles de velocidade e tensão do GS vão impactar, em maior ou menor grau, na magnitude do

fluxo magnético interno e nas magnitudes das correntes induzidas nos enrolamentos do estator, de modo a alterar as características do campo magnético estabelecido na máquina após esta entrar em estado de equilíbrio eletromagnético. Estas alterações apresentam diferentes formas de impacto sobre a amplitude das componentes harmônicas da  $f_m$ , ou seja, sobre a assinatura magnética da máquina e são objetivo de avaliação neste capítulo.

## 5.2 RELAÇÕES ENTRE GRANDEZAS ELÉTRICAS DO GS

As grandezas elétricas normalmente monitoradas na operação de geradores síncronos são a potência ativa ( $P$ ), a potência reativa ( $Q$ ), a potência aparente ( $S$ ), as tensões de fase ( $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$ ), as correntes de fase ( $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$ ), a frequência elétrica ( $f_e$ ) e a corrente de excitação dos polos ( $I_f$ ). Dentre estas variáveis, a frequência elétrica é a grandeza que sofre menor variação em torno de seu valor nominal, sendo mantida aproximadamente igual à frequência do sistema para garantir o sincronismo. Com relação às tensões e correntes, considerando que as fases estão aproximadamente equilibradas, pode-se tomar os valores terminais de tensão de fase,  $V_t$ , e de corrente de fase,  $I_t$ . Estas grandezas terminais podem ser definidas respectivamente por

$$V_t(t) = \sqrt{\frac{v_a^2(t) + v_b^2(t) + v_c^2(t)}{3}} \quad (30)$$

$$I_t(t) = \sqrt{\frac{I_a^2(t) + I_b^2(t) + I_c^2(t)}{3}} \quad (31)$$

e são obtidas por meio das médias quadráticas dos valores instantâneos de fase de tensão e corrente. A potência aparente pode ser obtida a partir de  $V_t$  e  $I_t$  ou a partir de  $P$  e  $Q$ , por meio da definição

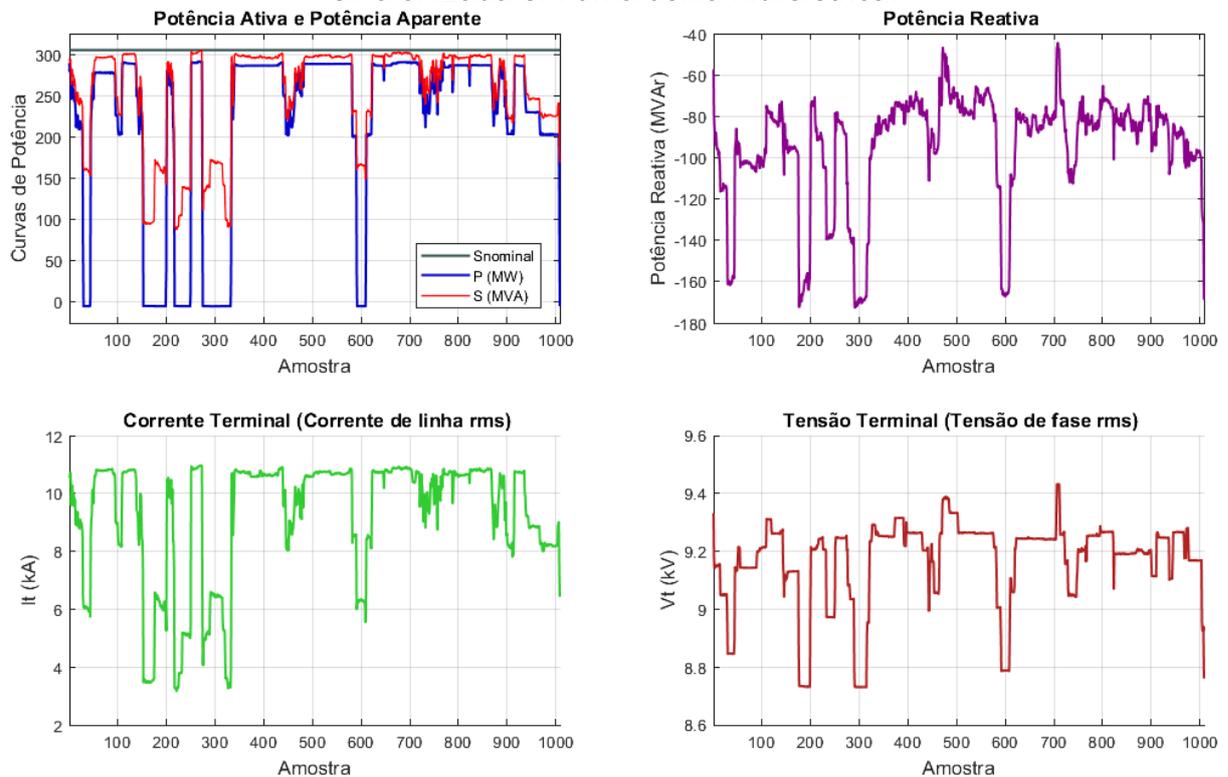
$$S = 3V_t I_t = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (32)$$

Para avaliar o comportamento e relações entre estas grandezas, de maneira experimental, são utilizados dados de medições de  $P$ ,  $Q$ ,  $S$ ,  $V_t$  e  $I_t$  em dois geradores síncronos distintos: 1) no GS de 305 MVA (potência aparente nominal -  $S_{nominal}$ ) com 56 polos salientes, operando em uma usina hidrelétrica conectada ao sistema elétrico brasileiro; e 2) no GS de 10 kVA com 8 polos salientes, parte de uma

bancada experimental de laboratório apresentada anteriormente. Em ambos os casos, as medições foram realizadas com os geradores síncronos sincronizados com o sistema elétrico.

No GS de 305 MVA, as medições das grandezas elétricas foram realizadas periodicamente a cada 10 minutos em um período de uma semana, totalizando 1008 amostras. Este intervalo de tempo foi escolhido por englobar períodos diurnos, noturnos e final de semana, que podem apresentar padrões de gerações distintos entre si. As séries temporais com as medidas destas grandezas são apresentadas na Figura 28.

Figura 28. Grandezas elétricas medidas no GS de 305 MVA em operação sincronizada em uma usina hidrelétrica.



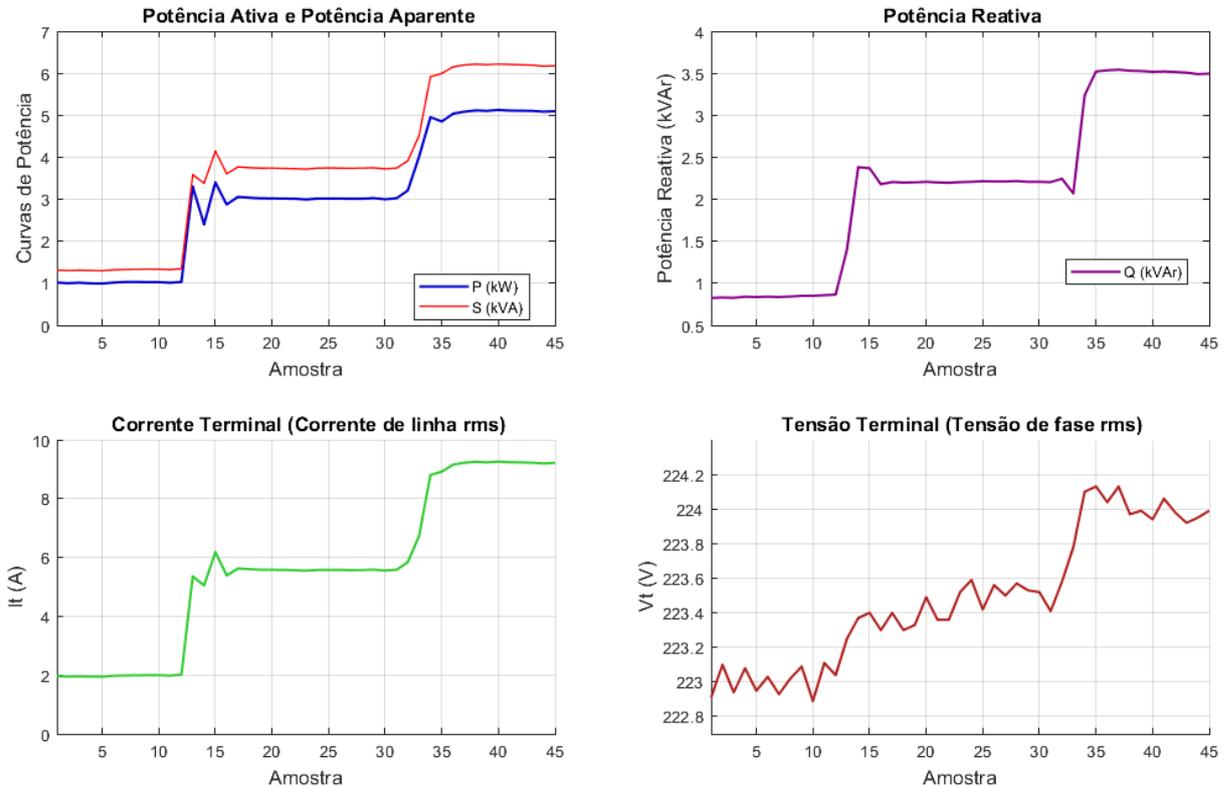
Fonte: Autor.

Analisando o despacho total de potência da máquina ( $S$ ) no período ilustrado pela Figura 28, nota-se que o GS opera em ciclos, com  $S$  variando de aproximadamente 30% até aproximadamente 100% de sua potência nominal ( $S_{nominal}$ ). A potência ativa também apresenta grande variação neste período, operando inclusive com despacho negativo de  $P$ . Estes intervalos onde  $P < 0$  correspondem à operação do GS como compensador síncrono, onde não é gerada

potência ativa pela máquina e há apenas despacho de potência reativa para suprir a demanda de energia reativa e para garantir a estabilidade de tensão do sistema. Nesta situação, a condição de  $P < 0$  refere-se ao consumo de uma pequena parcela de potência ativa do sistema para suprir os serviços auxiliares da usina e não a uma operação motorizada do GS. Observa-se que nas condições em que o GS opera como compensador síncrono há também uma diminuição da  $V_t$  e um aumento da  $Q$  gerada devido à operação em uma condição subexcitada. Nesta condição a máquina opera com  $Q < 0$ , ou seja, absorvendo energia reativa do sistema. Este exemplo, tomado em um curto período de operação, retrata a interconexão destas variáveis e as possíveis alterações que elas podem apresentar em um caso de operação real em uma usina hidrelétrica. Destaca-se que os padrões de variações destas grandezas variam de um GS para outro, podendo variar inclusive entre GSs de uma mesma planta de geração de energia elétrica. Além disso, estes padrões de geração podem ser sazonais e de difícil previsão, envolvendo não só a sazonalidade da carga como a disponibilidade da fonte primária de energia (vazão de rios em hidrelétricas, constância dos ventos em parques eólicos etc.). Logo, as variações destas grandezas são naturais na operação do GS e seus impactos sobre a assinatura magnética continuada devem ser levados em consideração durante a monitoração da condição da máquina. A Figura 28 também apresenta visualmente uma relação entre as variáveis elétricas monitoradas. Pode-se observar que a série temporal  $I_t$  acompanha de maneira fiel o despacho de potência total da máquina ( $S$ ) e que a série temporal  $Q$  acompanha a evolução de  $V_t$  neste período.

No GS de 10 kVA, as medições das grandezas elétricas foram realizadas periodicamente a cada 20 segundos em um período de 15 minutos, totalizando 45 amostras. Nestes ensaios, o GS foi operado sincronizado na condição sobreexcitada, fornecendo potência reativa para a rede elétrica. Neste ensaio experimental, foram realizados dois ajustes de  $P$  e  $Q$ , criando três patamares de carga, como apresentado na Figura 29. O aumento de geração de  $P$  e  $Q$  neste ensaio é acompanhado por aumentos de  $I_t$  e  $V_t$ . A tensão terminal aumenta sutilmente, já que o GS é de pequeno porte, sendo ligeiramente superior à tensão eficaz de fase nominal da rede elétrica (220 V) na operação sobreexcitada.

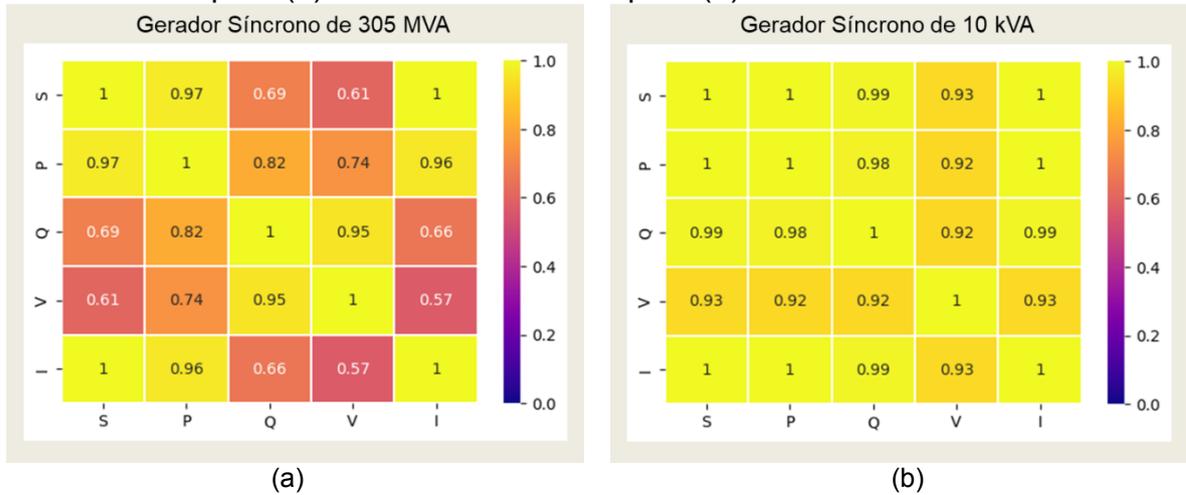
Figura 29. Grandezas elétricas medidas no GS de 10 kVA em operação sincronizada durante um ensaio experimental.



Fonte: Autor.

Estas relações de dependência entre as grandezas elétricas monitoradas podem ser estabelecidas numericamente pelo cômputo do coeficiente de correlação de Pearson  $\rho$ , definido por (29), entre pares destas grandezas. Para as séries de medidas apresentadas na Figura 28, para o GS de 305 MVA, e na Figura 29, para o GS de 10 kVA, estes coeficientes são apresentados pelas matrizes de correlação apresentadas na Figura 30 (a) e na Figura 30 (b), respectivamente. Estas matrizes são representadas na forma de um correlograma associado a um gráfico de calor que indica o módulo do coeficiente  $\rho$ . Para o GS de 305 MVA, a Figura 30 (a) mostra que as grandezas  $S$  e  $I_t$  apresentam uma correlação linear quase perfeita ( $\rho_{S|I_t} \cong 1$ ). Além disso,  $S$  apresenta uma correlação forte positiva com  $P$  ( $\rho_{S|P} \cong 0,97$ ). Por outro lado,  $V_t$  apresentam uma correlação forte com  $Q$ , dada por  $\rho_{Q|V_t} \cong 0,95$ , uma vez que o GS opera na condição subexcitada, onde uma diminuição de  $V_t$  está associada a uma diminuição de  $Q$  (ou aumento do módulo da  $Q$  consumida pelo GS).

Figura 30. Matriz de correlação linear entre as grandezas elétricas  $S$ ,  $P$ ,  $Q$ ,  $V_t$  e  $I_t$  para (a) o GS de 305 MVA e para (b) o GS de 10 kVA.



Fonte: Autor.

Um padrão semelhante ao do GS de 305 MVA é observado no ensaio experimental realizado no GS de 10 kVA, onde consegue-se um despacho de potência mais estável e com menores perturbações, o que é traduzido em uma forte correlação entre as variáveis elétricas monitoradas, como apresentado pelo correlograma da Figura 30 (b). Neste segundo caso,  $S$ ,  $P$  e  $I_t$  apresentam uma correlação quase perfeita ( $\rho \cong 1$ ) no ensaio avaliado. Além disso,  $Q$  e  $V_t$  também apresentam uma correlação forte positiva ( $\rho \cong 0,92$ ), com o GS operando na condição sobrecitada.

Com relação ao GS de 305 MVA, que representa um cenário real de aplicação em uma planta de geração de energia, a avaliação dos valores da matriz de correlação mostrados na Figura 30 (a), revelam dois grupos de variáveis que variam conjuntamente:  $S$ ,  $P$  e  $I_t$  variam conjuntamente, assim como  $V_t$  e  $Q$  variam conjuntamente de maneira proporcional. A relação de causalidade destas relações é garantida pela definição física destas grandezas, pois se sabe que na operação em sincronismo o ajuste de  $V_t$  controla o despacho de  $Q$  e o ajuste de velocidade da máquina primária controla o despacho de  $P$ , associado diretamente a  $S$  e a  $I_t$ . Estes mesmos padrões são observados em ensaios experimentais no GS de 10 kVA, embora para esta máquina tenha sido observada uma correlação forte entre todas as variáveis elétricas monitoradas. Desta maneira, pode-se considerar, inicialmente, apenas uma variável de cada conjunto para investigar seu impacto sobre a assinatura magnética, evitando redundância na análise de correlação.

Com isso, são selecionadas a potência ativa  $P$ , para representar as alterações de controle de velocidade da máquina primária, corrente terminal e potência aparente; e a potência reativa  $Q$ , para representar as alterações de controle da corrente de campo e da tensão terminal do GS. Estas duas grandezas são utilizadas na sequência para investigar o impacto de suas variações sobre a assinatura magnética continuada do GS.

### 5.3 CORRELAÇÃO ENTRE VARIÁVEIS ELÉTRICAS E O CAMPO MAGNÉTICO

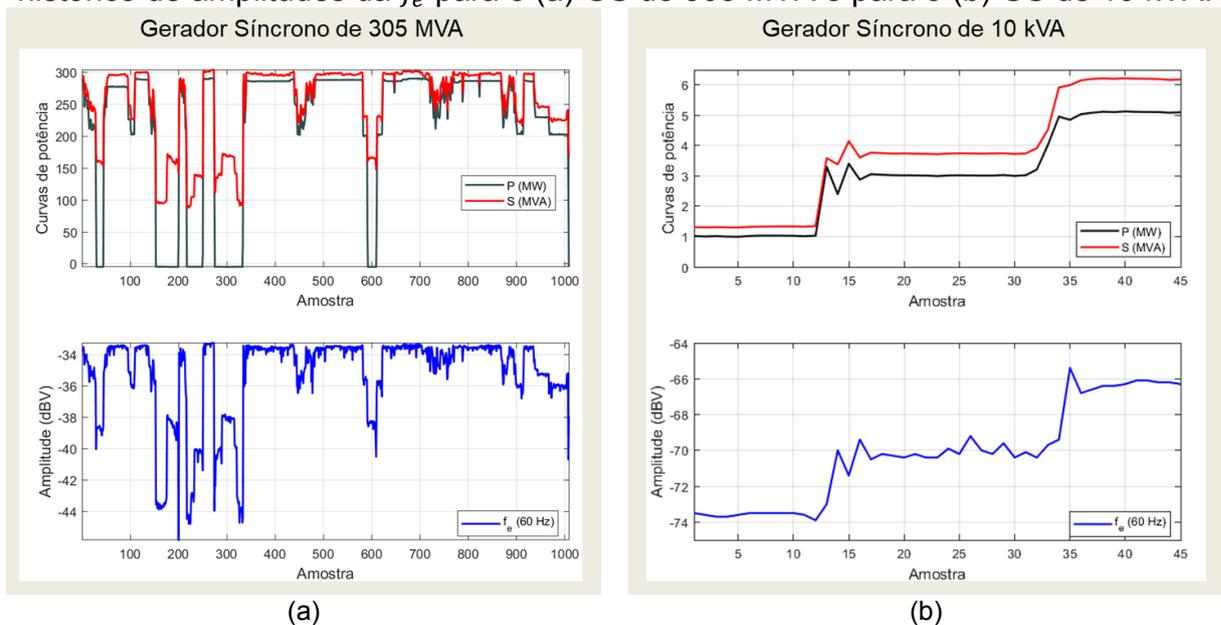
A assinatura magnética continuada do GS, formada pelo histórico de amplitudes de componentes harmônicas múltiplas da  $f_m$ , sofre alterações decorrentes das variações do ponto de operação da máquina com diferentes proporções entre as séries de dados que a compõe. São relatadas, a seguir, algumas relações de correlação linear entre os históricos de amplitudes das componentes  $f_m$  e  $f_e$  com as grandezas elétricas do GS e alguns padrões de correlação da assinatura magnética continuada com as grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação.

#### 5.3.1 Comparação entre a potência ativa e o histórico de amplitudes da $f_e$

A componente espectral associada à frequência fundamental elétrica (60 Hz) é a componente com maior amplitude do espectro do sinal medido da derivada temporal do campo magnético externo ( $dH(t)/dt$ ) e está diretamente associada à potência aparente e à potência ativa despachada pela máquina. A Figura 31 apresenta uma comparação entre o histórico de medidas de  $P$  e  $S$  e o histórico de amplitudes da componente  $f_e$  para os dois GS avaliados neste capítulo. Para o GS de 305 MVA, os históricos de medições apresentados na Figura 31 (a) evidenciam que todas as variações de despacho de  $P$  ou  $S$  no período avaliado são acompanhadas por alterações aproximadamente proporcionais de amplitude da  $f_e$  em seu histórico de amplitudes. A correlação entre a  $P$  gerada e o histórico de amplitudes da  $f_e$  é forte, apresentado um  $\rho_{P|f_e} = 0,93$  no período avaliado. Com relação à potência total gerada, a correlação linear entre a  $S$  e o histórico de amplitudes da  $f_e$  é também forte, com  $\rho_{S|f_e} \cong 0,97$ . Embora  $\rho_{S|f_e}$  seja ligeiramente

superior à  $\rho_{P|f_e}$ , optou-se utilizar como comparação a correlação do histórico de amplitudes de  $f_e$  com a potência ativa, já que a potência aparente é uma média quadrática de  $P$  e  $Q$ , de acordo com a equação (32), sendo dependente do controle destas duas grandezas. De maneira análoga, os históricos de medições apresentados na Figura 31 (b) para o GS de 10 kVA evidenciam que as duas variações de despacho de  $P$  e  $S$  impostas durante o ensaio experimental tem como reflexo alterações proporcionais de amplitude da  $f_e$  em seu histórico de amplitudes, apresentando  $\rho_{S|f_e} = 0,97$  e  $\rho_{P|f_e} = 0,96$ . Comparando os dois casos, nota-se que quanto maior o despacho de potência ativa, maior a amplitude da componente  $f_e$  e maior a amplitude do sinal  $dH(t)/dt$  medido.

Figura 31. Comparação entre o despacho de potência ativa e potência aparente e o histórico de amplitudes da  $f_e$  para o (a) GS de 305 MVA e para o (b) GS de 10 kVA.



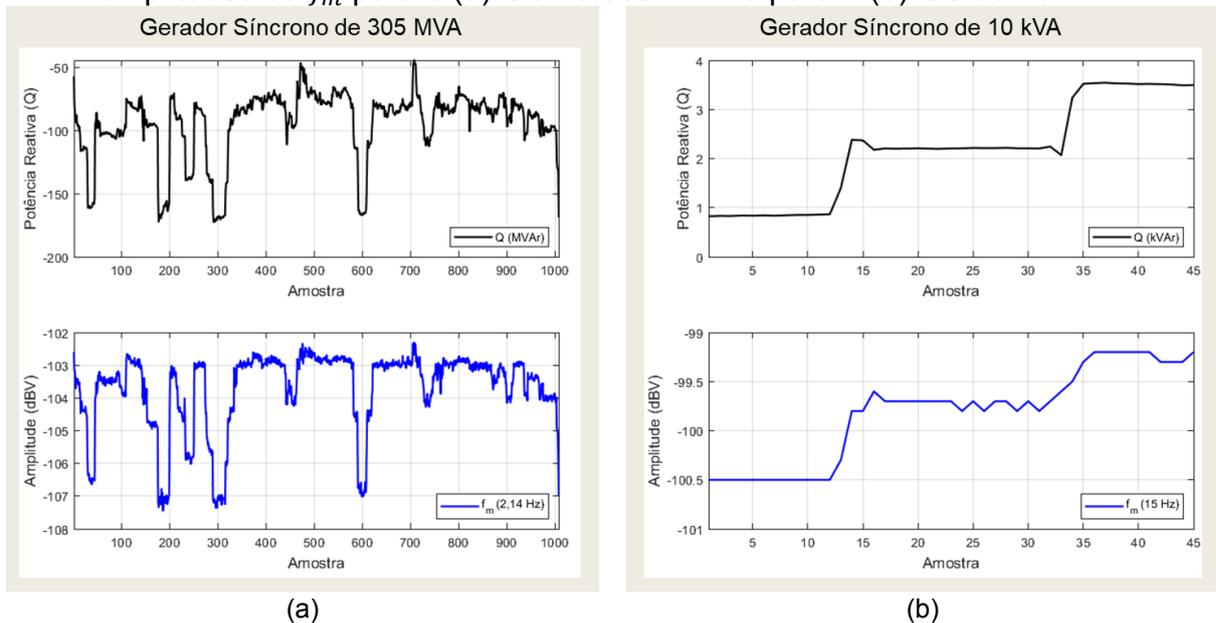
Fonte: Autor.

### 5.3.2 Comparação entre a potência reativa e o histórico de amplitudes da $f_m$

A componente espectral associada à frequência fundamental mecânica ( $f_m$ ) está diretamente associada à potência reativa  $Q$  gerada pela máquina. A Figura 32 apresenta uma comparação entre o histórico de medidas de  $Q$  e o histórico de amplitudes da componente  $f_m$  para os dois GSs avaliados. O GS de 305 MVA tem 56 polos, o que corresponde a uma  $f_m$  de aproximadamente 2,14 Hz. A Figura 32 (a) apresenta a comparação do histórico de medições de  $Q$  com o histórico de

amplitudes da  $f_m$ . No período avaliado este GS operou em condição subexcitada, absorvendo potência reativa do sistema elétrico. Comparando as duas séries temporais, observa-se visualmente uma relação proporcional entre as curvas, sendo o módulo da potência reativa absorvida inversamente proporcional à amplitude da  $f_m$ . O coeficiente de correlação de Pearson é  $\rho_{Q|f_m} = 0,96$ , indicando a forte correlação entre as duas séries temporais. Pelas curvas da Figura 32 (b), a mesma comparação pode ser realizada para o GS de 10 kVA de 8 polos, que apresenta uma  $f_m$  de 15 Hz. Neste segundo caso, os dados foram obtidos em um ensaio experimental variando a potência reativa entre três patamares de carga com o GS operando na condição sobreexcitada, fornecendo potência reativa para a rede elétrica. Observa-se a forte correlação positiva entre as séries temporais avaliadas, confirmada por um  $\rho_{Q|f_m} = 0,98$ .

Figura 32. Comparação entre a geração de potência reativa e o histórico de amplitudes da  $f_m$  para o (a) GS de 305 MVA e para o (b) GS de 10 kVA.



Fonte: Autor.

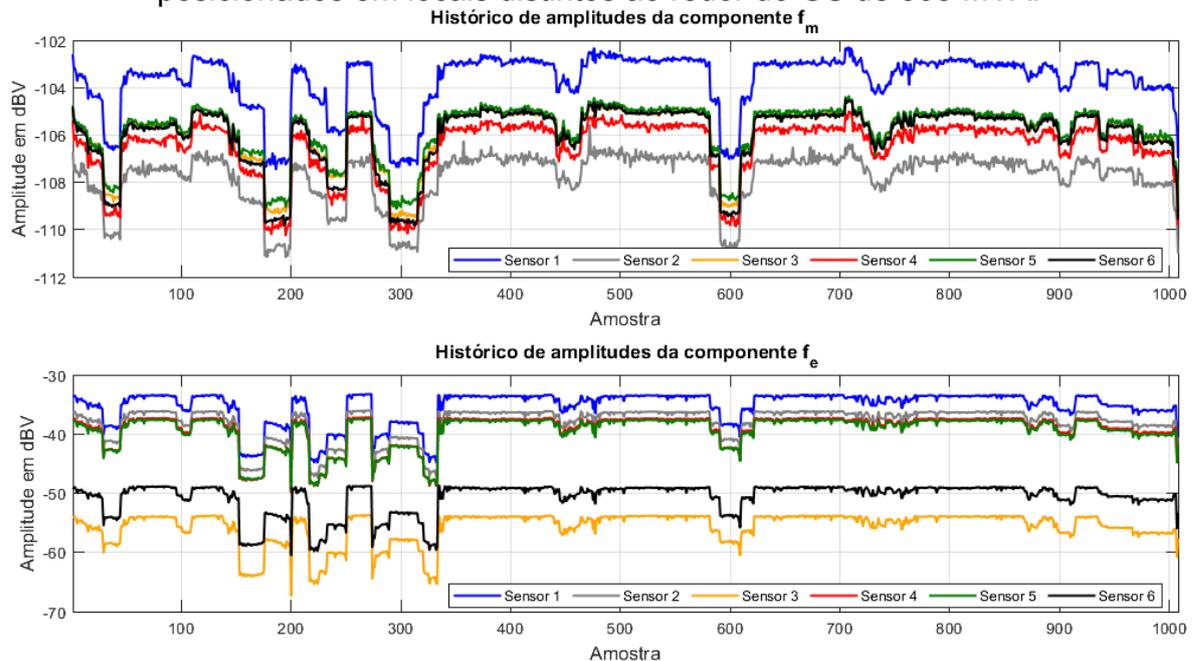
Pelos resultados analisados para os dois GSs, como esperado, observa-se que a amplitude da  $f_m$  é fortemente sensível à alteração do despacho de  $Q$ , que é imposta principalmente pelo controle da corrente de excitação. A amplitude da  $f_m$  aumenta com o aumento de  $I_f$ , que é proporcional ao fornecimento de  $Q$  para a rede elétrica. A correlação entre o histórico de amplitudes da  $f_m$  é positiva com o módulo

de  $Q$  para a máquina operando na condição sobrecitada e negativa na condição subexcitada.

### 5.3.3 Padrões de correlação entre as séries temporais monitoradas

As relações de correlação linear entre  $P$  e o histórico de amplitudes da  $f_e$  e entre  $Q$  e o histórico de amplitudes da  $f_m$  são evidenciadas em medições de  $dH(t)/dt$  realizadas em diferentes posições na parte externa do GS. A Figura 33 apresenta os históricos de amplitudes da  $f_e$  e da  $f_m$  obtidos por seis sensores posicionados em locais distintos ao redor do GS de 305 MVA. Estas medidas foram obtidas de maneira sincronizada no tempo pelo equipamento descrito na seção 3.3.3 para observar os padrões de variação entre os sensores.

Figura 33. Histórico de amplitudes da  $f_m$  e da  $f_e$  obtidos por meio de 6 sensores posicionados em locais distintos ao redor do GS de 305 MVA.



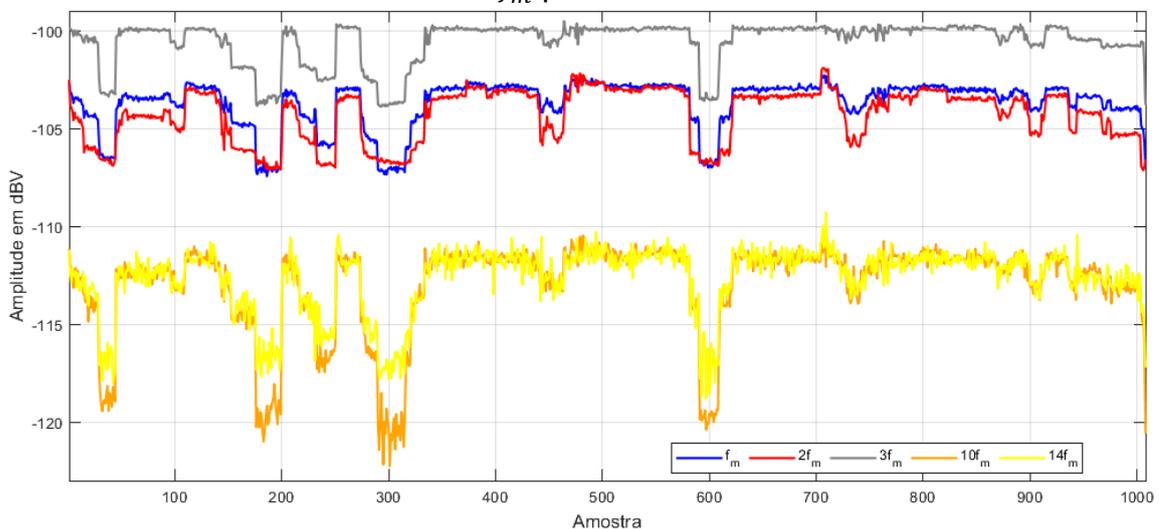
Fonte: Autor.

Observa-se na Figura 33 que tanto o histórico de amplitudes da  $f_e$  quanto o da  $f_m$  apresentam alterações correlacionadas. Os coeficientes de correlação entre  $P$  e os históricos de amplitude da  $f_e$  obtidos por meio dos seis sensores evidenciam uma correlação forte positiva, com coeficientes  $\rho_{P|f_e}$  superiores a 0,9. O mesmo comportamento é observado para a relação entre o módulo de  $Q$  e os histórico de

amplitudes da  $f_m$  obtidos nos seis sensores, onde observa-se uma correlação forte negativa com os coeficientes  $\rho_{Q|f_m}$  também maiores que 0,9. As diferenças observadas entre sensores são os patamares de amplitude em cada condição de carga, a variabilidade do histórico e o grau de impacto das alterações de carregamento do GS, que não impactam de maneira significativa os valores dos coeficientes de correlação calculados. Estas alterações são decorrentes da diferença de posição entre os sensores, que captam campos de maior ou menor intensidade, com características distintas dependendo do local.

Além das relações de correlação forte entre  $P$  e  $Q$  com os históricos de amplitude da  $f_e$  e da  $f_m$  evidenciados anteriormente, algumas componentes harmônicas destas componentes fundamentais também apresentam um grau de correlação forte com as variáveis elétricas do GS. A Figura 34 mostra o histórico de amplitudes da  $f_m$  e de algumas de suas harmônicas ( $2^a$ ,  $3^a$ ,  $10^a$  e  $14^a$  harmônica) que apresentam correlação forte com  $Q$  ( $\rho \geq 0,7$ ). É possível observar visualmente a correlação entre estas séries temporais.

Figura 34. Comportamento do histórico de amplitudes de algumas componentes harmônicas da  $f_m$  para o GS de 305 MVA.

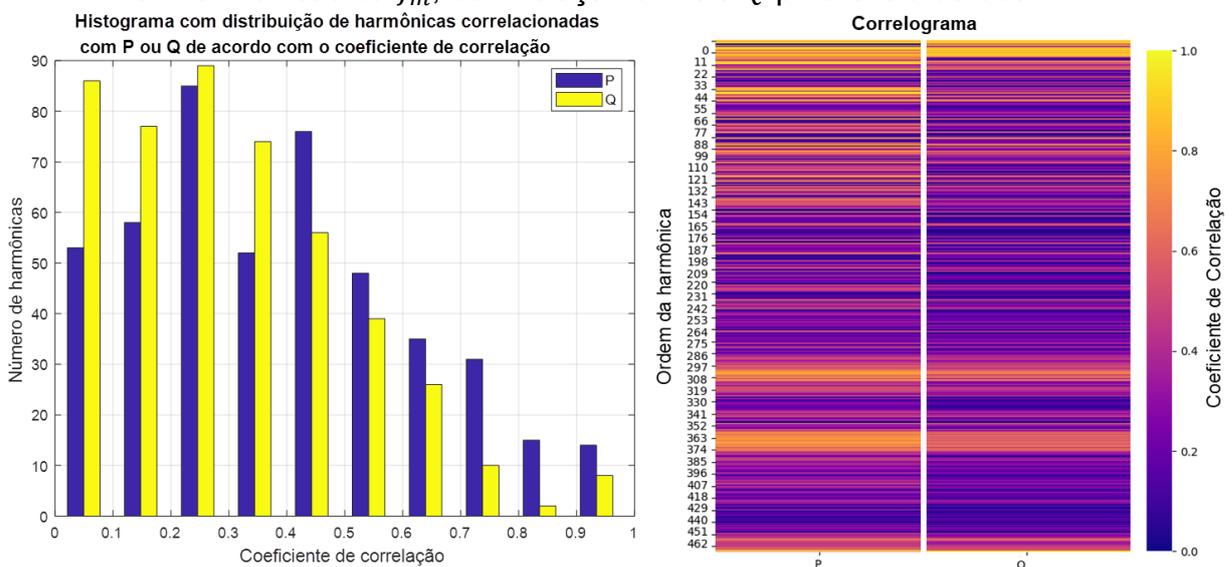


Fonte: Autor.

Uma análise mais abrangente é realizada para o GS de 305 MVA por meio do cômputo do coeficiente de correlação de Pearson entre o histórico de amplitudes de 467 harmônicas da  $f_m$ , com relação à  $P$  e à  $Q$ . O resultado é apresentado na Figura 35, onde o histograma apresentado à esquerda mostra a distribuição destas séries temporais com relação aos coeficientes de correlação  $\rho$  obtidos com relação à

$P$  ou à  $Q$ , separadamente. Observa-se que aproximadamente 13% das séries monitoradas apresentam correlação forte com  $P$  ( $0,7 \leq \rho \leq 1$ ) e aproximadamente 18% das séries apresentam correlação moderada ( $0,5 \leq \rho < 0,7$ ). Com relação à  $Q$ , aproximadamente 4% das séries monitoradas apresentaram correlação forte e aproximadamente 14% das séries possuem correlação moderada para o total de harmônicas monitoradas. O correlograma, mostrado à direita na Figura 35, apresenta o coeficiente de correlação ( $0 \leq \rho \leq 1$ ) na forma de um gráfico de calor. Neste correlograma é possível observar a ocorrência de componentes harmônicas com correlação forte com  $P$  (coluna da esquerda) ou  $Q$  (coluna da direita) em diferentes regiões do espectro (indicada pela ordem das harmônicas no eixo das ordenadas). A região de baixa frequência (menor ordem das harmônicas) é a região de maior incidência de harmônicas com correlação forte ou moderada com os despachos de  $P$  ou  $Q$ .

Figura 35. Coeficiente de correlação de Pearson entre o histórico de amplitudes de 467 harmônicas da  $f_m$ , com relação à  $P$  e à  $Q$  para o GS de 305 MVA.

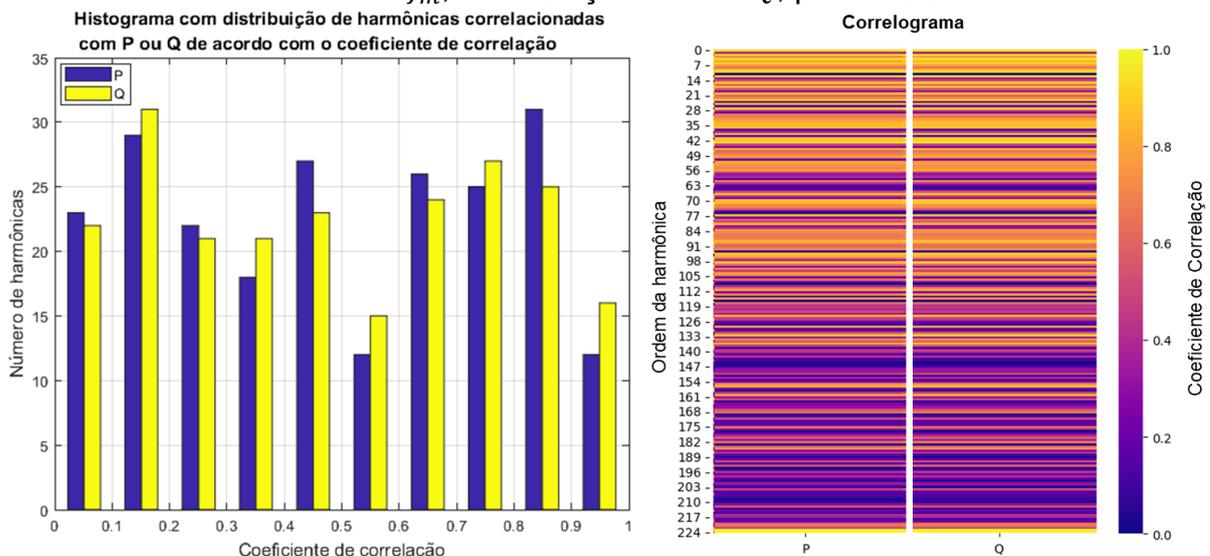


Fonte: Autor.

Uma análise similar é realizada para 225 componentes harmônicas da  $f_m$  monitoradas no GS de 10 kVA. Para este caso, apresentado na Figura 36, observa-se no histograma uma maior ocorrência de harmônicas com correlação forte e moderada, quando comparada com o caso anterior. Neste caso, obteve-se aproximadamente 30% das séries monitoradas com correlação forte com  $P$  ( $0,7 \leq \rho \leq 1$ ) e aproximadamente 16% das séries com correlação moderada ( $0,5 \leq \rho <$

0,7). Com relação à  $Q$ , aproximadamente 30% das séries monitoradas apresentaram correlação forte e aproximadamente 17% das séries possuem correlação moderada para o total de harmônicas monitoradas. Esse resultado se deve ao fato de que o experimento realizado em laboratório é sob condições controladas e haver menor ocorrências de variação de potência do que o caso avaliado para o GS de 305 MVA. No caso do GS de 305 MVA, há atuação dos controles em tempo real para garantir o despacho e a estabilidade da velocidade do GS. O correlograma também mostra visualmente que a região de baixa frequência apresenta a maior incidência de séries temporais com correlação forte ou moderada com  $P$  ou  $Q$ , concordando com o resultado apresentado para o GS e 305 MVA.

Figura 36. Coeficiente de correlação de Pearson entre o histórico de amplitudes de 225 harmônicas da  $f_m$ , com relação a  $P$  e a  $Q$ , para o GS de 10 kVA.



Fonte: Autor.

As características observadas no histórico de amplitudes de harmônicas da  $f_m$  pontualmente para um sensor em cada GS monitorado podem ser estendidas para os conjuntos de históricos de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  monitoradas por outros sensores em posições distintas, embora ocorram variações de correlação entre as harmônicas e as potências despachadas pelo GS dependendo da posição do sensor. Os resultados apresentados demonstram o impacto das alterações do ponto de operação do GS síncrono sobre a assinatura magnética continuada e suas características, que contribuem para o entendimento do efeito de correlação entre as variáveis monitoradas. Estas conclusões e resultados são utilizados para a definição

de estratégias de monitoração que permitam classificar alterações da assinatura magnética, descartando alterações naturais decorrentes das variações do ponto de operação do GS e evitando falsos alarmes em processos de detecção de faltas, como será apresentado na seção a seguir.

#### 5.4 ESTRATIFICAÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA COM RELAÇÃO AO PONTO DE OPERAÇÃO

A avaliação da assinatura magnética continuada para fins de detecção de faltas deve ser realizada, idealmente, em uma condição em que o GS opere em regime permanente e onde as medições sejam isentas da adição de ruídos. Nesta condição ideal, as variações das características estatísticas das séries temporais que representam os históricos de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  podem ser associadas com faltas incipientes ou estabelecidas que alterem o circuito eletromagnético da máquina. Entretanto, foram apresentadas neste capítulo as influências das variações do ponto de operação dos GSs quando sincronizados com um sistema de potência e seu impacto sobre a assinatura magnética continuada da máquina. Além da operação em regime permanente ser uma condição hipotética e não alcançada na prática, o sistema de monitoração da condição do GS por meio do campo magnético externo não deve interferir na sua operação, de maneira que devem ser formuladas estratégias para lidar com as alterações naturais de carregamento da máquina para detectar faltas nos GS por meio do campo magnético externo.

Neste contexto, uma alternativa é avaliar a assinatura magnética continuada do GS em condições de operação próximas a uma condição de regime permanente, com pequenas variações de despacho de potência, ou seja, com pequenas alterações de suas grandezas elétricas e magnéticas. Para isso, propõem-se como estratégia a estratificação da assinatura magnética continuada da máquina de acordo com faixas de operação caracterizadas por apresentarem despacho de  $P$  e  $Q$  aproximadamente constantes.

São apresentadas, a seguir, a estratégia para identificar as regiões de operação de cada GS e um fluxograma do processo de estratificação da assinatura magnética continuada em função de regiões de operação com faixas limitadas de  $P$  e  $Q$ . Por fim, é apresentado um exemplo de aplicação deste processo de

estratificação e as características das séries de dados resultantes, que são úteis para a monitoração da condição do GS.

#### 5.4.1 Identificação das regiões de operação

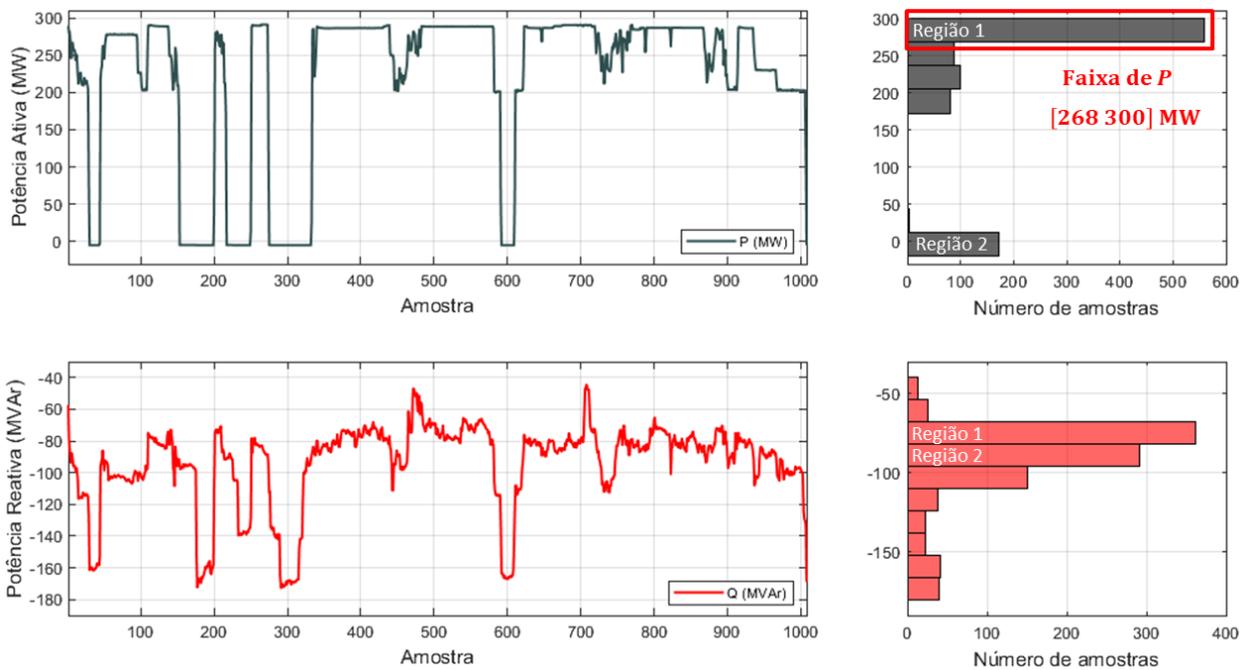
Embora o despacho de  $P$  e  $Q$  varie ao longo do tempo, é comum o GS operar com um mesmo patamar de geração de potência por intervalos finitos de tempo. A operação em um mesmo nível de carga é difícil de ser prevista e, mesmo havendo uma programação de geração, o despacho de potência pode sofrer alterações em decorrência de variações esporádicas de carga do sistema.

A monitoração da condição de GSs por meio do campo magnético externo é realizada por meio de medições periódicas ao longo de sua operação. A condição hipotética de regime permanente pode ser aproximada avaliando a assinatura magnética continuada em períodos em que o GS opere dentro de faixas estreitas de operação, com pequenas variações das grandezas elétricas. Neste contexto, uma maneira de identificar as faixas de operação em que o GS opera com mais frequência é montar um histograma do histórico de medidas de  $P$  e de  $Q$  para verificar as faixas de potência com maior incidência de medições.

Para exemplificar esta estratégia, foi utilizado o conjunto de medidas realizadas no GS de 305 MVA durante o período de uma semana (1008 amostras) utilizado ao longo deste capítulo. A Figura 37 mostra novamente as séries com as medições de  $P$  e  $Q$ , juntamente com histogramas das medidas de cada uma destas grandezas, dividindo a faixa total de operação do GS em subfaixas ou regiões de operação. Avaliando a série de medidas de  $P$ , pode-se observar que existem períodos de geração de  $P$  aproximadamente constante, principalmente em regiões próximas a potência nominal (entre 250 e 300 MW) e na condição de operação como compensador síncrono, onde  $P$  é aproximadamente nula. A constância de operação nestas regiões é traduzida por meio do histograma associado às medidas de  $P$ . Neste histograma, foi identificado as duas regiões com maior incidência de medidas no período avaliado. Na região 1, próxima a potência nominal, a faixa de variação de  $P$  é de 268 MW à 300 MW (aproximadamente 10% da potência nominal) e compreende 560 amostras, o que corresponde a aproximadamente 56% das medidas obtidas no intervalo de avaliação (1008 amostras no total). Isso significa que o GS operou 56% do tempo com geração de potência ativa dentro desta faixa. A

região 2 no histograma de  $P$ , que está associada a operação do GS como compensador síncrono, é definida no intervalo de -20 MW à 12 MW e compreende aproximadamente 17% das medidas avaliadas. Como as medições são periódicas, pode-se concluir que o GS operou aproximadamente 73% do período de análise dentro destas duas regiões de operação.

Figura 37. Medições de  $P$  e  $Q$  no GS de 305 MVA junto com histogramas para identificação de regiões de operação.



Fonte: Autor.

O histórico de despacho de  $Q$  apresenta maior variabilidade. Contudo, o histograma associado a esta série de dados, apresentado na Figura 37, indica algumas regiões com maior incidência de operação. A região 1, definida de -82 MVar até -69 MVar, compreende 361 medidas (aproximadamente 36% do total) e a região 2, definida de -96 MVar até -82 MVar, compreende 292 medidas (aproximadamente 29% do total). Isso implica que o gerador operou 65% do período avaliado com geração de  $Q$  dentro destas duas regiões.

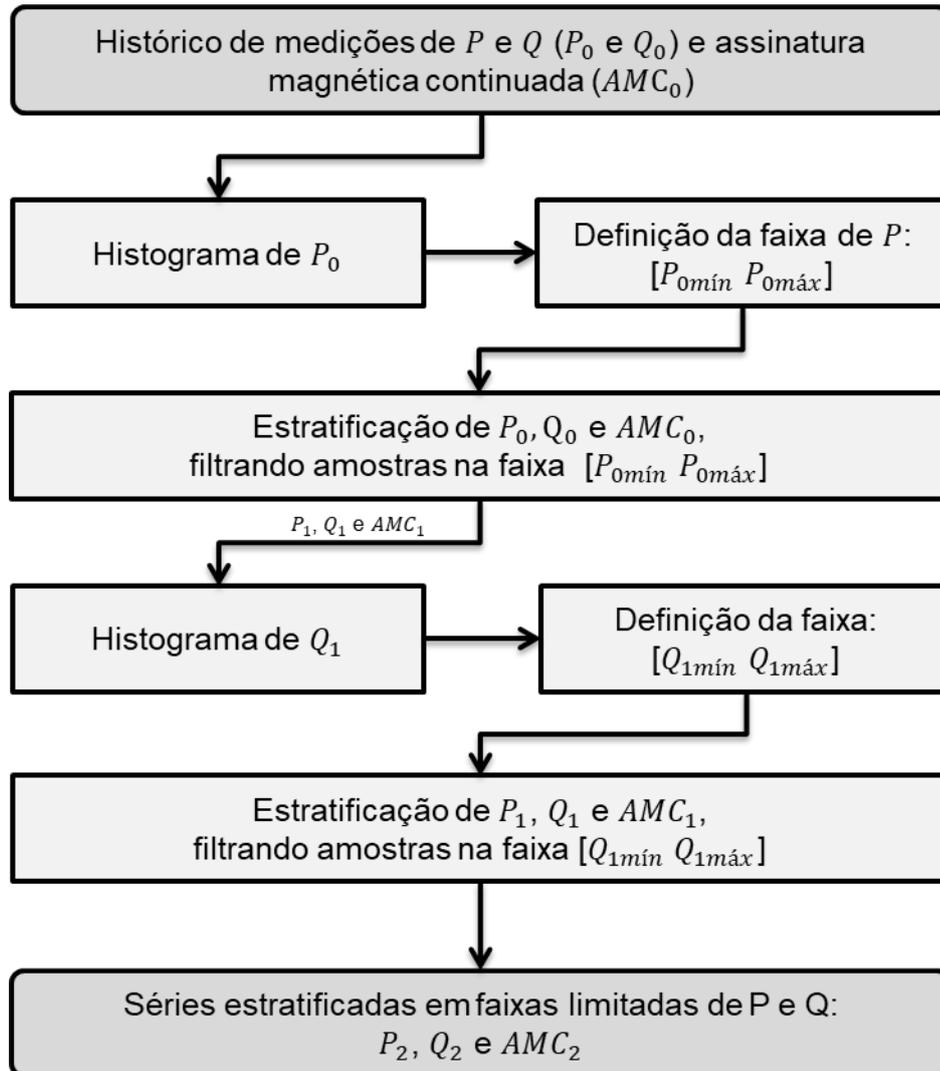
Esta avaliação exploratória permite exemplificar que o maior percentual de medidas obtidos neste período está dentro de faixas estreitas de operação e que é possível então monitorar a assinatura magnética continuada apenas nestas faixas para avaliar a condição do GS.

#### 5.4.2 Processo de estratificação da assinatura magnética continuada

O processo de estratificação proposto consiste em filtrar as medidas, tanto das amplitudes das harmônicas da  $f_m$  associadas com a medição do campo magnético externo quanto das medidas das variáveis elétricas, que ocorrem quando o GS opera dentro de uma região de operação definida por uma faixa limitada de potência. Assim, obtém-se um novo conjunto de medidas, menor que o conjunto original, obtido dentro de uma faixa com pequenas variações da grandeza elétrica usada como referência para o processo de estratificação. A Figura 38 apresenta o fluxograma do processo de estratificação da assinatura magnética continuada. As entradas deste processo são um conjunto formado pela série de medidas de potência ativa inicial ( $P_0$ ), potência reativa inicial ( $Q_0$ ) e pelo conjunto de séries de históricos de amplitudes da  $f_m$  que formam a assinatura magnética continuada inicial do GS ( $AMC_0$ ).

A primeira etapa do processo é realizar a montagem do histograma de  $P_0$  para identificar as regiões de operação mais frequentes em relação à potência ativa e definir uma faixa limitada [ $P_{0mín}$   $P_{0máx}$ ] para realizar a divisão dos dados. Na sequência, é realizada a primeira etapa de estratificação dentro do intervalo definido, filtrando do conjunto inicial as medidas que ocorrem com o GS operando dentro da faixa [ $P_{0mín}$   $P_{0máx}$ ]. O resultado desta etapa é um novo conjunto de dados ( $P_1, Q_1$  e  $AMC_1$ ), com tamanho reduzido em relação ao conjunto inicial, limitado em  $P$ . A partir deste resultado, a segunda etapa é realizada montando um histograma de  $Q_1$  para identificar as regiões de operação mais frequentes em relação à potência reativa e definir a faixa limitada [ $Q_{1mín}$   $Q_{1máx}$ ] para realizar a segunda divisão dos dados. Por fim, é realizada a segunda etapa de estratificação dentro do intervalo de potência reativa definido, filtrando do conjunto formado por  $P_1, Q_1$  e  $AMC_1$  as medidas que ocorrem com o GS operando na faixa [ $Q_{1mín}$   $Q_{1máx}$ ]. O resultado deste processo é um novo conjunto de dados ( $P_2, Q_2$  e  $AMC_2$ ), com tamanho reduzido em relação ao conjunto resultante da primeira etapa, agora limitado em  $P$  e em  $Q$ .

Figura 38. Processo de estratificação da assinatura magnética continuada.



Fonte: Autor.

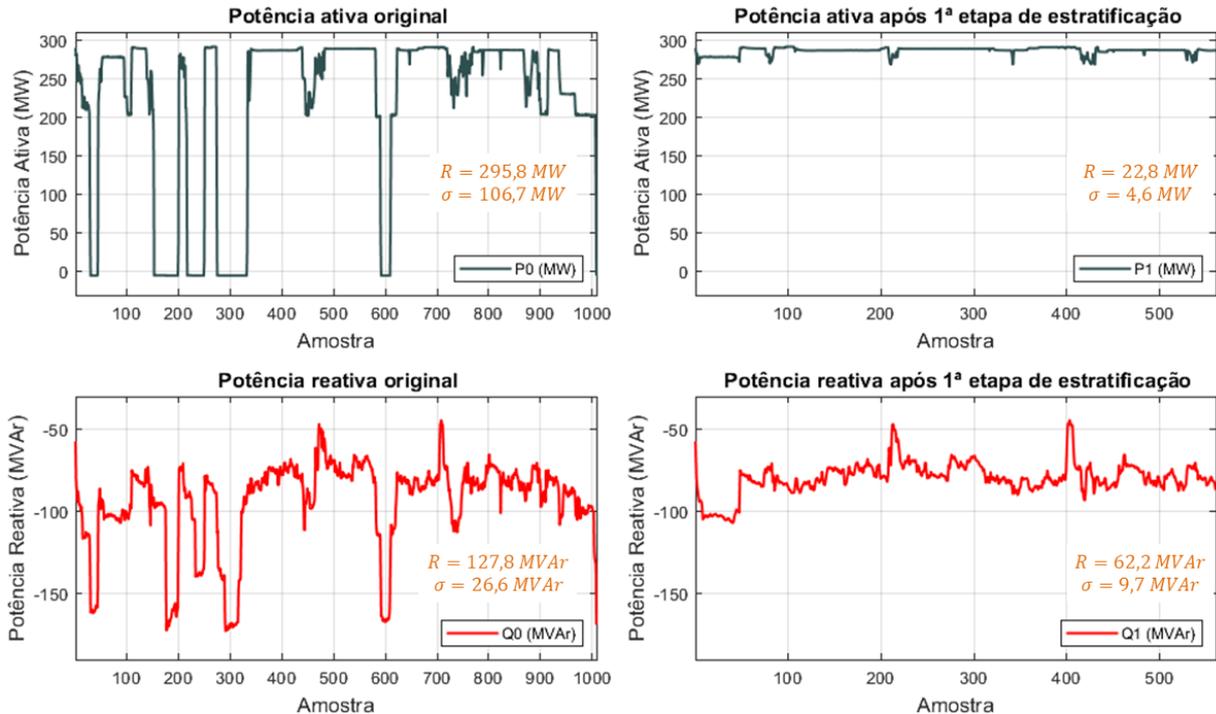
O conjunto de dados resultante é então formado por medidas realizadas em momentos em que o GS opera dentro das faixas limitadas de potência, limitando a variabilidade da assinatura magnética continuada decorrente de grandes alterações do ponto de operação da máquina. As faixas de potência a serem definidas para executar o processo de estratificação devem ser definidas de acordo com duas características: variabilidade do despacho de potência e número mínimo de amostras para análise. Quanto menor for a faixa de potência definida, mais próximo o conjunto de dados resultantes estará de uma condição de regime permanente, menor será o impacto de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada do conjunto resultante e menor será a quantidade de pontos das séries de dados resultantes. Por outro lado, faixas maiores de variação de

potência implicaram em maior variabilidade na assinatura magnética devido às variações do ponto de operação, mas permitem a filtragem de um conjunto maior de dados para análise. Esse *trade-off* entre variabilidade do despacho de potência e número de amostras para análise deve ser definido de acordo com o tamanho do conjunto de dados iniciais. Além disso, pode-se realizar a análise simultânea de diferentes regiões de operação, de maneira a monitorar efetivamente uma quantidade maior de amostras.

#### **5.4.3 Aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética continuada no GS de 305 MVA**

Para exemplificar o processo de estratificação desenvolvido, é utilizado o conjunto de dados do GS de 305 MVA já avaliado neste capítulo. Para iniciar o processo, pode-se tomar a região 1 do histograma de  $P$  da Figura 37 como referência para realizar a 1ª etapa do processo de estratificação do conjunto inicial de dados. Para isso, são filtradas as medidas obtidas quando o GS operou com despacho de  $P$  entre 268 MW à 300 MW, gerando um novo conjunto de dados com 560 amostras. A Figura 39 apresenta uma comparação entre as séries de medições de potência ativa e reativa do conjunto original de dados ( $P_0$  e  $Q_0$ ) e das séries obtidas após a primeira etapa do processo de estratificação ( $P_1$  e  $Q_1$ ). Uma comparação estatística entre estas séries é realizada por meio do desvio padrão  $\sigma$  da série de dados e da sua amplitude ou *range* ( $R$ ), que é definida pela diferença entre o maior e o menor valor da série de dados. A diminuição destes indicadores estatísticos é benéfica para a aplicação dos métodos de gráficos de controle para detecção de faltas, pois permite a detecção de alterações mais sutis de amplitude.

Figura 39. Comparação entre as séries temporais com medições de  $P$  e  $Q$  antes e depois da primeira etapa de estratificação com base em uma faixa limitada de  $P$ .

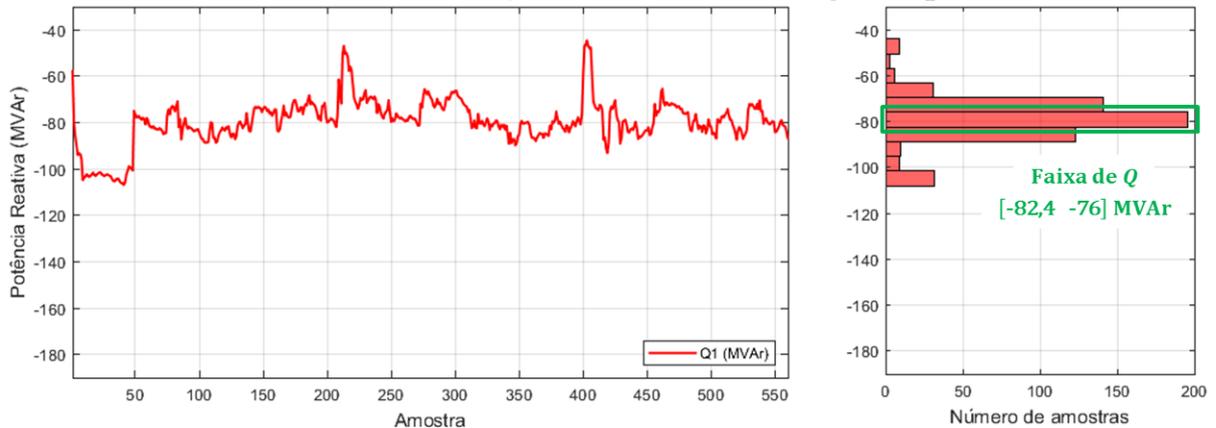


Fonte: Autor.

Para a potência ativa, o conjunto original de dados,  $P_0$ , apresenta  $R$  de 295,8 MW e  $\sigma$  de 106,7 MW. Após a primeira etapa de estratificação, a nova série de dados  $P_1$  apresenta  $R$  de 22,8 MW e  $\sigma$  de 4,6 MW, o que representa uma diminuição substancial destes dois indicadores. Para a potência reativa, a série de dados original  $Q_0$  apresenta  $R$  de 127,8 MVar e  $\sigma$  de 26,6 MVar, enquanto a série  $Q_1$ , resultante da estratificação, apresenta  $R$  de 62,2 MVar e  $\sigma$  de 9,7 MVar. Observa-se também uma redução dos indicadores estatísticos  $R$  e  $\sigma$  de  $Q$ , mesmo o conjunto de dados sendo estratificado com relação à  $P$ .

Uma segunda etapa de estratificação pode ser realizada com relação à  $Q$ , para refinar ainda mais os indicadores estatísticos associados à variabilidade das séries de dados avaliadas. Esta segunda etapa é executada montando um histograma da série  $Q_1$ , resultante da primeira etapa de estratificação, e definindo uma faixa limitada de potência reativa. A Figura 40 ilustra este processo para o conjunto de dados resultante da primeira etapa do processo de estratificação.

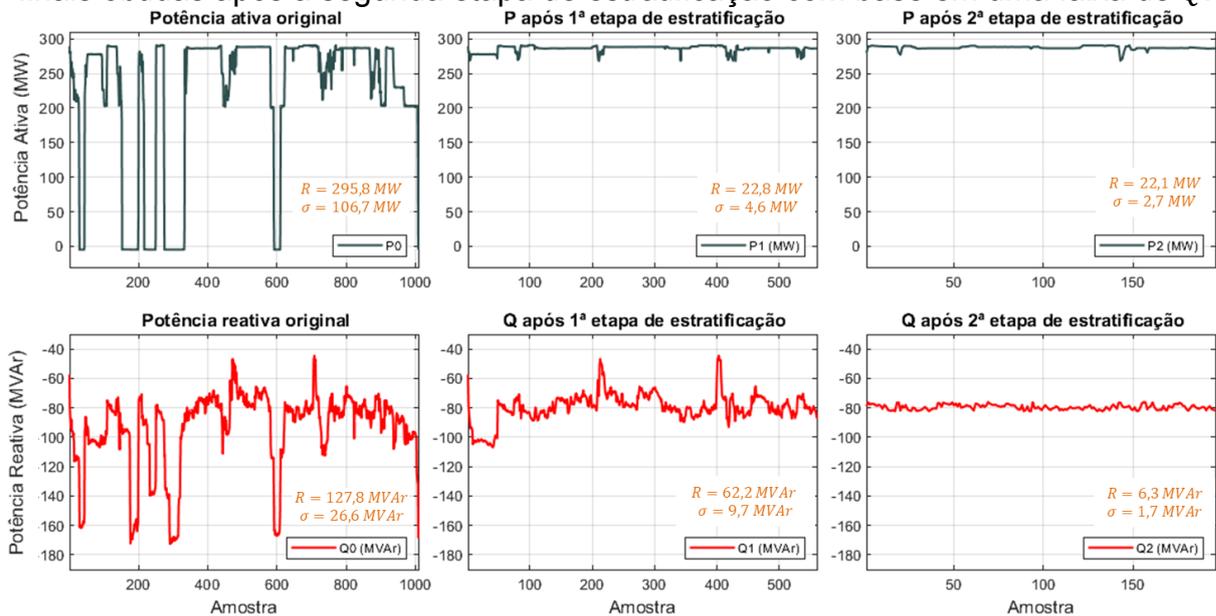
Figura 40. Histograma para definição de regiões de operação com base em faixas limitadas de  $Q$  a partir da série de medições  $Q_1$ .



Fonte: Autor.

A faixa selecionada com maior número de amostras é definida de -82,4 MVar até -76 MVar. O resultado da segunda etapa de estratificação é um conjunto de dados com 196 amostras (aproximadamente 19% das amostras do conjunto inicial). A Figura 41 apresenta uma comparação entre as séries de medições de potência ativa e reativa do conjunto original de dados ( $P_0$  e  $Q_0$ ), das séries obtidas após a primeira etapa do processo de estratificação ( $P_1$  e  $Q_1$ ) e das séries obtidas após a segunda etapa de estratificação ( $P_2$  e  $Q_2$ ). A série resultante  $Q_2$  apresenta  $R$  de 6,3 MVar e  $\sigma$  de 1,7 MVar, apresentando uma redução significativa com relação aos indicadores obtidos para  $Q_1$ . A potência ativa resultante nesta segunda etapa,  $P_2$ , apresenta  $R$  de 22,1 MW e  $\sigma$  de 2,7 MW, também apresenta redução com relação aos indicadores obtidos para  $P_1$ .

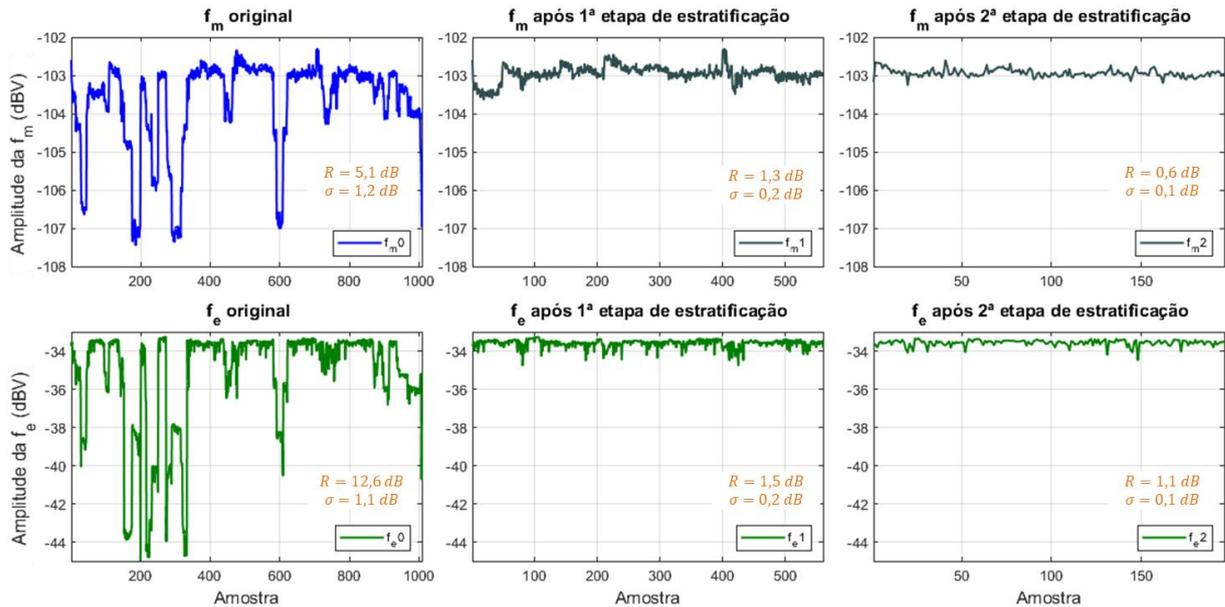
Figura 41. Comparação entre as séries com medições de  $P$  e  $Q$  antes e depois da primeira etapa de estratificação com base em uma faixa limitada de  $P$  e as séries finais obtidas após a segunda etapa de estratificação com base em uma faixa de  $Q$ .



Fonte: Autor.

A redução dos indicadores estatísticos  $R$  e  $\sigma$  nas séries de medidas de  $P$  e  $Q$  após as duas etapas de estratificação tem reflexo na assinatura magnética continuada do GS, como é de se esperar. A Figura 42 apresenta uma comparação entre as séries de amplitudes das componentes  $f_m$  e  $f_e$  do conjunto original de dados ( $f_{m0}$  e  $f_{e0}$ ), das séries obtidas após a primeira etapa do processo de estratificação ( $f_{m1}$  e  $f_{e1}$ ) e das séries obtidas após a segunda etapa de estratificação ( $f_{m2}$  e  $f_{e2}$ ), incluindo os indicadores  $R$  e  $\sigma$ . O resultado do processo de estratificação sobre o histórico de amplitudes da  $f_m$  evidencia a redução de  $R$ , de 5,1 dB na série original ( $f_{m0}$ ) para 1,3 dB após a primeira etapa de estratificação ( $f_{m1}$ ) e para 0,6 dB após a segunda etapa ( $f_{m2}$ ). O  $\sigma$  observado também diminuiu de 1,2 dB em  $f_{m0}$  para 0,2 dB em  $f_{m1}$  e 0,1 dB em  $f_{m2}$ . O histórico de amplitudes de  $f_e$  também apresenta redução de sua variabilidade, com  $R$  diminuindo de 12,6 dB em  $f_{e0}$  para 1,5 dB em  $f_{e1}$  e para 1,1 dB em  $f_{e2}$ ; e  $\sigma$  diminuindo de 1,1 dB em  $f_{e0}$  para 0,2 dB em  $f_{e1}$  e 0,1 dB em  $f_{e2}$ . O mesmo padrão de redução da variabilidade é observado no histórico de amplitudes de diversas componentes harmônicas da  $f_m$ , colaborando para uma monitoração mais sensível e precisa da condição da máquina.

Figura 42. Comparação entre as séries com o histórico de amplitude de  $f_m$  e  $f_e$  durante os dois processos de estratificação do conjunto de medições.



Fonte: Autor.

O resultado do processo de estratificação da assinatura magnética continuada em função de regiões de operação com despacho de potências  $P$  e  $Q$  limitadas permite monitorar as características do campo magnético externo do GS em condições de pequenas perturbações, onde os impactos de faltas incipientes podem ser mais facilmente detectados.

## 5.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foram apresentadas características das alterações típicas do ponto de operação de geradores síncronos, as características das variáveis elétricas que caracterizam o ponto de operação da máquina e o impacto destas alterações sobre a assinatura magnética continuada do GS. A partir das conclusões destas análises, foi proposto um processo para estratificação da assinatura magnética continuada do GS com base em faixas limitadas de geração de potência ativa e reativa, com o objetivo de permitir a monitoração do GS em condições com pequenas alterações do ponto de operação. No capítulo seguinte é apresentada a metodologia para monitoração da assinatura magnética continuada do GS, que agrega as conclusões sobre a influência do ponto de operação levantadas no presente capítulo.

## 6 METODOLOGIA PARA MONITORAÇÃO DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA

Neste capítulo é realizada a especificação de uma metodologia para detecção de alterações do valor médio de séries temporais para aplicação na monitoração da assinatura magnética continuada do GS. Esta metodologia é empregada em um sistema de diagnóstico periódico de máquinas, que permite a avaliação periódica de *datasets* compostos por diferentes períodos de medições, para detecção de alterações instantâneas ou alterações que evoluam lentamente ao longo do tempo.

### 6.1 PREMISSAS BÁSICAS PARA PROPOSIÇÃO DA METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados o contexto do problema e as premissas das principais etapas da metodologia desenvolvida para detecção de alterações no valor médio das séries temporais monitoradas.

#### 6.1.1 Contextualização do problema

A detecção automática de faltas em geradores síncronos por meio da monitoração do campo magnético externo é um processo complexo e multivariável. A monitoração de componentes harmônicas da  $f_m$  do GS até ordens elevadas, necessárias para a detecção de diferentes tipos de faltas, realizada por meio de vários sensores posicionados em locais estratégicos na parte externa do GS, gera *datasets* com centenas ou milhares de séries temporais que devem ser avaliadas e comparadas simultaneamente. Cada uma destas séries apresenta características distintas de estacionariedade e são sensibilizadas em diferentes escalas pelas variações do ponto de operação ou pela ocorrência de faltas que alterem o circuito eletromagnético do GS.

Neste cenário, alterações aleatórias e variações naturais do histórico de amplitude coexistem com as alterações que podem ser originadas por faltas, podendo todas elas sensibilizar os métodos de detecção de anomalias aplicados na monitoração da assinatura magnética continuada.

### 6.1.2 Detecção de alterações no valor médio das amplitude

A etapa inicial deste método é a detecção de alterações na assinatura magnética continuada que possam indicar uma mudança de condição do GS. Com base em constatações experimentais observadas em ensaios de laboratório e em medições de campo magnético externo realizadas em GSs de em usinas hidrelétricas, adotou-se que a avaliação inicial na busca por alterações de amplitude seja individual para cada série temporal associada a um sensor. Esta estratégia é especialmente importante para possibilitar a generalização da avaliação de sinais de sensores instalados em diferentes posições no entorno do GS, os quais podem apresentar diferentes harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas durante a ocorrência de uma falta incipiente. Ademais, esta estratégia favorece a aplicação e a adequação da metodologia proposta para a monitoração de diferentes máquinas, que naturalmente terão assinaturas magnéticas distintas devido às suas geometrias e singularidades das partes elétricas e magnéticas que as compõe.

O tipo de técnica para detecção de anomalias em séries temporais e os parâmetros de detecção que devem ser configurados irão variar de acordo com as características de estacionariedade das séries temporais monitoradas. Neste cenário de especificação, um *trade-off* existe entre a escolha da amplitude de alteração que se deseja detectar e a possível ocorrência de falsos positivos no processo de detecção de faltas. A detecção de pequenas variações de amplitude pode favorecer a detecção de faltas incipientes em um estágio inicial, mas aumenta a incidência de falsos positivos. A detecção de grandes variações de amplitude tem efeito oposto, diminuindo a incidência de falsos positivos e dificultando a detecção de faltas em um estágio inicial (falsos negativos), que apresentem baixa influência sobre assinatura magnética continuada do GS.

Com isso, a escolha do método de detecção de alterações e de seus parâmetros de configuração deve ser realizada de forma a otimizar o *trade-off* descrito, possibilitando a identificação do maior número de séries alteradas possível com uma confiabilidade adequada, ou seja, diminuindo a incidência tanto de falsos positivos quanto de falsos negativos.

### 6.1.3 Indicador global de alterações

As alterações no valor médio detectadas nas séries temporais que compõem a assinatura magnética continuada do GS podem ser originadas pela ocorrência de faltas na máquina, por variações naturais no seu ponto de operação ou pela variabilidade de algumas destas séries (séries não estacionárias) que podem sensibilizar o método de detecção utilizado.

As alterações de tendência de amplitude ocasionadas por faltas podem ocorrer devido às faltas instantâneas, se manifestando na forma de degraus de variação, ou devido a faltas incipientes que evoluam ao longo do tempo, gerando uma mudança lenta de tendência do valor médio de amplitude. As alterações devido a variações do ponto de operação do GS são consideradas alterações naturais e estarão sempre presentes no histórico de amplitudes, conforme investigação apresentada no capítulo anterior. Nestes dois casos, as séries de amplitude alteradas conjuntamente podem apresentar uma correlação forte entre si, conforme constatado no capítulo 5, para alterações de amplitude devido a variações do ponto de operação, e apresentado no capítulo 8, para alterações de amplitude devido a ocorrência de faltas incipientes

As alterações aleatórias que podem sensibilizar os métodos de detecção de alterações e causar falsos positivos no processo de detecção de faltas podem estar associadas à condição não estacionária do histórico da amplitude de algumas componentes harmônicas da  $f_m$  e a instabilidades que podem ocorrer na aquisição destes registros. Os motivos principais para a ocorrência de falsos positivos são i) as harmônicas com amplitudes próximas ao nível do ruído possuem uma maior variância; ii) algumas harmônicas podem ser sensibilizadas mais significativamente por pequenas alterações do ponto de operação, principalmente as de baixa amplitude; iii) as pequenas variações na velocidade com efeitos não totalmente resolvidos pelo processo de rastreamento de harmônicas, principalmente as de baixa amplitude; iv) alterações do nível do ruído, tanto do meio ambiente quanto internamente ao *hardware* do equipamento (Grillo *et al.*, 2022a). Estas causas indesejáveis e aleatórias em um determinado período podem conduzir a uma condição de não estacionariedade para algumas series temporais. Na prática, este comportamento é observado em um grande número de séries do conjunto monitorado ao longo do tempo. Neste caso, a correlação entre as séries com

alteração detectada geralmente é baixa, em virtude da não estacionariedade destas séries temporais detectadas com alteração.

Como já mencionado, a detecção de faltas por meio do campo magnético externo pode ser realizada pela monitoração de milhares de séries temporais com características distintas, onde a ocorrência de falsos positivos, decorrentes de raias com grande variabilidade presentes em aplicações industriais, estará sempre presente em maior ou menor grau, dependente do tratamento dos dados e da configuração da técnica de detecção de anomalias. Uma estratégia validada para contornar este problema em um sistema de monitoração é a concepção de um indicador global de alteração que possa gerar um alerta de evento diante da detecção de um número significativo de séries alteradas em um mesmo período de tempo (janela temporal), de forma correlacionada. A viabilidade desta estratégia foi constatada por meio da observação do comportamento do histórico de amplitudes da  $f_m$  de GSs, onde se observa que a ocorrência de faltas ou a variação do ponto de operação da máquina geram alteração simultânea de todas as raias sensibilizadas, com um elevado grau de correlação entre si. Assim, é apresentada neste capítulo uma estratégia para realizar o processamento de obtenção do valor deste indicador.

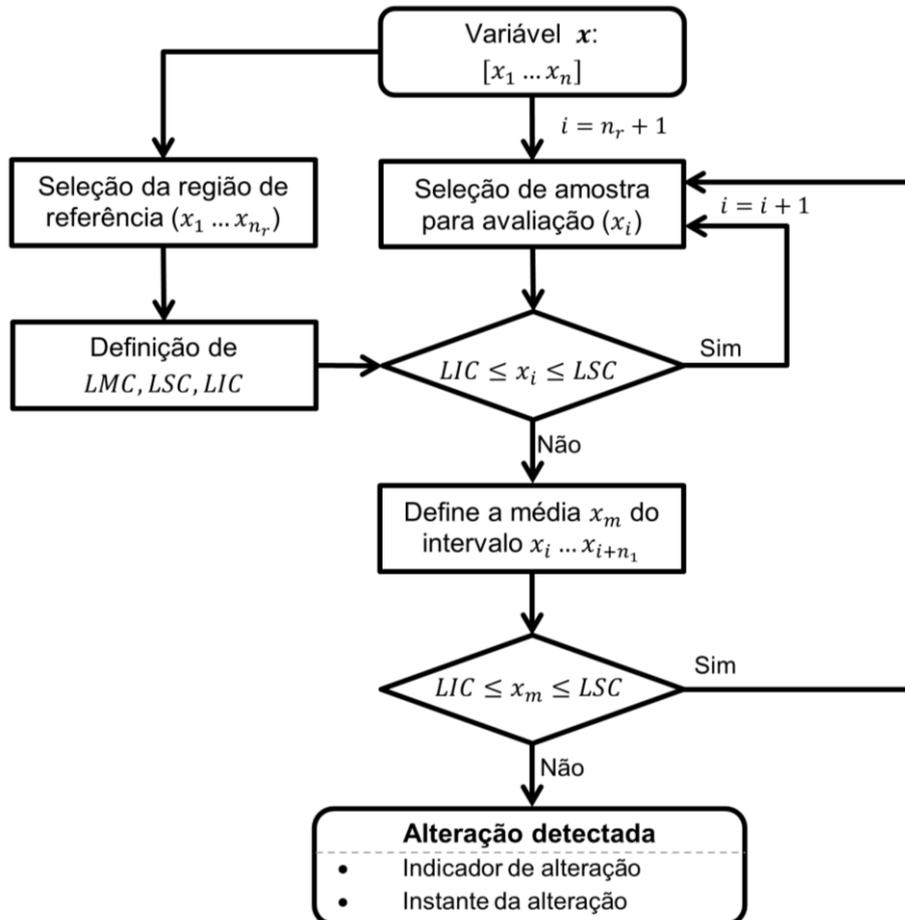
## 6.2 MÉTODO PARA DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES NO VALOR MÉDIO

A metodologia desenvolvida para detecção de alterações no valor médio nas séries temporais que compõe a assinatura magnética continuada de GSs é concebida para avaliar todo o *dataset* ou os conjuntos de medidas obtidos por cada sensor instalado para monitorar o GS. Para realizar esta avaliação, cada série de dados do conjunto é monitorada individualmente, buscando-se alterações no valor médio por meio de uma das técnicas de gráficos de controle apresentadas no capítulo 4. Por fim, um indicador global de alteração é gerado para avaliar a correlação das séries detectadas com alteração, de maneira a fornecer um alerta único e minimizar a ocorrência de falsos positivos no processo de detecção de faltas.

O método proposto para detecção de alterações do valor médio de séries temporais é apresentado com base na técnica de gráficos de controle de Shewhart. Nesta estratégia, um valor individual fora da região de controle não é suficiente para constatar a alteração, mas coloca o sistema em estado de alerta para avaliar as

amostras seguintes do conjunto. A Figura 43 ilustra a arquitetura de implementação da técnica de gráficos de controle aplicada a uma variável genérica  $x$ . Nesta técnica, os limites de controle são definidos a partir de uma região de referência com  $n_r$  amostras, que caracterize uma condição estacionária da variável. Na sequência, as demais amostras são avaliadas. No caso de violação de algum limite de controle, é avaliada a média de um número  $n_1$  de amostras consecutivas à amostra em alerta: se este valor médio estiver dentro dos limites de controle, o processo continua, caracterizando a amostra que gerou o alerta como um *outlier*. Se este valor médio violar o limite de controle, é gerado o indicativo de alteração permanente, caracterizando uma alteração do valor médio da variável. Este processo pode ser utilizado na avaliação de uma série com período limitado ou pode ser repetido continuamente ao longo do tempo, utilizando uma região de referência estacionária após cada alteração detectada e repetindo o processo do fluxograma da Figura 43.

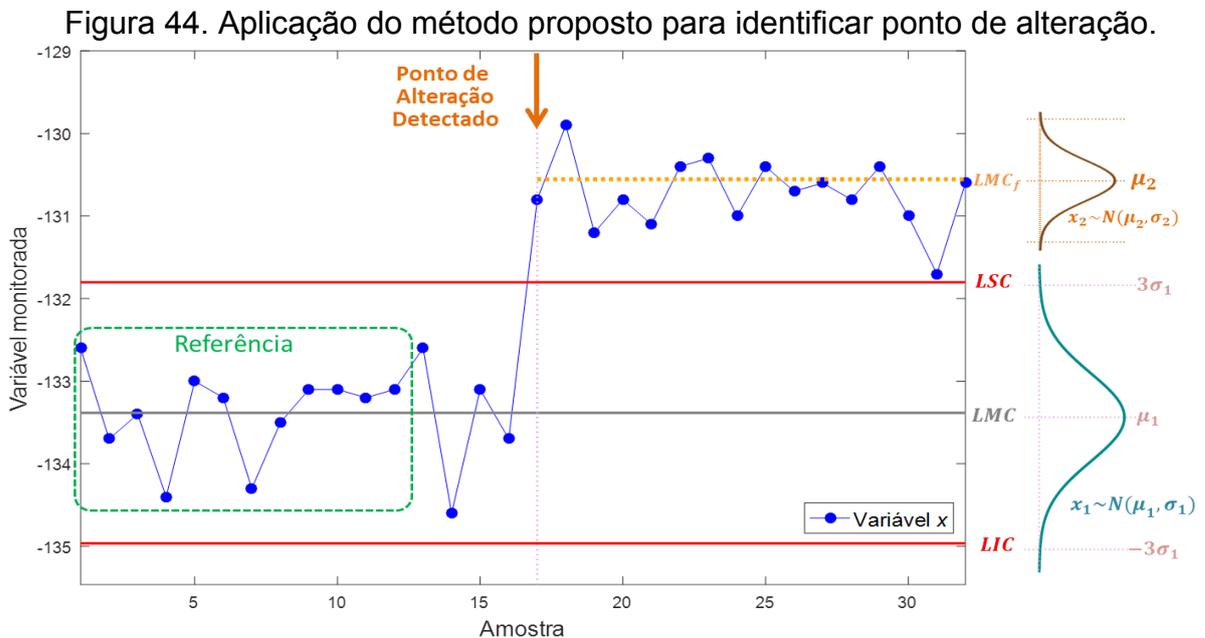
Figura 43. Fluxograma para aplicação do método de gráficos de controle Shewhart.



Fonte: Autor.

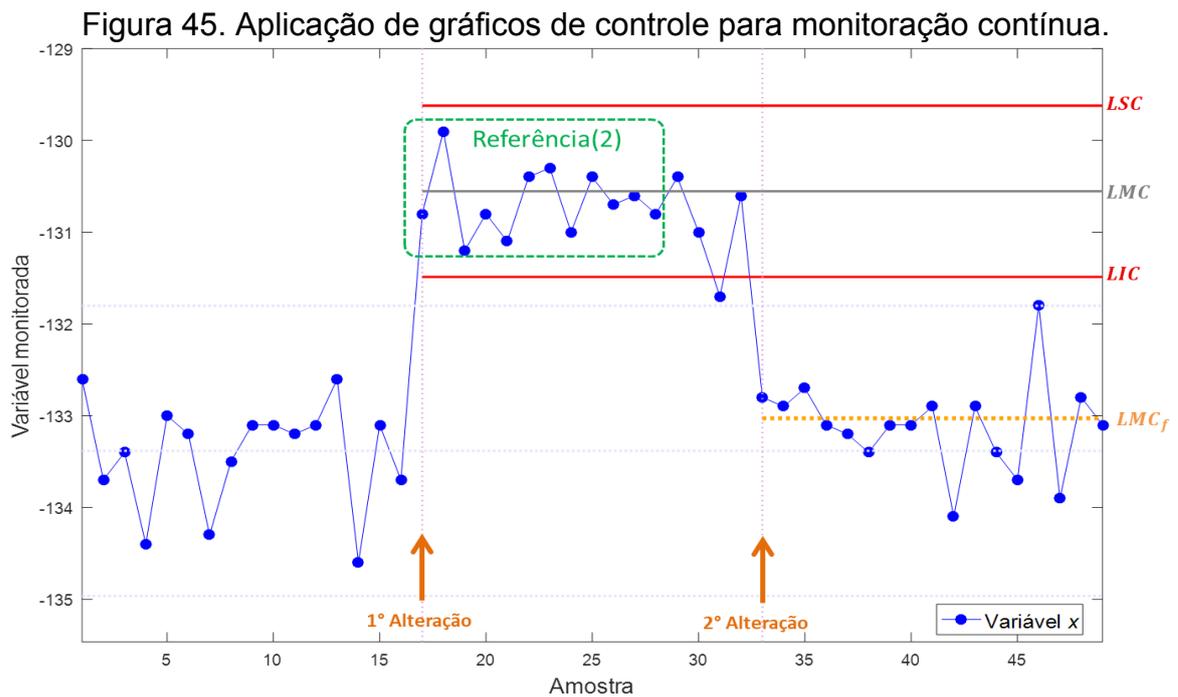
O indicador de alteração individual de cada série deve expressar se houve ou não a detecção de uma alteração permanente no valor médio e, em caso afirmativo, indicar o instante de detecção de tal alteração.

A Figura 44 mostra a aplicação da técnica de gráficos de controle sobre a série temporal que representa o histórico de amplitudes de uma componente harmônica da  $f_m$  de um GS diante da imposição controlada de uma falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator em um ensaio experimental em laboratório. São realizadas as indicações da região de referência (utilizada para estimar a  $\mu_1$  e o  $\sigma_1$ ) e do ponto de alteração detectado pelo método, assim como o valor médio final ( $LMC_f$ ) da amplitude após a alteração detectada.



Uma das aplicações possíveis desta técnica é a monitoração contínua de séries temporais, o que permite a detecção de alterações sucessivas ao longo do tempo. Para realizar a monitoração contínua da série temporal tomada como exemplo, após a detecção de uma alteração do valor médio, a região de referência é alterada para um intervalo estacionário (próximo a uma condição de regime permanente) após a ocorrência da alteração, que possa ser aproximado por uma distribuição normal caracterizada por uma nova média e desvio-padrão ( $\mu_2$  e  $\sigma_2$ ). Com base nesta nova referência, são atualizados a linha média central e os limites de controle, como apresentado na Figura 45, possibilitando a detecção de novos

eventos onde o valor médio da variável possa ser novamente alterado. Neste exemplo, após a imposição da falta, o GS opera por alguns instantes com a falta imposta mantendo o valor médio da amplitude da componente harmônica monitorada em um patamar  $LMC_f$ . Na sequência, a falta é removida de modo que o GS volta a operar em sua condição sadia, sendo gerado um novo alerta de alteração da série temporal.

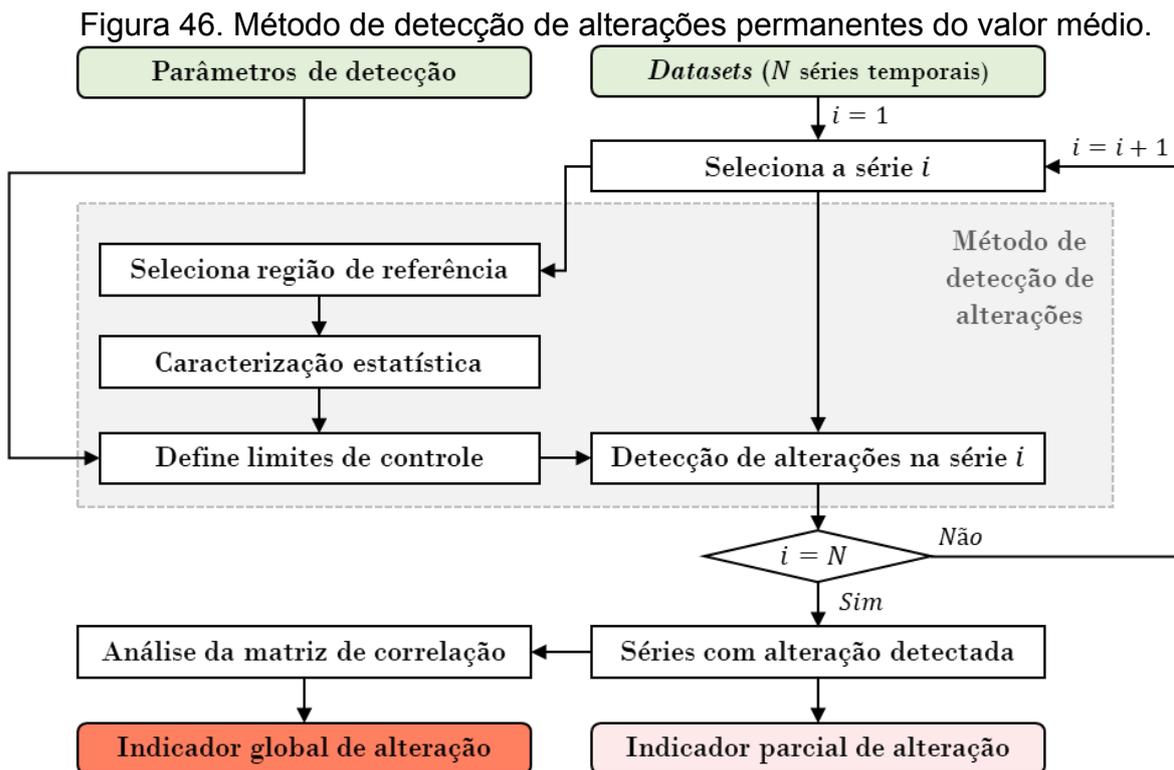


Fonte: Autor.

A avaliação da assinatura magnética continuada de um GS, composta pelo conjunto de séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  monitoradas por um sensor, pode ser realizada aplicando a técnica de detecção de alterações apresentado na Figura 43 em cada uma das séries individualmente.

A Figura 46 apresenta o fluxograma do método de detecção de alterações no valor médio desenvolvido com base na técnica de gráficos de controle. Neste fluxograma, o *dataset* analisado é composto por  $N$  séries temporais, correspondentes ao histórico de amplitudes da  $f_m$  e de suas  $N - 1$  harmônicas monitoradas. Cada série temporal  $i$  é avaliada individualmente pelo método de detecção de alterações, que busca alterações permanentes do valor médio. Para realizar esta ação, uma região de referência em regime estacionário é selecionada para extração das características estatísticas que definem as condições de

normalidade de cada série. Com as características estatísticas e os parâmetros de detecção do gráfico de controle especificados, a região de controle de cada série é definida pelo cômputo dos limites de controle. Por meio destes limites, as amostras da série temporal são avaliadas com relação à sua região de controle para a detecção de alterações no valor médio, seguindo o fluxograma apresentado na Figura 43. No caso de detecção de uma alteração, a série temporal alterada gera um indicador de alteração individual, que é utilizado para a geração de um indicador parcial de alteração do *dataset* associado a um sensor, que forma a primeira saída do método proposto. Por fim, uma análise de correlação das séries com alteração detectada é realizada para gerar um alarme de evento chamado indicador global de alteração, no caso de haver uma associação entre as séries alteradas. As representações e cômputo destes indicadores são apresentados na sequência.



Fonte: Autor.

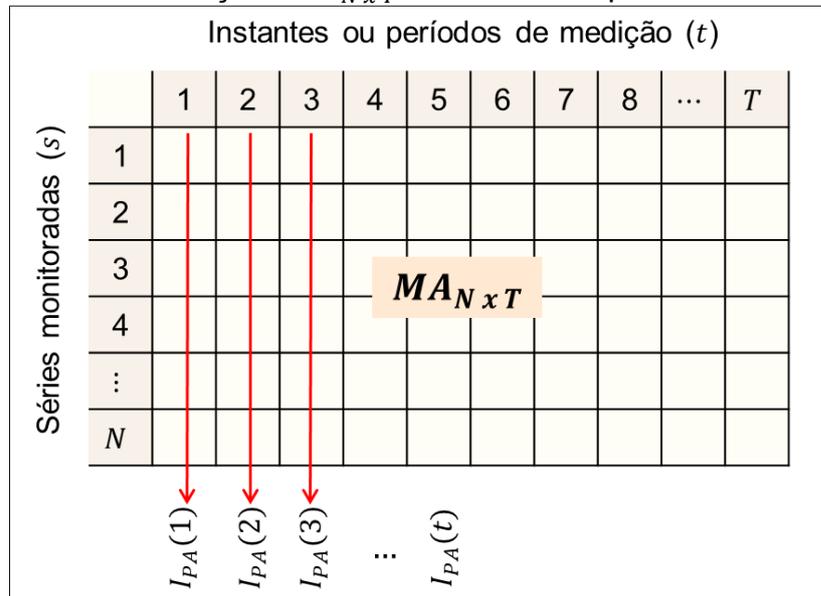
A saída do método de detecção de alterações pode ser representada por uma matriz de alterações  $MA$ , de ordem  $N \times T$ , onde  $N$  é o número de séries monitoradas e  $T$  é o número de instantes ou períodos de medição. Os elementos desta matriz são os indicadores individuais de alteração de cada série temporal avaliada. De maneira simplificada, pode-se atribuir  $MA_{s \times t} = 1$  se ocorrer a detecção

de uma alteração no instante (ou período)  $t$  da série  $s$ , onde  $1 \leq s \leq N$ , e  $MA_{s \times t} = 0$  se não for detectada uma alteração. A análise desta matriz permite identificar as séries com alteração detectada. O indicador parcial de alteração ( $I_{PA}$ ) do *dataset* é um indicador periódico no tempo, definido pela soma das séries detectadas com alteração (soma dos indicadores individuais de alteração) a cada instante ou a cada período de tempo  $t$ . O  $I_{PA}(t)$  pode ser obtido a partir da matriz de alterações por

$$I_{PA}(t) = \sum_{i=1}^N MA(i, t) \quad (33)$$

que representa a soma de todos os elementos de uma coluna (instante ou período de medição), contabilizando o número de séries detectadas com alteração. Se o *dataset* não contiver alterações em nenhuma de suas séries de dados, o  $I_{PA}$  permanece nulo. No caso da ocorrência de um evento que altere a amplitude de algumas séries, o  $I_{PA}$  contabiliza as séries alteradas e detectadas a cada instante ou período de tempo, de acordo com a aplicação. A Figura 47 apresenta graficamente uma matriz  $MA$  genérica, sendo também indicados os indicadores  $I_{PA}(t)$  obtidos a cada instante  $t$ .

Figura 47. Matriz de alterações  $MA_{N \times T}$  e indicadores parciais de alteração  $I_{PA}(t)$ .



Fonte: Autor.

Quando o indicador parcial de alteração não for nulo, uma avaliação complementar é realizada por meio da análise de correlação entre as séries detectadas com alteração. Esta análise é realizada por meio do computo da matriz

de correlação entre as séries detectadas com anomalia pelo  $I_{PA}(t)$ . A matriz de correlação ( $M_\rho$ ), para um conjunto de  $n$  séries temporais com alteração detectada, é definida por

$$M_\rho = \begin{bmatrix} \rho_{11} & \rho_{12} & \cdots & \rho_{1n} \\ \rho_{21} & \rho_{22} & \cdots & \rho_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \rho_{n1} & \rho_{n2} & \cdots & \rho_{nn} \end{bmatrix} \quad (34)$$

onde cada elemento  $\rho_{xy}$  é o módulo do coeficiente de correlação de Pearson (29) entre as séries temporais  $x$  e  $y$ .

A métrica proposta para avaliar a matriz de correlação entre as séries temporais do conjunto  $n$  é a média  $\overline{M_\rho}$  definida por

$$\overline{M_\rho} = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \rho_{ij} - \sum_{i=1}^n \rho_{ii}}{n^2 - n} \quad (35)$$

que representa a média dos coeficientes de correlação da matriz  $M_\rho$ . Os elementos da diagonal principal são excluídos, pois caracterizam a autocorrelação de cada série apresentando sempre um  $\rho$  unitário. Um coeficiente de correlação forte ( $\rho > 0,7$ ) para este índice confere ao conjunto de séries avaliadas um grau de associação suficiente para inferir que as alterações detectadas são provocadas pelo mesmo fenômeno.

Admitindo que o processo de detecção de alterações possa ainda apresentar falsos positivos e detectar alterações aleatórias em séries que não estejam associadas à ocorrência de uma falta, por exemplo, pode-se refinar também a métrica  $\overline{M_\rho}$  excluindo do conjunto as séries temporais com um baixo coeficiente de correlação. Para identificar os falsos positivos por meio da matriz de correlação  $M_\rho$ , para cada coluna  $k$ , a média dos coeficientes de correlação é avaliada excluindo o elemento de autocorrelação ( $\rho_{kk}$ ). Esta média representa a correlação entre a série temporal  $k$  com as demais séries do conjunto. As séries com menor média de correlação com as demais são retiradas do conjunto analisado de maneira a elevar a métrica  $\overline{M_\rho}$ . Este procedimento é aplicado apenas nas situações em que não se atinge o valor  $\overline{M_\rho} \geq 0,7$ , pois pode haver a ocorrência de falsos positivos junto com o conjunto de raias sensibilizadas de forma correlacionada por um evento como a ocorrência de uma falta incipiente.

Havendo pontos de  $I_{PA}(t)$  não nulos com  $\overline{M_\rho} \geq 0,7$ , gera-se um alerta chamado de indicador global de alteração ( $I_{GA}$ ) como indicado em

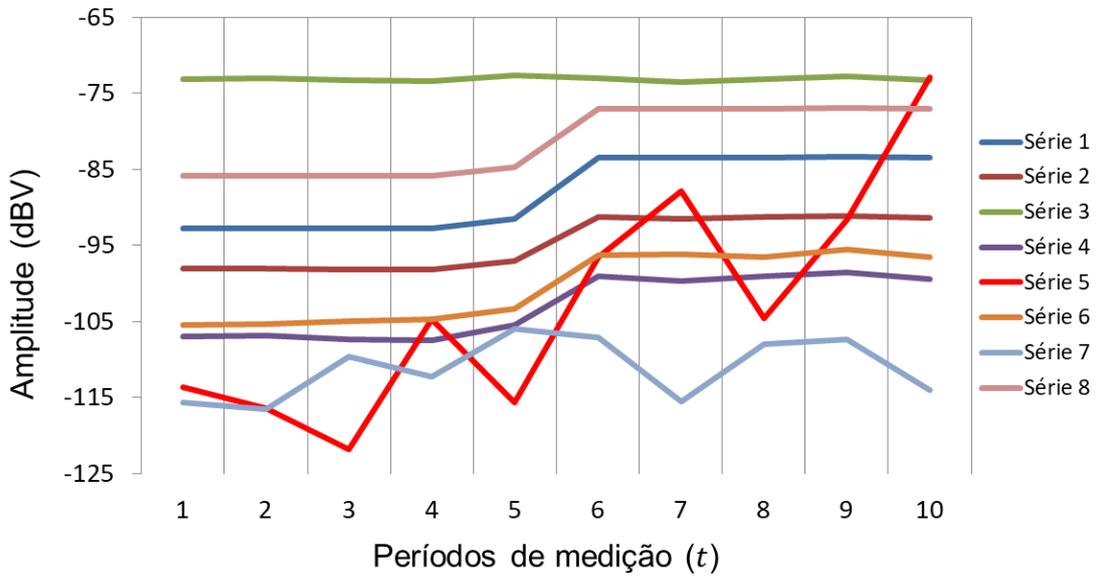
$$I_{GA}(t) = \begin{cases} 0 & \text{se } I_{PA}(t) < 0,01N \\ 0 & \text{se } \overline{M}_\rho < 0,7 \\ 1 & \text{se } \overline{M}_\rho \geq 0,7 \end{cases} \quad (36)$$

O indicador  $I_{GA}$  pode ser usado como um alerta de alteração em um instante ou período de amostras onde um conjunto de séries altere de forma correlacionada. Para este indicador existir, observou-se a necessidade definir um conjunto mínimo de séries alteradas para a geração do alarme, de maneira que uma única série alterada, ou um conjunto limitado de séries alteradas e eventualmente correlacionadas, não seja suficiente para gerar alertas de eventos. Em (36) indicou-se 1% do total de séries monitoradas ( $N$ ) para a definição do conjunto mínimo de séries alteradas para a geração do alarme.

O  $I_{GA}$  é útil para aplicações práticas de monitoração da condição em que são avaliados os *datasets* obtidos por meio de vários sensores instalados em cada GS de uma planta de geração de energia elétrica. Nestas condições, onde podem ser necessárias as análises de dezenas de conjuntos de dados simultaneamente, um alarme de evento automático como o  $I_{GA}$  pode ajudar os especialistas a identificar de maneira rápida e assertiva os períodos de alteração da assinatura magnética continuada do GS e a avaliar estes eventos.

Um exemplo de aplicação desta metodologia de detecção de alterações do valor médio da assinatura magnética continuada é apresentado por meio da avaliação de um conjunto reduzido de oito séries temporais com o histórico de amplitudes de harmônicas da  $f_m$  obtidas por meio da medição do campo magnético externo do GS de 8 polos ao longo de dez períodos de tempo (10 amostras), como apresentado na Figura 48. As medições foram realizadas em um ensaio experimental com o GS operando com ponto de operação aproximadamente constante, para limitar a influência das variações de operação sobre a assinatura magnética continuada. Neste conjunto de medições foi imposta uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor no instante 6, provocando alterações de amplitude nas séries 1, 2, 4, 6 e 8. Neste exemplo, a série 3 não sofre influência da falta e as séries 5 e 7 apresentam variações aleatórias de amplitude, não estando associadas com a imposição da falta. Estas séries foram selecionadas e representadas em um curto período de medição apenas para ilustrar o funcionamento do método proposto em uma aplicação experimental.

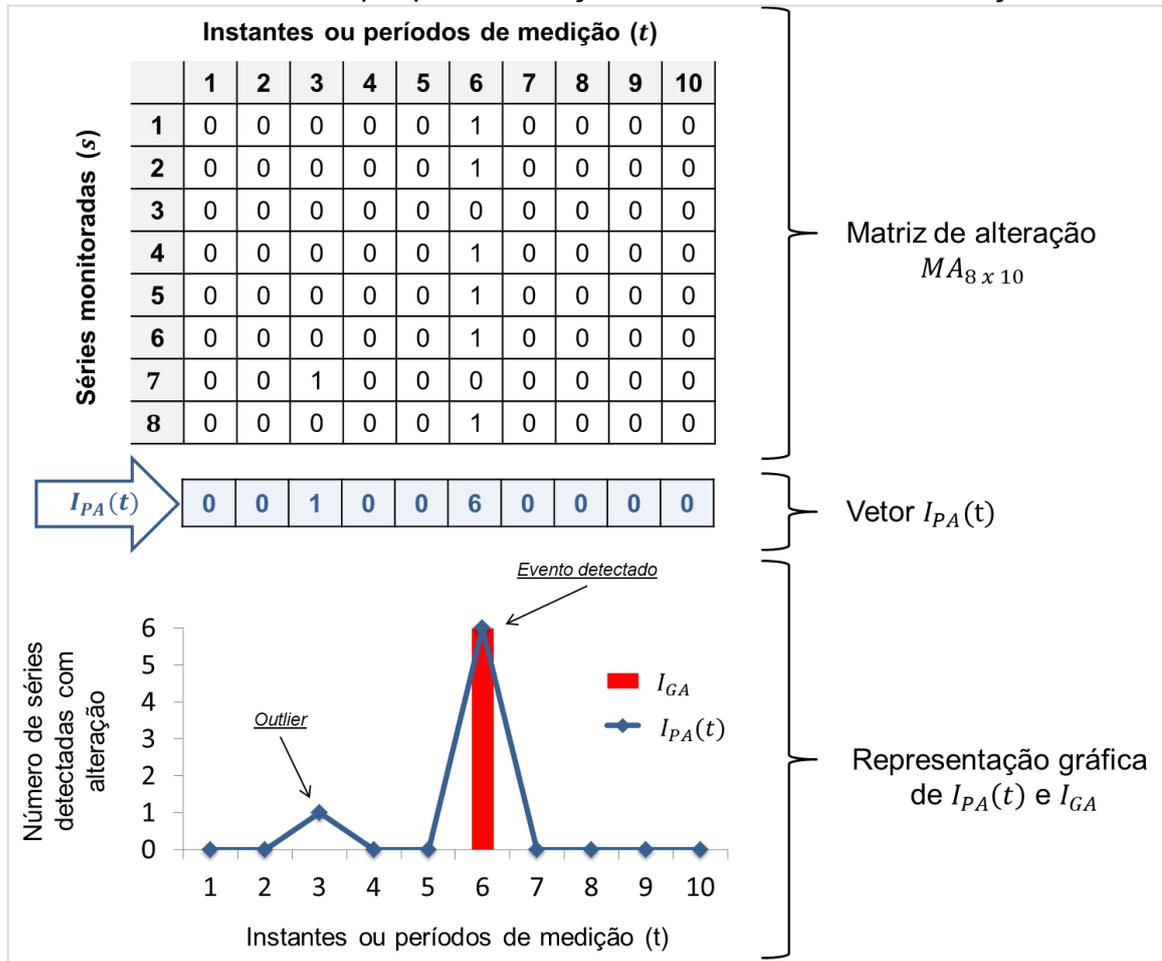
Figura 48. *Dataset* com algumas séries contendo o histórico de amplitudes da  $f_m$  diante da ocorrência de uma falta incipiente em um GS.



Fonte: Autor.

A resposta da aplicação deste conjunto de dados na metodologia desenvolvida é apresentada na Figura 49, onde foi configurando o método para detectar alterações no valor médio superiores a  $3\sigma$ . Esta figura trás a representação da matriz de alteração e dos indicadores  $I_{PA}(t)$  e  $I_{GA}$ . A matriz  $MA_{N \times T}$  representa 8 séries temporais ( $N = 8$ ) sendo monitoradas em 10 instantes de tempo ( $T = 10$ ), com valores 0 para condição estacionária e 1 para alteração do valor médio detectada. As séries 1, 2, 4, 5, 6 e 8 tiveram alterações detectadas no instante  $t = 6$ , que corresponde ao período de imposição da falta. A série 3 apresentou uma alteração detectada no instante  $t = 3$ , correspondendo a um *outlier* no processo de detecção de faltas. Estas alterações detectadas são apresentadas na matriz de correlação  $MA$ , onde se atribui o valor 1 no instante de detecção de alteração em cada série. O vetor  $I_{PA}(t)$  contabiliza as alterações em cada instante de tempo, evidenciando o *outlier* no processo de detecção de faltas em  $t = 3$  e as seis séries detectadas com alteração em  $t = 6$ . O gráfico apresentado ilustra a evolução do indicador  $I_{PA}(t)$  e o alerta  $I_{GA}$  no ponto de detecção do evento.

Figura 49. Exemplo de aplicação do método de detecção de alterações em um *dataset* de exemplo para ilustração dos indicadores de alteração.

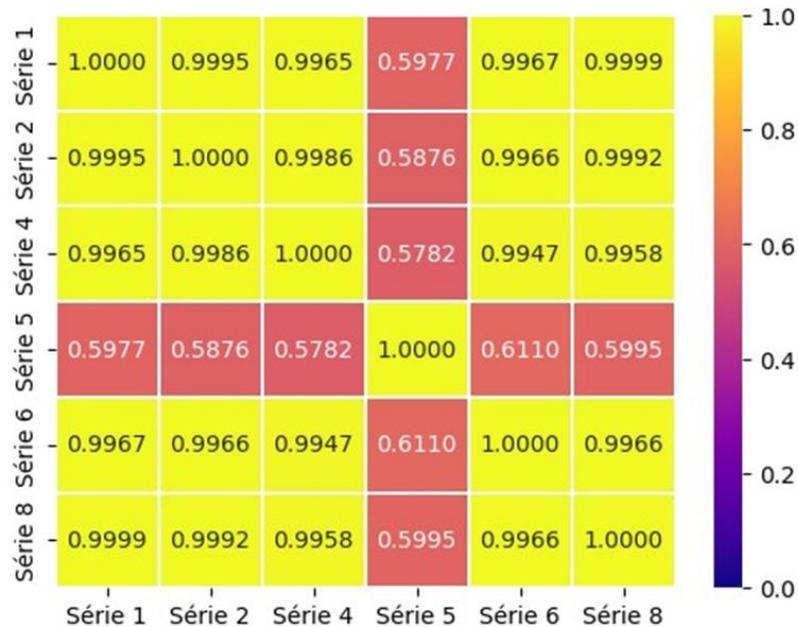


Fonte: Autor.

O indicador global de alteração é gerado por meio da avaliação da matriz de correlação entre as séries detectadas com alteração pelo  $I_{PA}(6) = 6$ . A Figura 50 apresenta o correlograma com a matriz de correlação, associada a um gráfico de calor, referente as series detectadas com alteração em  $t = 6$ . Observa-se que as séries 1, 2, 4, 6 e 8 apresentam forte correlação entre si, aos pares. A série 5 apresenta baixa correlação com as demais séries, com  $\rho < 0,7$ . Para esta matriz obteve-se  $\overline{M}_\rho \cong 0,86$ , mesmo com a presença de uma série não estacionária que foi detectada com alteração junto a este conjunto. Uma métrica  $\overline{M}_\rho > 0,7$  neste conjunto gera a existência do alarme  $I_{GA}(t)$ , como ilustrado no gráfico da Figura 49. Com relação à métrica  $\overline{M}_\rho$ , a exclusão da série 5 do conjunto de séries detectadas com alteração, avaliadas pelo correlograma da Figura 50, faz com que o  $\overline{M}_\rho$  aumente de 0,86 para 0,99, melhorando consideravelmente o grau de correlação

linear entre as séries restantes detectadas com alteração. Este procedimento pode ser utilizado para refinar um conjunto de séries com forte correlação entre si que podem ser associadas à ocorrência de um mesmo evento de alteração da assinatura magnética da máquina.

Figura 50. Correlograma mostrando a matriz de correlação entre as séries detectadas com alteração no exemplo proposto.



Fonte: Autor.

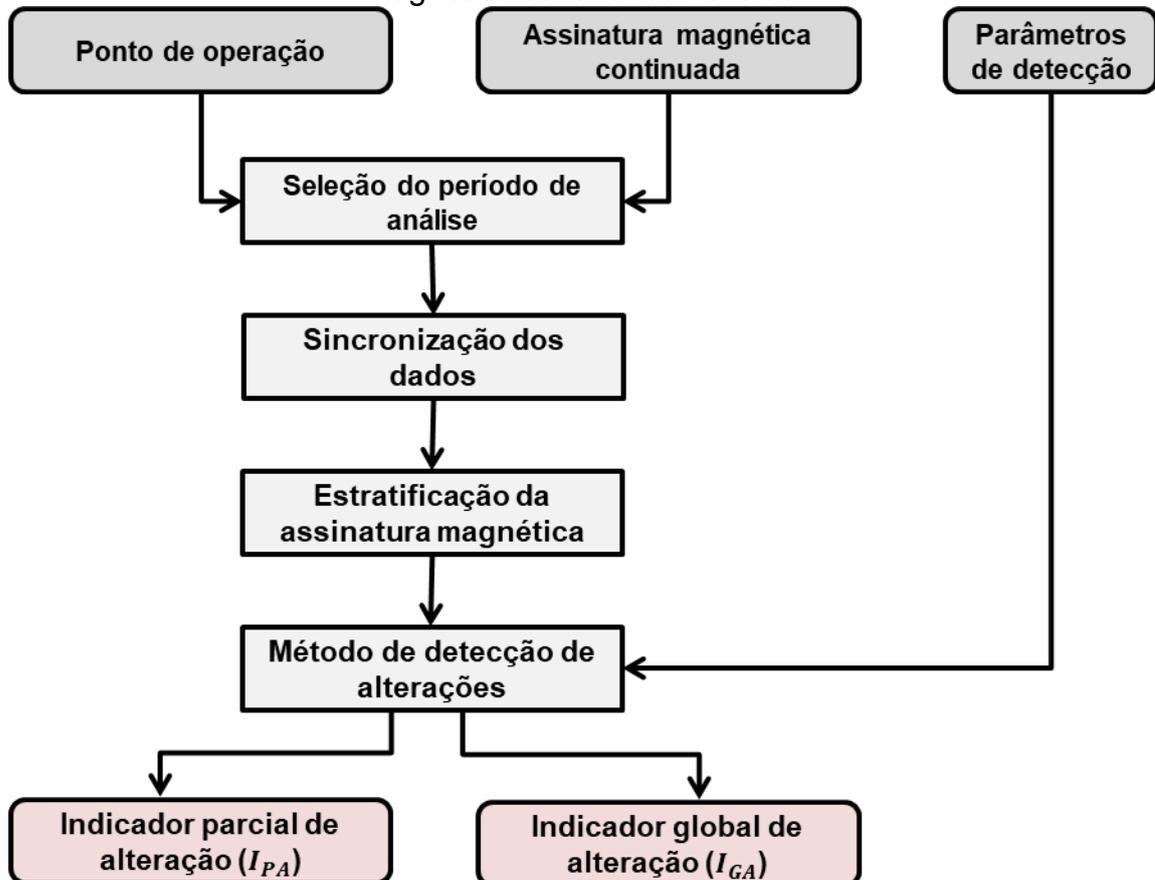
### 6.3 METODOLOGIA PARA AVALIAÇÃO PERIÓDICA DA ASSINATURA MAGNÉTICA

A evolução de uma falta incipiente pode ocorrer em diferentes intervalos de tempo, desde períodos de poucas horas até períodos de dias, semanas ou meses. A influência destas faltas sobre a assinatura magnética continuada pode ser não detectável no início do período de sua evolução. Neste contexto, é necessário avaliar a assinatura magnética do GS periodicamente em diferentes intervalos de tempo, de maneira a otimizar a detecção da evolução de faltas incipientes.

A metodologia para avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs desenvolvida nesta tese é representada pelo fluxograma apresentado na Figura 51. As entradas desde sistema são o *dataset* composto pela assinatura magnética continuada, monitorada por cada sensor, e o *dataset* com as séries de medições de grandezas elétricas que representam o ponto de operação, além dos

parâmetros de detecção necessários para configurar a técnica de gráficos de controle. As grandezas elétricas utilizadas para caracterizar o ponto de operação do GS são a potência ativa e a potência reativa, como definido no capítulo 5. A partir da leitura destes *datasets*, é realizada a seleção do período de análise, que pode ser de horas, dias, semanas ou meses de acordo com a programação da monitoração periódica e do período de medições disponível para análise. Na sequência, uma etapa de sincronização é realizada entre as séries de dados da assinatura magnética continuada e das séries de medições das grandezas elétricas, no caso de estas séries não serem armazenadas de maneira sincronizada. Esta etapa é necessária pelo fato das medições das grandezas elétricas serem realizadas, em geral, pelo sistema supervisor da usina que pode armazenar estas medidas de maneira não sincronizada com as medições do campo magnético externo obtidas pelo equipamento de monitoração da assinatura magnética continuada do GS.

Figura 51. Fluxograma da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs.



Fonte: Autor.

Uma vez garantida a sincronização entre as séries temporais de entrada, é realizado o processo de estratificação da assinatura magnética com base em faixas de  $P$  e  $Q$  limitadas, para minimizar a influência das variações de despacho de potência sobre a assinatura magnética continuada no conjunto de dados resultante. Este procedimento pode ser realizado pelo processo de estratificação da assinatura magnética continuada apresentado na seção 5.4.1 e representado pelo fluxograma da Figura 38. Por fim, o método de detecções de alterações no valor médio apresentado no fluxograma da Figura 46 é aplicado nas séries temporais resultantes do processo de estratificação, gerando o indicador parcial de alterações  $I_{PA}(t)$  e, se houver, um indicado global de alteração  $I_{GA}$  no caso de identificação de eventos.

A sequência de processamento para avaliação da assinatura magnética continuada apresentada na Figura 51 deve ser aplicada na avaliação dos *datasets* obtidos em cada sensor utilizado para medir o campo magnético externo no GS monitorado. A alteração dos parâmetros de detecção pode ser realizada para ajustar as regiões de normalidade utilizadas pelos gráficos de controle em cada série de dados e, assim, ajustar a amplitude de alteração que o método está detectando.

Este sistema incorpora o processo de estratificação da assinatura magnética continuada e o método de detecção de alterações no valor médio das séries temporais resultantes, permitindo detectar alterações que apresentem grande probabilidade de associação com a ocorrência de uma falta incipiente. A validação deste sistema é apresentada no capítulo 7, onde o sistema proposto é utilizado na análise de dados experimentais, medidos no GS de 10 kVA em laboratório, e de dados medidos no GS de 305 MVA em uma usina hidrelétrica.

#### 6.4 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi apresentada um método para detecção de alterações no valor médio da assinatura magnética continuada do GS. A partir deste método, foi proposta uma metodologia para avaliação periódica da assinatura magnética continuada do GS, que permite a detecção de faltas estabelecidas ou incipientes. Esta metodologia incorpora a leitura das grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação da máquina, permitindo minimizar falsos positivos no processo de detecção de faltas por meio da monitoração da assinatura magnética continuada obtida pela medição do campo magnético externo do GS. O capítulo seguinte

apresenta a validação e os resultados obtidos com o método de detecção de alterações no valor médio em séries temporais e com a metodologia para avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs. Para isto, esta metodologia foi aplicada na avaliação de medidas obtidas tanto no GS de 10 KVA, em ensaios experimentais, quanto no GS de 305 MVA, operando em uma usina hidrelétrica.

## 7 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos com a aplicação das técnicas de detecção de anomalias em *datasets* formados tanto por dados sintéticos, obtidos por simulação computacional, quanto por dados obtidos por meio de ensaios experimentais com a imposição controlada de faltas no GS de 10 kVA. Nesta aplicação, avalia-se de maneira comparativa as técnicas de gráficos de controle apresentadas no capítulo 4 com estes conjuntos de dados, além de aplicar o método de detecção de alterações no valor médio em um conjunto de dados obtidos em ensaios experimentais com a imposição controlada de diferentes tipos de faltas em diferentes condições de operação, para levantamento de padrões de falta. Além disso, *datasets* com medidas do campo magnético externo do GS de 10 kVA obtidas em ensaios com variação do ponto de operação da máquina são avaliados, permitindo a complementação das constatações apresentadas no capítulo 5 sobre a influência de variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada de GSs.

Por fim, são apresentados os resultados de aplicação da metodologia para avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs. Esta avaliação é realizada utilizando *datasets* com medidas de  $P$  e  $Q$  e com a assinatura magnética continuada obtida por medições do campo magnético externo no GS de 10 kVA, em ensaios experimentais, e no GS de 305 MVA, operando em uma usina hidrelétrica.

A apresentação e discussão dos resultados são conduzidas em dois segmentos, de maneira paralela. O primeiro busca avaliar o método de detecção de alterações e a metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada em diferentes cenários de aplicação, verificando o desempenho destas estratégias na detecção de faltas conhecidas *a priori*. O segundo segmento trata da interpretação das características físicas do processo avaliado, com o objetivo de identificar padrões evidenciados pelos resultados obtidos por meio da aplicação das técnicas utilizadas na monitoração de GSs.

### 7.1 COMPARAÇÃO ENTRE AS TÉCNICAS DE DETECÇÃO DE ANOMALIAS

A comparação entre as quatro técnicas analíticas de detecção de anomalias em séries temporais, associadas ao método de gráficos de controle e apresentadas

no capítulo 4, é realizada por meio de sua aplicação na avaliação de dados sintéticos simulados com imposição de faltas e dados de ensaios de laboratório com a imposição controlada de faltas no GS de 10 kVA operando em sincronismo com a rede elétrica comercial de baixa tensão (nível de distribuição). Os dados sintéticos são simulados com e sem ruído, tendo como única alteração relevante a imposição da falta simulada. Os dados de ensaios são obtidos com o GS operando em regime, com o ponto de operação aproximadamente constante, de modo que as alterações relevantes na assinatura magnética continuada sejam consequência da imposição da falta.

Nestes *datasets*, sabe-se *a priori* a região onde é simulada ou imposta a falta, permitindo avaliar as alterações detectadas como verdadeiros positivos ou falsos positivos. As alterações detectadas na região de ocorrência da falta são classificadas como verdadeiros positivos, sendo então uma consequência da falta, e as alterações fora desta região são classificadas como falsos positivos, decorrente da sensibilidade do método com o ruído ou com a variabilidade da série temporal que gerou o falso alarme.

### 7.1.1 Resultados obtidos com dados sintéticos

As técnicas de detecção de anomalias têm seus desempenhos avaliados, inicialmente, por meio de sua aplicação na análise de dados sintéticos obtidos por meio da simulação analítica do GS com frequência fundamental mecânica de 15 Hz. Para a análise espectral, foram selecionadas 135 componentes múltiplas da  $f_m$ , de 15 Hz a 2025 Hz, para acompanhamento do histórico de amplitudes e obtenção da assinatura magnética continuada. A composição deste histórico foi realizada simulando o modelo analítico (Aurich, 2022) 3000 vezes, de maneira a gerar arquivos históricos com este mesmo número de registros.

Nestas simulações, foram impostas faltas de rotor e de estator, aplicadas gradualmente entre as amostras 1000 e 2000 (isto é, sua intensidade aumentou ao longo do tempo de maneira gradual). As faltas de rotor foram simuladas com a diminuição da amplitude de um dos polos do rotor, sendo testados dois graus de alteração, diminuindo a amplitude do polo alterado em 5% (denominada falta tipo II) e em 20% (denominada falta tipo I). Foi também simulada uma falta de estator diminuindo a permeância em um dos dentes do estator. Com relação à aplicação de

ruído nas simulações, cada um dos três casos foi simulado nas condições sem ruído, com ruído na frequência de operação e com ruído aleatório aplicado ao sinal fornecido pelo modelo analítico. Assim, foram gerados 12 conjuntos de dados, cada um contendo 135 séries temporais de 3000 amostras.

As três faltas simuladas têm intensidades de alteração distintas sobre as amplitudes do espectro de frequências do sinal. As faltas de rotor apresentam alterações com maior variação de amplitude nas harmônicas, proporcionais ao grau de alteração imposto (5% ou 20%). A falta de estator apresenta variações mais sutis, em geral apresentando baixas variações de amplitude em comparação com a falta de rotor. Os gráficos de controle foram configurados para detectar alterações de amplitude de aproximadamente  $2\sigma$  em torno do valor médio de referência, conforme apresentado na Tabela 1. As referências para ajuste destes parâmetros foram apresentadas no capítulo 4. Para esta avaliação foram consideradas como referência as primeiras 300 amostras de cada série temporal, para extração em condição de regime da média ( $\mu$ ) alvo e do desvio padrão ( $\sigma$ ) de referência.

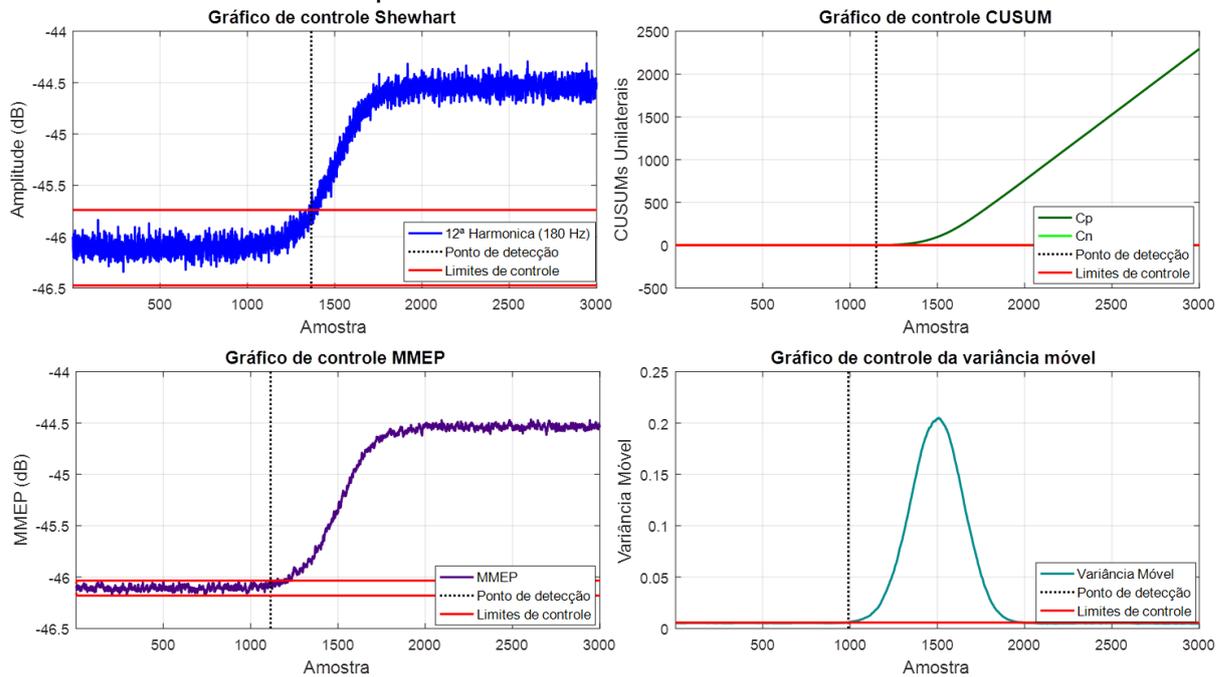
Tabela 1. Configuração das técnicas de detecção de anomalias para dados sintéticos.

<b>Método</b>	<b>Parâmetro</b>
Gráfico de controle Shewhart	$k = 2\sigma$
Gráfico de controle da soma cumulativa (CUSUM)	$h = 5, \delta = 0,5$
Gráfico de controle da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP)	$\lambda = 0,2, L = 3$
Gráfico de controle da Variância Móvel (VM)	$v = 2$

Fonte: Autor.

A Figura 52 mostra o histórico de amplitudes da 12<sup>o</sup> componente harmônica da  $f_m$  (180Hz), 3<sup>o</sup> harmônica elétrica, para um conjunto de dados sintéticos simulados com falta de rotor e a avaliação desta série temporal por meio dos quatro métodos propostos. A linha pontilhada indica o instante de detecção da alteração por cada um dos métodos, indicando que para faltas graduais a velocidade de detecção é dependente dos limites de controle utilizados: quanto menor a região de controle, mais rápida a alteração é detectada.

Figura 52. Avaliação do histórico de amplitudes da 12ª componente harmônica da  $f_m$  para uma falta simulada no rotor.



Fonte: Autor.

O resultado da aplicação das quatro técnicas de detecção de anomalias avaliadas no conjunto completo de dados sintéticos é apresentado na Tabela 2, que mostra o número total de séries de amplitudes detectadas com alteração e o número de falsos positivos (FP). A diferença entre estes dois indicadores é representada como o número de verdadeiros positivos, apresentados na Figura 53.

Tabela 2. Comparação de desempenho entre as técnicas de detecção de anomalias.

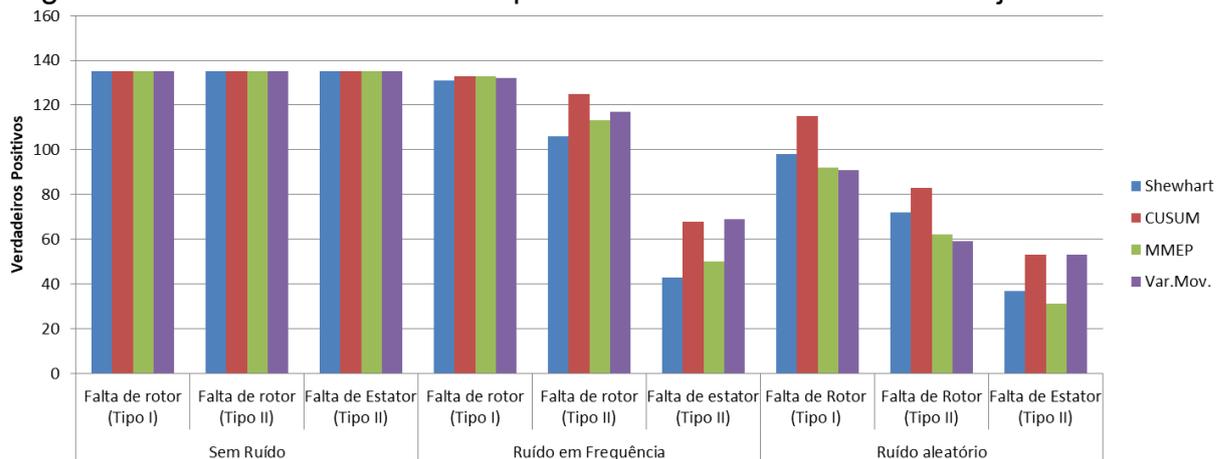
Dados sintéticos		Shewhart		CUSUM		MMEP		VM	
Categoria	Característica	Total	FP	Total	FP	Total	FP	Total	FP
Sem ruído	Rotor (Tipo I)	135	0	135	0	135	0	135	0
	Rotor (Tipo II)	135	0	135	0	135	0	135	0
	Estator	135	0	135	0	135	0	135	0
Ruído em frequência	Rotor (Tipo I)	131	0	133	0	133	0	132	0
	Rotor (Tipo II)	106	0	125	0	113	0	117	0
	Estator	43	0	68	0	50	0	69	0
Ruído aleatório	Rotor (Tipo I)	104	6	121	6	96	4	96	5
	Rotor (Tipo II)	77	5	92	9	70	8	78	19
	Estator	49	12	66	13	37	6	60	7

Fonte: Autor.

Os resultados revelam que a avaliação dos dados sintéticos simulados sem a adição de ruído fornece alterações minimamente detectáveis em todas as séries de amplitude, que sensibilizaram todos os métodos igualmente sem a ocorrência de

falsos positivos. Os dados simulados com ruído em frequência apresentam um número menor de séries detectadas com alteração, quando comparado com o caso anterior, o que ocorre devido à variabilidade dos históricos de amplitudes provocada pelo ruído ser superior à variação de amplitude provocada pela alteração imposta em algumas das séries temporais. Este impacto é fortemente notado na falta de estator, que apresenta um menor número de séries detectadas com alteração com relação ao total de séries avaliadas, em todas as quatro técnicas. Neste caso, mesmo com a adição do ruído em frequência, nenhum dos métodos apresentou falsos positivos. Por fim, com a adição de um ruído aleatório, que representa a situação mais próxima a um caso de aplicação real, há um número ainda menor de séries de amplitudes detectadas com alteração e observa-se a incidência de falsos positivos no processo de detecção.

Figura 53. Número de verdadeiros positivos detectados em cada conjunto de dados.



Fonte: Autor.

Comparando o desempenho das quatro técnicas de detecção de anomalias, a incidência de falsos positivos foi baixa para a avaliação dos dados sintéticos, com maior incidência nos métodos CUSUM e da variância móvel. A ocorrência de verdadeiros positivos foi maior também nestes dois métodos, o que é esperado, uma vez que estes são indicados para a detecção de pequenas alterações, como as presentes nos dados simulados. Os métodos Shewhart e MMEP apresentaram um razoável equilíbrio na incidência de verdadeiros positivos e falsos positivos, com desempenho ligeiramente inferior aos dois métodos inicialmente citados.

### 7.1.2 Resultados obtidos com dados de ensaios experimentais

A avaliação das técnicas de detecção de anomalias com dados experimentais foi realizada por meio da análise da assinatura magnética continuada obtida em ensaios na bancada de imposição de faltas, apresentada na seção 3.3.2, com o gerador síncrono de 10 kVA, 8 polos e 60 Hz. Para a análise espectral, foram selecionadas 135 componentes harmônicas da  $f_m$  de um sensor, da mesma maneira como foi obtido para os dados sintéticos. O número de amostras coletadas é variável entre os ensaios, estando entre 30 e 45 amostras. O ponto de operação é mantido aproximadamente constante, para garantir que não ocorram grandes variações de amplitude no espectro do sinal em consequência de sua alteração.

A imposição das faltas é realizada de maneira *online* com o GS operando sincronizado com a rede elétrica, sendo avaliados quatro tipos de faltas: retirada de espiras de um polo do estator, retirada de espiras de um polo do rotor, curto-circuito de espiras de um polo do estator e curto-circuito de lâminas do núcleo do estator. São coletadas amostras com a máquina em condição saudável, para caracterizar a região de referência e extrair as informações para configuração das técnicas de detecção de anomalias, e na sequência é realizada a imposição da falta, coletando um conjunto de amostras posteriores a este evento para caracterizar a nova condição de regime da máquina operando com falta.

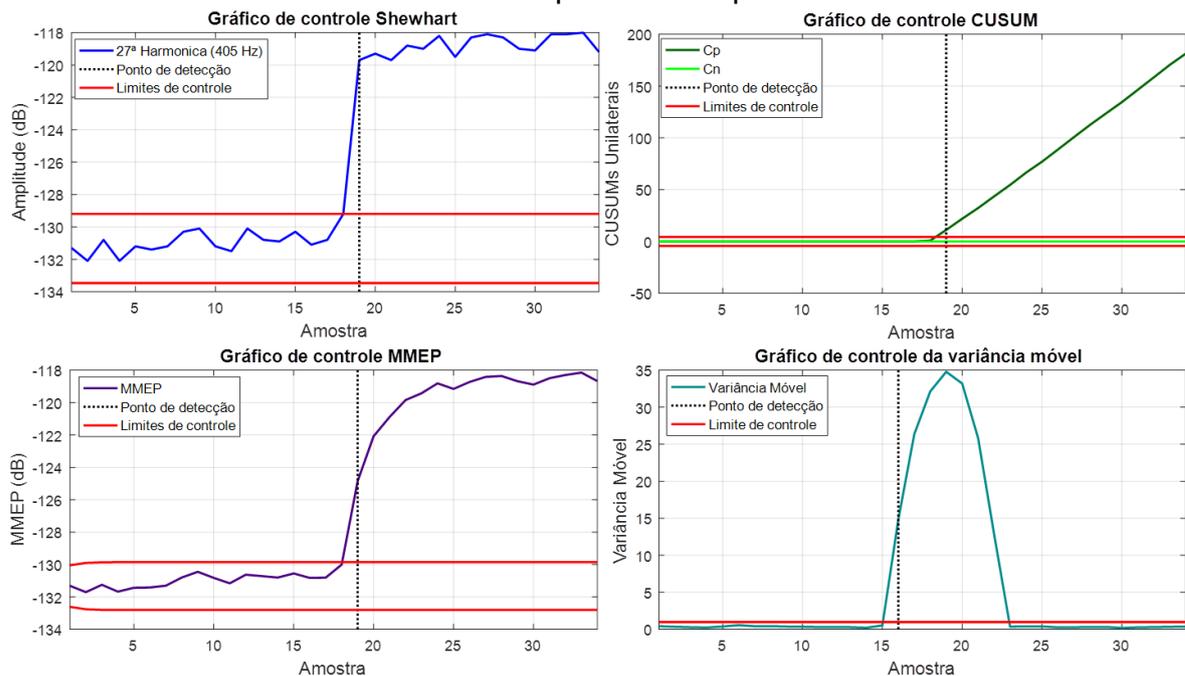
A avaliação dos dados experimentais se diferencia da avaliação dos dados sintéticos por possuir uma aleatoriedade muito maior em algumas séries temporais, além dos ruídos possivelmente provenientes do *hardware* de medição e inerentes ao processo de aquisição, bem como eletromagnéticos do ambiente e de oscilações de velocidade da máquina primária. Este fato inviabiliza a tentativa de detecção de pequenas alterações (inferiores a  $2\sigma$ ) no valor médio na grande maioria das séries temporais, de maneira que é necessário buscar, inicialmente, grandes alterações (superiores a  $3\sigma$ ) de amplitude que possam caracterizar o evento da falta. A Tabela 3 apresenta os parâmetros configurados para detecção de alterações superiores a  $3\sigma$  no entorno do valor médio de referência nos dados experimentais. São selecionadas as primeiras 10 amostras como região de referência.

Tabela 3. Configuração dos métodos de detecção de alterações para dados experimentais.

Método	Parâmetro
Gráfico de controle Shewhart	$k = 3\sigma$
Gráfico de controle da soma cumulativa (CUSUM)	$h = 10, \delta = 3$
Gráfico de controle da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP)	$\lambda = 0,5, L = 6$
Gráfico de controle da Variância Móvel (VM)	$v = 3$

Fonte: Autor.

A Figura 54 mostra a avaliação do histórico de amplitudes da 27ª componente harmônica da  $f_m$  monitorada no ensaio experimental de imposição da falta de retirada de espiras de um polo do estator, que é uma série temporal com baixa variabilidade e sensível a este tipo de falta, sendo detectada pelas quatro técnicas testadas.

Figura 54. Avaliação do histórico de amplitudes da 27ª harmônica da  $f_m$  em uma falta de retirada de espiras de um polo do estator.

Fonte: Autor.

A Tabela 4 apresenta o número total de séries de amplitudes detectadas com alteração e o número de falsos positivos (FP). De maneira complementar a Figura 55 apresenta a relação de verdadeiros positivos e falsos positivos para cada ensaio avaliado. O método CUSUM, mesmo com parâmetros ajustados para detectar alterações de maior magnitude, apresentou resultados de qualidade inferior aos demais, com uma maior incidência de falsos positivos no processo de detecção

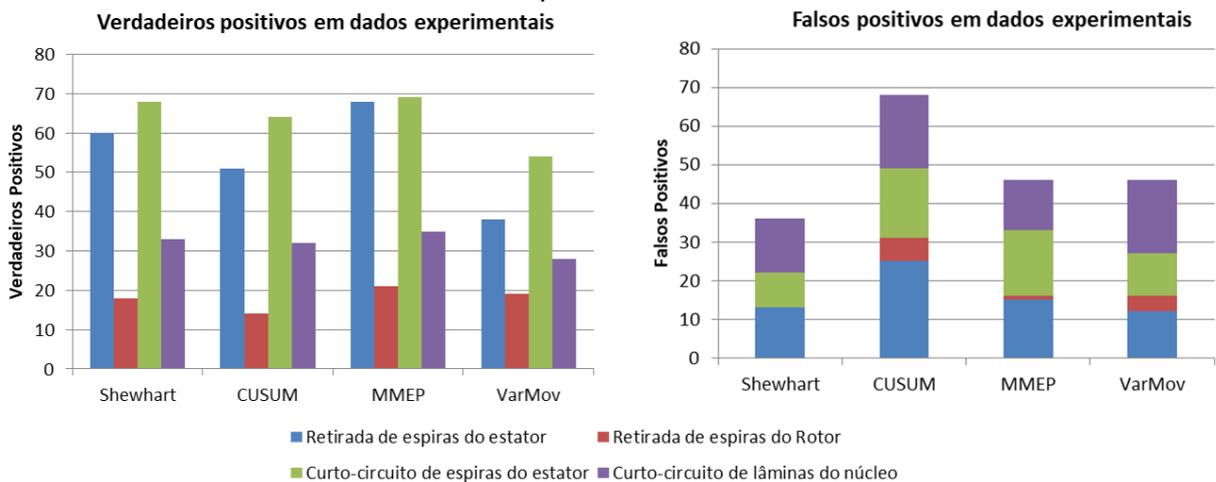
de anomalias. O método da variância móvel apresentou, no geral, uma incidência menor de verdadeiros positivos que os demais métodos. Com relação a este indicador, o método MMEP apresentou o maior montante de verdadeiros positivos entre os ensaios avaliados. O método de Shewhart apresentou o melhor equilíbrio entre a incidência de falsos positivos e verdadeiros positivos.

Tabela 4. Comparação de desempenho entre as técnicas de detecção de anomalias em dados experimentais.

Dados experimentais	Shewhart		CUSUM		MMEP		VM	
	Total	FP	Total	FP	Total	FP	Total	FP
Retirada de espiras do estator	73	13	76	25	83	15	50	12
Retirada de espiras do rotor	18	0	20	6	22	1	23	4
Curto-circuito de espiras do estator	77	9	82	18	86	17	65	11
Curto-circuito de lâminas do núcleo	47	14	51	19	48	13	47	19

Fonte: Autor.

Figura 55. Relação de verdadeiros positivos e falsos positivos em dados experimentais.



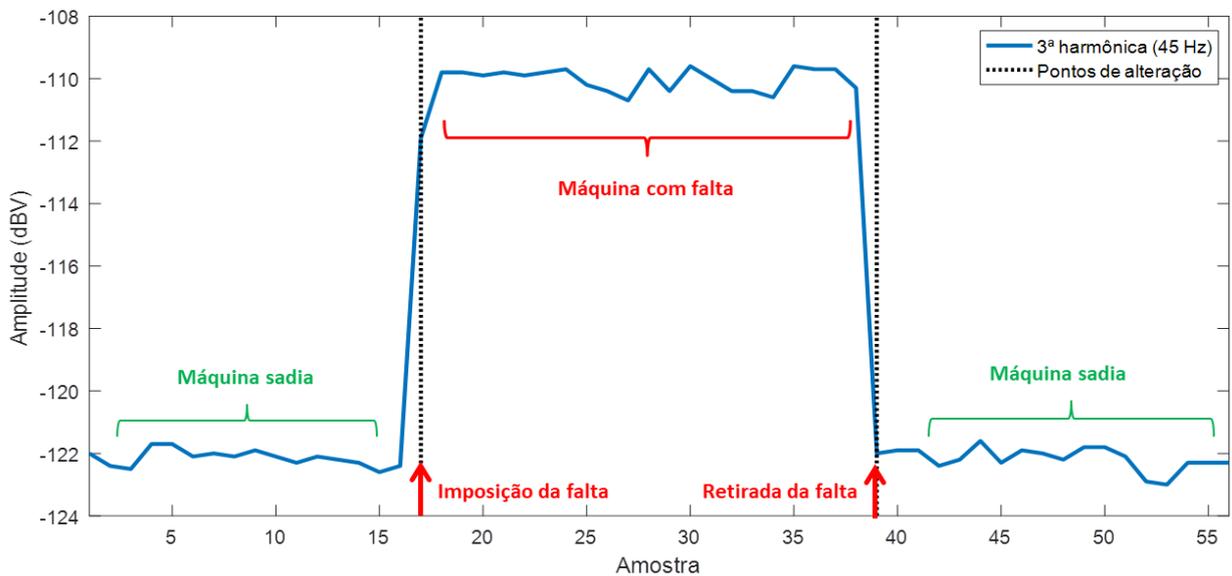
Fonte: Autor.

Analisando os resultados obtidos com os dados experimentais, o método de gráficos de controle convencional de Shewhart apresentou um desempenho sutilmente melhor que os demais, principalmente devido a menor incidência de falsos positivos, como apresentado na Figura 55 para os dados experimentais inicialmente avaliados. Por esta razão, este método foi escolhido para as avaliações adicionais apresentadas na sequência deste capítulo.

## 7.2 DETECÇÃO DE ALTERAÇÕES EM ENSAIOS EXPERIMENTAIS

Uma avaliação mais completa do desempenho do método de gráficos de controle de Shewhart na detecção automática de faltas em GS é realizada na bancada experimental de imposição controlada de faltas, por meio da avaliação de um conjunto de 117 ensaios realizados em condições distintas no GS de 10 kVA. Nestes ensaios foram realizadas a imposição e a retirada de faltas de maneira *online*, mantendo o ponto de operação aproximadamente constante para garantir que as variações detectadas sejam alterações provocadas pela falta imposta. A Figura 56 mostra a alteração do histórico de amplitudes da componente harmônica de 3ª ordem da  $f_m$  em um sensor, sensibilizada por uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor. Nota-se que a imposição da falta faz a amplitude desta componente harmônica aumentar consideravelmente em relação a sua condição inicial (máquina sadia). Além disso, após a remoção da falta, observa-se que a amplitude volta ao nível observado para a máquina sadia.

Figura 56. Alteração do histórico de amplitudes diante da imposição e retirada de uma falta.



Fonte: Autor.

Os tipos de falta impostas são apresentadas na Tabela 5, assim como o número de ensaios executados para cada tipo. Cada um dos ensaios foi realizado em uma condição operativa diferente, com valores distintos de potência ativa ( $P$ ), potência reativa ( $Q$ ) e fator de potência, para avaliar a possibilidade de detecção da

falta em diferentes condições de carregamento. A monitoração foi realizada por meio de três sensores de campo por indução, posicionados ao redor da carcaça no ponto médio da largura do pacote estatórico, com o objetivo de detectar, preferencialmente, o campo magnético tangencial disperso através da carcaça. As aquisições foram realizadas a cada 22 segundos, salvando 405 séries temporais para cada ensaio (135 séries para cada um dos três sensores utilizados). A análise do conjunto total de ensaios foi realizada pela avaliação de 47385 séries temporais contendo o histórico de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  avaliadas.

Tabela 5. Ensaio experimentais com imposição controlada de faltas.

<b>Tipo de falta</b>	<b>Número de ensaios</b>
Curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator	24
Curto-circuito entre espiras da fase A do estator (16,7% das espiras de um polo)	25
Curto-circuito entre espiras da fase C do estator (16,7% das espiras de um polo)	17
Retirada de espiras da fase A do estator (16,7% das espiras de um polo)	17
Retirada de espiras da fase B do estator (50% das espiras de um polo)	9
Retirada de espiras de um polo do rotor (20% das espiras de um polo)	25

Fonte: Autor.

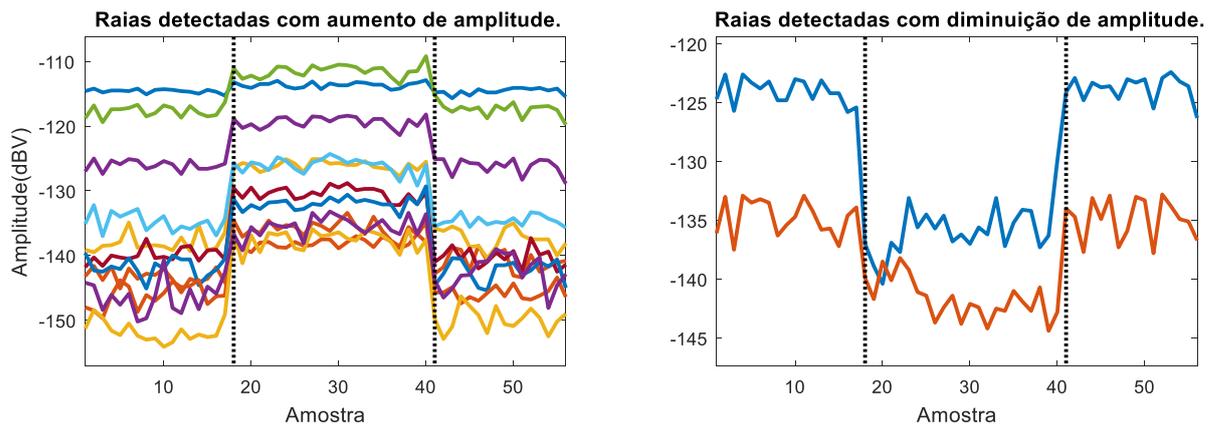
A detecção de alterações no valor médio foi realizada através da aplicação de gráficos de controle de Shewhart com limites de controle  $3\sigma$  de maneira contínua, para a detecção tanto da imposição quanto da retirada da falta. Para esta avaliação, foram filtradas as séries temporais que apresentaram variação de amplitude detectada tanto no instante de imposição quanto no instante de retirada da falta. Com esta avaliação, foi possível detectar as faltas impostas em cada um dos 117 ensaios realizados. A seguir são apresentados os resultados para cada tipo de falta avaliado, evidenciando a localização das componentes harmônicas detectadas com alteração de amplitude no espectro de frequências.

### 7.2.1 Avaliação da falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator

Para este tipo de falta de estator foram avaliados os históricos de amplitudes obtidos em 24 ensaios realizados em pontos de operação distintos. A Figura 57 apresenta o resultado do método de detecção obtido em um ensaio com o GS

operando na condição sobrecitada ( $P \cong 5 \text{ kW}$  e  $Q \cong 7 \text{ kVAr}$ ), onde as linhas verticais pontilhadas indicam os pontos de alteração detectados pelos gráficos de controle. Avaliando este único ensaio, referente a um ponto de operação, foram detectadas 13 séries sensibilizadas pela falta imposta em um dos sensores, 11 com aumento de amplitude e 2 com diminuição de amplitude durante a falta.

Figura 57. Séries detectadas com alteração em ensaio com falta de curto-circuito no núcleo do estator.

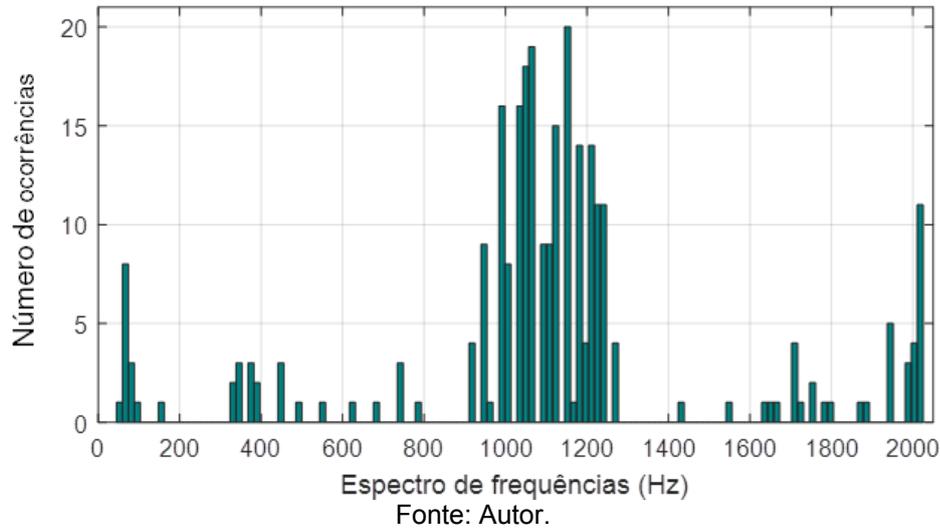


Fonte: Autor.

Avaliando os resultados obtidos para o conjunto total de ensaios realizados com este tipo de falta, a Figura 58 apresenta a distribuição de séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  alteradas e detectadas no espectro de frequências, onde o eixo vertical se refere ao número de ocorrências de detecção de alteração de cada série no conjunto total de ensaios, com a monitoração de 3 sensores. Assim, para o resultado apresentado na Figura 58, o histórico de cada componente harmônica da  $f_m$  poderia ter sido detectada até 72 vezes, considerando que o GS é monitorado por 3 sensores distintos nos 24 ensaios avaliados.

A Figura 58 evidencia uma maior concentração de ocorrências de detecção de variação de amplitudes em séries no intervalo de 900 a 1300 Hz. Este intervalo tem centro próximo a 1080 Hz, a qual é a frequência de ranhura ( $f_r$ ) da máquina utilizada para a realização dos ensaios, definida por  $f_r = f_m N_r$ , onde  $f_m$  é a frequência fundamental mecânica e  $N_r$  é o número de ranhuras da máquina (Santos, 2021).

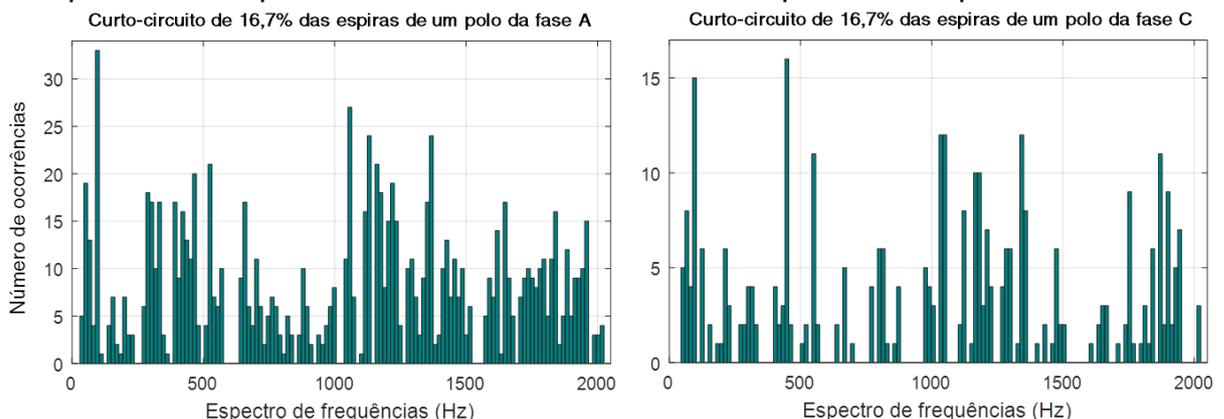
Figura 58. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  detectadas no espectro de frequências: falta de curto-circuito no núcleo do estator.



### 7.2.2 Avaliação da falta de curto-circuito entre espiras do estator

Para este tipo de falta foram avaliadas duas configurações de imposição: a primeira realizando o curto-circuito de 16,7% das espiras de um polo da fase A (25 ensaios realizados) e a segunda realizando o curto-circuito de 16,7% das espiras de um polo da fase C (17 ensaios realizados). A distribuição das componentes harmônicas da  $f_m$  detectadas com alteração de amplitude no espectro de frequências para o conjunto de ensaios realizados para cada configuração desta falta é apresentada na Figura 59, onde é observada uma distribuição das raias sensibilizadas por todo espectro, não ficando evidente nenhuma região com maior incidência de ocorrência de raias alteradas e detectadas.

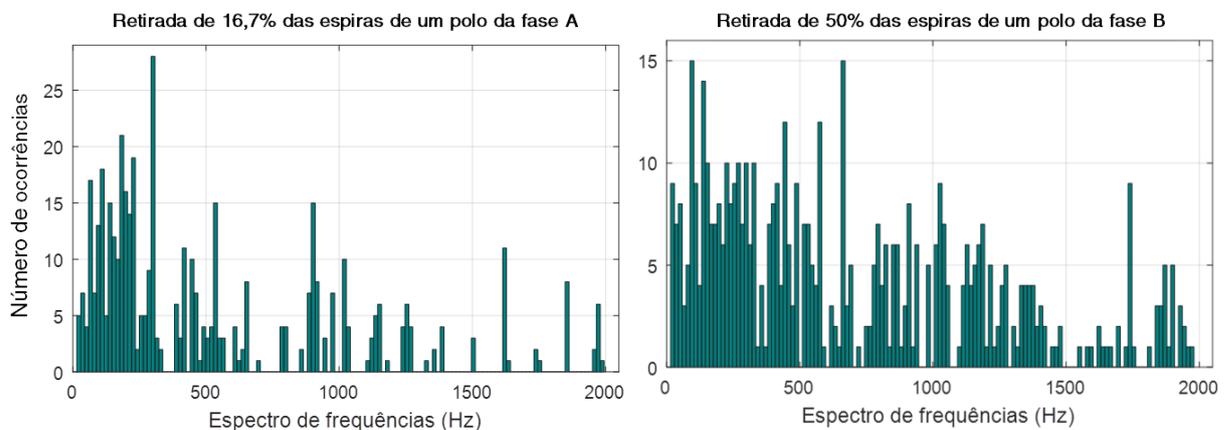
Figura 59. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  detectadas no espectro de frequências: falta de curto-circuito de espiras de um polo do estator.



### 7.2.3 Avaliação da falta de retirada de espiras de um polo do estator

Este tipo de falta tem como característica um maior número de raias alteradas no instante de sua imposição, em comparação com os outros tipos de faltas investigadas, em virtude do grande desbalanceamento entre as correntes de fase do estator provocada pela retirada de espiras de uma fase. A distribuição do número de ocorrências de detecção de séries sensibilizadas no espectro de frequências é apresentada na Figura 60 para duas configurações deste tipo de falta: retirada de 16,7% das espiras de um polo da fase A (17 ensaios) e retirada de 50% das espiras de um polo da fase B (9 ensaios). Observa-se uma maior ocorrência de raias detectadas na faixa de 15 Hz a 300 Hz, nas duas configurações de imposição deste tipo de falta. Além disso, pode-se constatar o aumento do número de raias sensibilizadas com o aumento da intensidade da falta, dado pela severidade causada pelo número de espiras retiradas na imposição da falta.

Figura 60. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  detectadas com alteração no espectro de frequências: falta de retirada de espiras de um polo do estator.



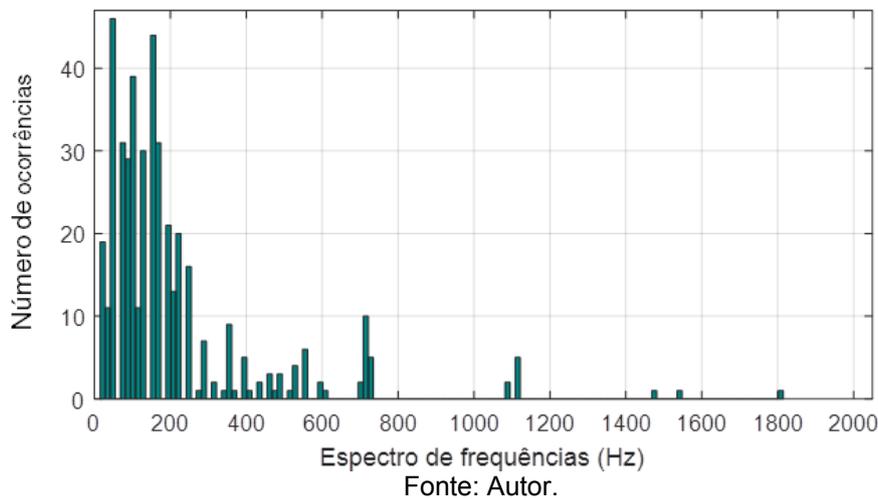
Fonte: Autor.

### 7.2.4 Avaliação da falta de retirada de espiras de um polo do rotor

Este tipo de falta tem como característica a facilidade de detecção de alteração na região de baixa frequência (menor que 300 Hz), onde a fundamental mecânica e suas harmônicas de ordem baixa tem forte sensibilidade às faltas de rotor (Rigoni, 2014). A Figura 61 apresenta a distribuição do número de ocorrências de detecção de séries de amplitude sensibilizadas no espectro de frequências, considerando os sinais de 3 sensores nos 25 ensaios avaliados. Este resultado

evidencia a maior incidência de séries sensibilizadas na região de baixa frequência, de 15 a 300 Hz, confirmando as conclusões obtidas por Rigoni (2014) e Santos (2021).

Figura 61. Distribuição de séries de amplitudes das harmônicas da  $f_m$  detectadas no espectro de frequências: falta de retirada de espiras de um polo do rotor.



### 7.2.5 Comparação dos resultados obtidos para os diferentes tipos de faltas

A Tabela 6 apresenta uma comparação geral entre as faltas avaliadas, mostrando o número de ensaios realizados para cada falta em diferentes condições de operação, o número total de séries de amplitudes avaliado para cada tipo de falta e o percentual de séries detectadas com alteração em cada caso, com relação ao número total de séries avaliadas. As faltas de retirada ou curto-circuito de espiras de um polo do estator apresentaram um maior percentual de raias detectadas, principalmente frente ao aumento da severidade da falta, enquanto a falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator apresentou o menor percentual. Sabe-se que este último tipo de falta é um dos mais difíceis de serem detectados por meio da monitoração do campo magnético, interno ou externo, ou através de uma outra técnica. Utilizando a mesma técnica de monitoração pelo campo magnético externo abordada nesta tese, Rigoni (2014) não conseguiu detectar este tipo de falta. Pelos relatos presentes na literatura científica desta área, Santos (2021) obteve o primeiro sucesso na detecção deste tipo de falta por meio da monitoração do campo magnético externo do GS.

Tabela 6. Comparação entre as faltas avaliadas.

<b>Tipo de falta</b>	<b>Nº de ensaios</b>	<b>Nº total de séries</b>	<b>Percentual de séries detectadas</b>
Curto-circuito entre lâminas do núcleo	24	9720	2,85%
Curto-circuito entre espiras da fase A do estator	25	10125	10,07%
Curto-circuito entre espiras da fase C do estator	17	6885	4,97%
Retirada de espiras da fase A do estator	17	6885	6,67%
Retirada de espiras da fase B do estator	9	3645	14,49%
Retirada de espiras de um polo do rotor	25	10125	4,32%
<b>Conjunto total de ensaios avaliados</b>	<b>117</b>	<b>47385</b>	<b>6,47%</b>

Fonte: Autor.

### 7.2.6 Desempenho do método de detecção de alterações

A aplicação do método de gráficos de controle Shewhart para detecção de alterações instantâneas no histórico de amplitudes do campo magnético obtidos nos ensaios experimentais apresentados acima foi eficiente, pois permitiu a detecção correta dos instantes de imposição e retirada das faltas em todos os 117 ensaios avaliados. A utilização de limites de controle  $3\sigma$  se mostrou adequada para a detecção dos diferentes tipos de faltas analisados nesta máquina. Cabe reforçar que os resultados apresentados acima foram quantificados em relação aos resultados da detecção de alterações com limites  $3\sigma$ , não incluindo séries de amplitudes eventualmente alteradas pela imposição da falta que não sensibilizaram o método de detecção, como séries com alterações de amplitude que sejam inferiores aos limites de controle especificados.

Os *datasets* de ensaios avaliados nesta seção foram todos realizados com o ponto de operação mantido aproximadamente constante. Na seção seguinte é avaliado o impacto da variação do ponto de operação sobre o histórico de amplitudes, utilizando também gráficos de controle Shewhart na detecção das alterações das variáveis monitoradas.

### 7.3 AVALIAÇÃO DE ENSAIOS COM VARIAÇÃO DO PONTO DE OPERAÇÃO

Nesta seção são avaliados conjuntos de dados obtidos por meio de medições do campo magnético externo do GS diante de variações controladas de seu despacho de potência. Neste estudo de caso, as amplitudes das alterações

detectadas na assinatura magnética continuada por meio do método de gráficos de controle são comparadas com as alterações de amplitude provocadas pelas faltas apresentadas na seção anterior. Esta avaliação tem como objetivo comparar as variações de amplitudes observadas na assinatura magnética da máquina diante destes dois tipos de evento, de maneira a evidenciar o impacto das variações do ponto de operação da máquina sobre a resposta das metodologias de detecção de faltas por meio da monitoração do campo magnético externo. Os resultados aqui apresentados são extraídos de ensaios experimentais controlados e tem como objetivo complementar as conclusões apresentadas no capítulo 5.

### 7.3.1 Ensaios de variação do ponto de operação com o GS sincronizado

Esta avaliação foi realizada por meio de medições do campo magnético externo e das potências geradas no GS de 8 polos operando em sincronismo com a rede elétrica. Os ensaios foram realizados apenas com variações de potência ativa ( $P$ ) e/ou potência reativa ( $Q$ ) do GS, sem realizar a imposição de faltas, com o objetivo de avaliar o impacto das variações das grandezas elétricas sobre a assinatura magnética continuada da máquina e sobre os métodos de detecção de alterações no valor médio. Na realização de cada ensaio, duas alterações de carregamento foram realizadas a partir de uma condição inicial, com o objetivo de criar três regiões de operação com despacho de potência distinto e aproximadamente constante, como apresentado na Tabela 7.

Tabela 7. Ensaios experimentais com variações do ponto de operação do GS de 10 kVA.

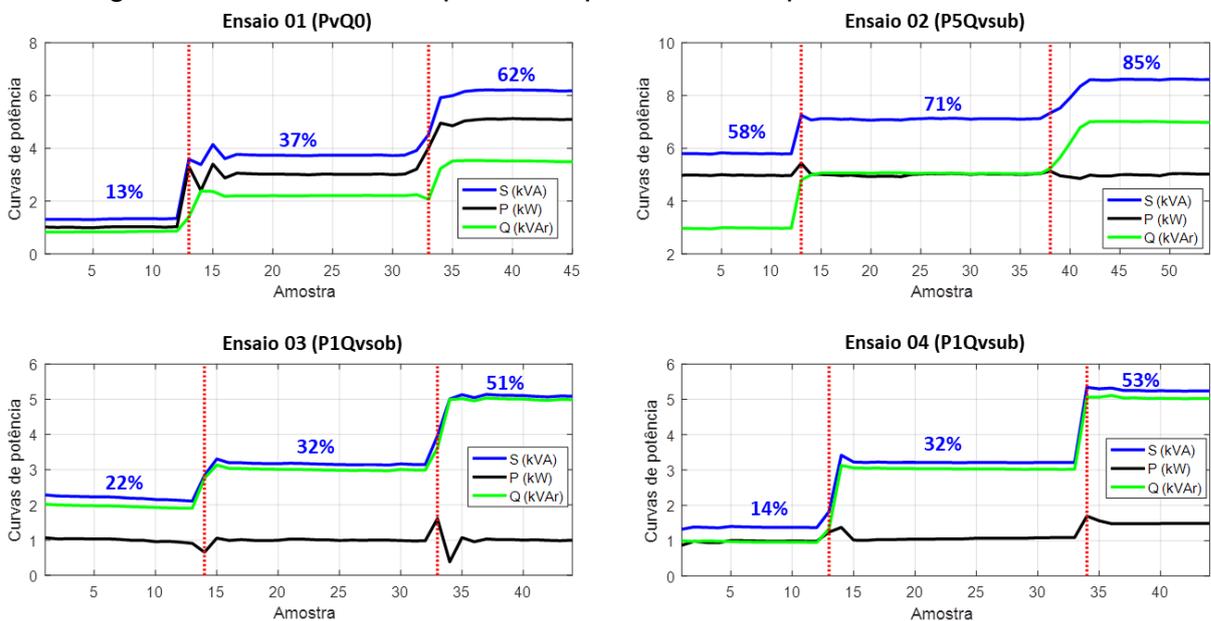
Ensaio	Características
01 (PvQ0)	Alteração de $P$ (1, 3 e 5 kW) com $Q$ em valor mínimo para manter a operação em sincronismo (PvQ0) <sup>4</sup>
02 (P5Qvsub)	Alteração de $Q$ (3, 5 e 7 kVAr), $P \cong 5 \text{ kW}$ constante, GS subexcitado (P5Qvsub)
03 (P1Qvsob)	Alteração de $Q$ (2, 3 e 5 kVAr), $P \cong 1 \text{ kW}$ constante GS sobexcitado (P1Qvsob)
04 (P1Qvsub)	Alteração de $Q$ (1, 3 e 5 kVAr), $P \cong 1 \text{ kW}$ constante GS subexcitado (P1Qvsub)

Fonte: Autor.

<sup>4</sup> Pv refere-se a ensaios com variação de potência ativa mantendo a potência reativa aproximadamente constante. Qv refere-se a ensaios com variação de  $Q$ , mantendo  $P$  aproximadamente constante.

A detecção automática das regiões de operação é realizada por meio da detecção de alterações de potência aparente do GS, que é proporcional às alterações de  $P$  e  $Q$  nestes ensaios, executadas por meio da aplicação de gráficos de controle de Shewhart para monitoração contínua, com limites de controle  $3\sigma$ . A Figura 62 apresenta o despacho de potências do GS em cada ensaio, com o valor percentual da potência aparente ( $S$ ) expresso em relação à potência nominal do gerador ( $S_{nominal} = 10 \text{ kVA}$ ) em cada uma das três regiões de operação. As linhas verticais em vermelho indicam os pontos de alteração do ponto de operação detectados pelo método de gráficos de controle.

Figura 62. Curvas de despacho de potência nos quatro ensaios avaliados.



Fonte: Autor.

A monitoração da assinatura magnética continuada foi realizada por meio da medição do campo magnético externo em 4 sensores posicionados na carcaça do GS. O histórico de amplitudes resultante apresenta período de 22 segundos entre amostras, sincronizado com aquisição das grandezas elétricas que caracterizam o carregamento do GS, para comparação. O equipamento de medição do campo magnético externo foi configurado para monitorar a amplitude de 225 harmônicas da fundamental mecânica (de 15 à 3375 Hz), totalizando 900 séries temporais com histórico de amplitudes do campo magnético externo.

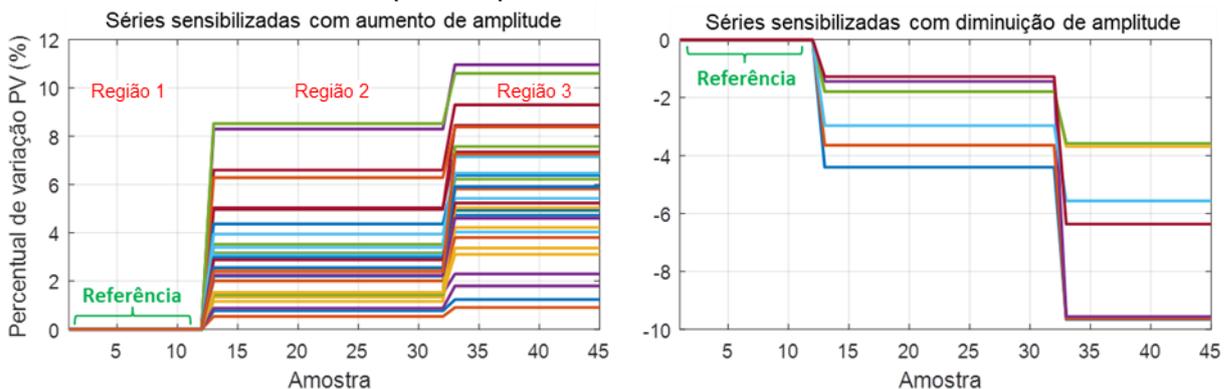
### 7.3.2 Alterações espectrais causadas por variações de operação do GS

O espectro de frequências das medidas do campo magnético externo nos ensaios realizados tem comportamento similar ao observado nos ensaios de imposição de faltas, onde algumas séries apresentam alteração nítida de amplitude diante das alterações de carregamento e outras não, como apresentado no capítulo 5. Para identificar as séries sensibilizadas pela variação do ponto de operação foi calculada uma estimativa do valor médio de amplitude de cada raia em cada região de operação. Na sequência, foram aplicados gráficos de controle de Shewhart para monitoração contínua com limites de  $1,5\sigma$ , para detecção de pequenas variações do valor médio destas séries temporais. Como as séries têm amplitudes médias distintas e as alterações não têm a mesma proporção entre as séries sensibilizadas, a análise comparativa foi realizada por meio de um coeficiente normalizado que caracteriza o percentual de variação ( $PV$ ) em cada região de operação ( $n$ ) com relação à região 1 (condição inicial), tomada como referência. Este coeficiente é definido por

$$PV_n = \left(1 - \frac{\mu_n}{\mu_1}\right) * 100 \quad (37)$$

onde  $\mu_n$  é a média das amplitudes do intervalo interdecil na região  $n$ , e indica o percentual de variação de amplitude diante da alteração do carregamento imposta na máquina. A Figura 63 apresenta as séries de amplitudes detectadas pelo sensor 1 no primeiro ensaio (variação de potência ativa), indicando o percentual de variação observado nas regiões 2 e 3 com relação à região 1.

Figura 63. Percentual de variação ( $PV$ ) para séries detectadas com alteração de amplitude pelo sensor 1 no ensaio 1.



Fonte: Autor.

O percentual de variação ( $PV$ ) de amplitude é proporcional à variação do carregamento do GS. A Tabela 8 apresenta os valores mínimo e máximo do percentual de variação de amplitude ( $PV_{mínimo}$  e  $PV_{máximo}$ , respectivamente) obtidos nos ensaios avaliados, caracterizando a faixa de variação de amplitude observada nas séries sensibilizadas e detectadas. A variação de carregamento é dada em valor percentual com relação à potência aparente nominal da máquina. O intervalo do  $PV$  observado é referente à avaliação dos 4 sensores em conjunto. Observa-se que a magnitude das alterações aumenta com o aumento da variação das grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação, sendo um padrão para todos os sensores de forma individual, inclusive.

Tabela 8. Percentual de variação de raias sensibilizadas pela alteração do carregamento.

Ensaio	Variação do carregamento	Variação de amplitude	
		$PV_{mínimo}$	$PV_{máximo}$
1 (PvQ0)	24,27%	0,22%	9,97%
	48,62%	0,72%	15,70%
2 (P5Qvsub)	12,95%	0,18%	8,73%
	27,19%	0,28%	22,20%
3 (P1Qvsob)	9,44%	0,11%	5,88%
	28,71%	0,39%	13,70%
4 (P1Qvsub)	18,38%	0,29%	9,64%
	38,76%	1,07 %	14,88%
<b>Faixa de variação de amplitude</b>		<b>0,11%</b>	<b>22,20%</b>

Fonte: Autor.

### 7.3.3 Comparação entre alterações da assinatura magnética causadas pela imposição de faltas e pela variação do ponto de operação

Para comparar a magnitude das variações de amplitude provocadas pela alteração do ponto de operação com a magnitude das alterações ocorridas devido à imposição controlada de faltas no gerador síncrono de 8 polos da bancada de ensaios experimentais, foram avaliados os percentuais de variação ( $PV$ ) de amplitude para os ensaios de imposição de faltas apresentados na seção anterior, realizados com o ponto de operação aproximadamente constante. Neste processo foi computado o  $PV$  de cada série detectada com alteração, para cada um dos 117 ensaios de imposição de faltas realizados, relacionando a amplitude da série na condição de falta com a amplitude de referência da série (condição sadia). As faixas do percentual de

variação computado para cada tipo de falta, definida pelos valores máximo e mínimo de  $PV$ , são apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9. Percentual de variação de séries sensibilizadas por diferentes tipos de faltas.

<b>Tipo de falta</b>	<b>Nº de ensaios</b>	$PV_{mínimo}$	$PV_{máximo}$
Curto-circuito entre lâminas do núcleo	24	0,41%	11,66%
Curto-circuito entre espiras da fase A do estator	25	0,22%	12,19%
Curto-circuito entre espiras da fase C do estator	17	0,27%	10,12%
Retirada de espiras da fase A do estator	17	0,16%	11,86%
Retirada de espiras da fase B do estator	9	0,20%	11,49%
Retirada de espiras de um polo do rotor	25	0,84%	13,50%
<b>Faixa de variação de amplitude</b>	<b>117</b>	<b>0,16%</b>	<b>13,50%</b>

Fonte: Autor.

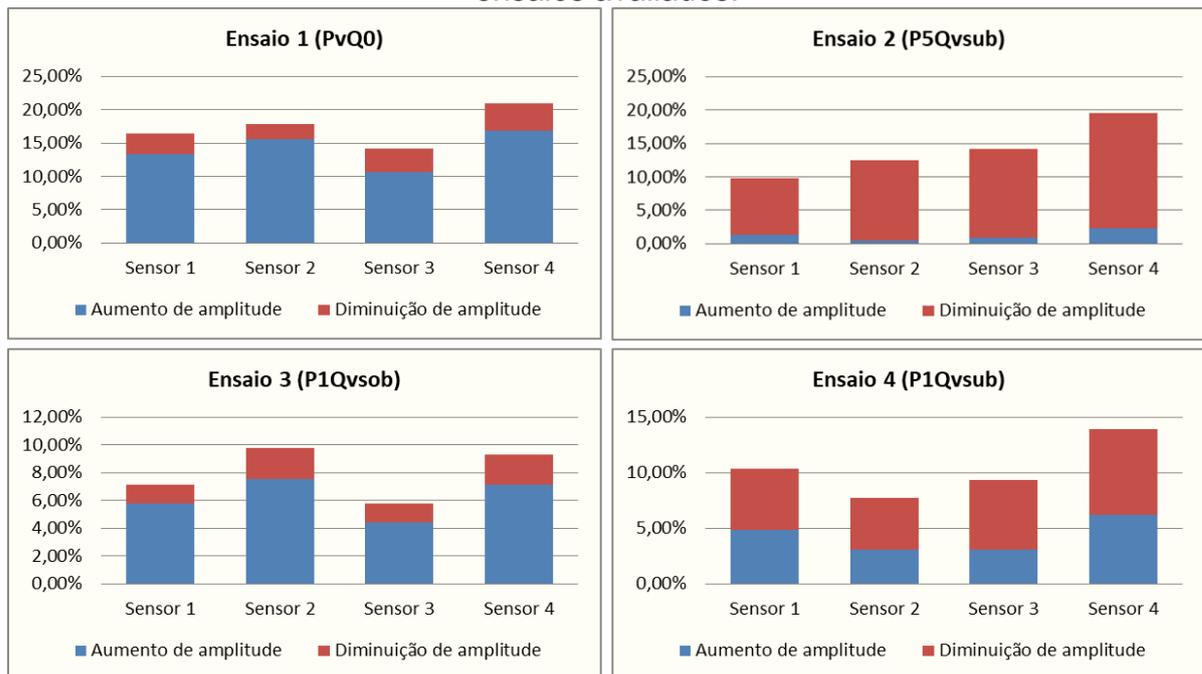
Nota-se, pela comparação das faixas de variação de amplitude dos dois grupos de ensaios, que as variações provocadas por alterações do ponto de operação ( $0,11\% \leq PV \leq 22,20\%$ ) podem apresentar amplitudes mais elevadas que as variações provocadas pela imposição controlada de faltas  $0,16\% \leq PV \leq 13,50\%$  neste GS em específico. Estes resultados evidenciam que as alterações do ponto de operação do GS, que são variações naturais da máquina, podem ter um efeito mais severo sobre a assinatura magnética continuada do GS do que o efeito provocado pela imposição de defeitos, impactado em métodos de detecção de faltas baseados na detecção de alterações na assinatura magnética continuada. Como as amplitudes de variação nos dois cenários estão na mesma faixa de valores, a exclusão de falsos positivos não pode ser contornada com a adaptação dos limites de detecção dos métodos, sendo necessárias análises e etapas adicionais para considerar a influência do ponto de operação no processo de detecção de faltas, como a utilização do processo de estratificação proposto na seção 5.4.

#### **7.3.4 Avaliação complementar das alterações da assinatura magnética devido às variações do ponto de operação**

As séries de amplitudes podem ser sensibilizadas pela alteração do ponto de operação de duas maneiras diferentes: com o aumento ou com a diminuição de

amplitude. O tipo de alteração que é observado em cada série sensibilizada depende do tipo de alteração do carregamento e da posição dos sensores. A Figura 64 apresenta o percentual de séries sensibilizadas e detectadas, com relação ao número total de séries monitoradas em cada sensor (225 séries em cada sensor). Esta avaliação é realizada para os 4 ensaios apresentados na Tabela 7, fornecendo características em comum entre os sensores em cada ensaio. Nos ensaios com aumento de potência ativa ou de potência reativa na condição sobrecitada (ensaios 1 e 3, respectivamente), a ocorrência de séries sensibilizadas e detectadas com aumento de amplitude é maior em todos os sensores. Em contrapartida, ensaios com aumento de potência reativa com a máquina subexcitada (ensaios 2 e 4) apresentam maior incidência de séries sensibilizadas e detectadas com diminuição de amplitude em todos os sensores.

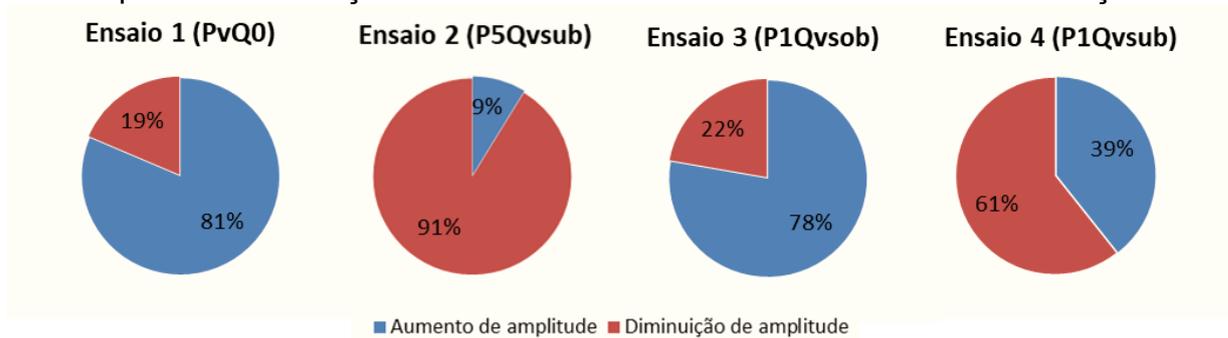
Figura 64. Percentual de séries sensibilizadas e detectadas em cada sensor nos ensaios avaliados.



Fonte: Autor.

Estas características são evidenciadas, de maneira mais geral, na Figura 65 que mostra visualmente uma comparação percentual entre os tipos de alteração com relação ao número total de séries sensibilizadas e detectadas em cada ensaio, considerando na análise os 4 sensores.

Figura 65. Percentual de séries sensibilizadas com aumento ou diminuição de amplitude com relação ao número total de séries detectadas com alteração.



Fonte: Autor.

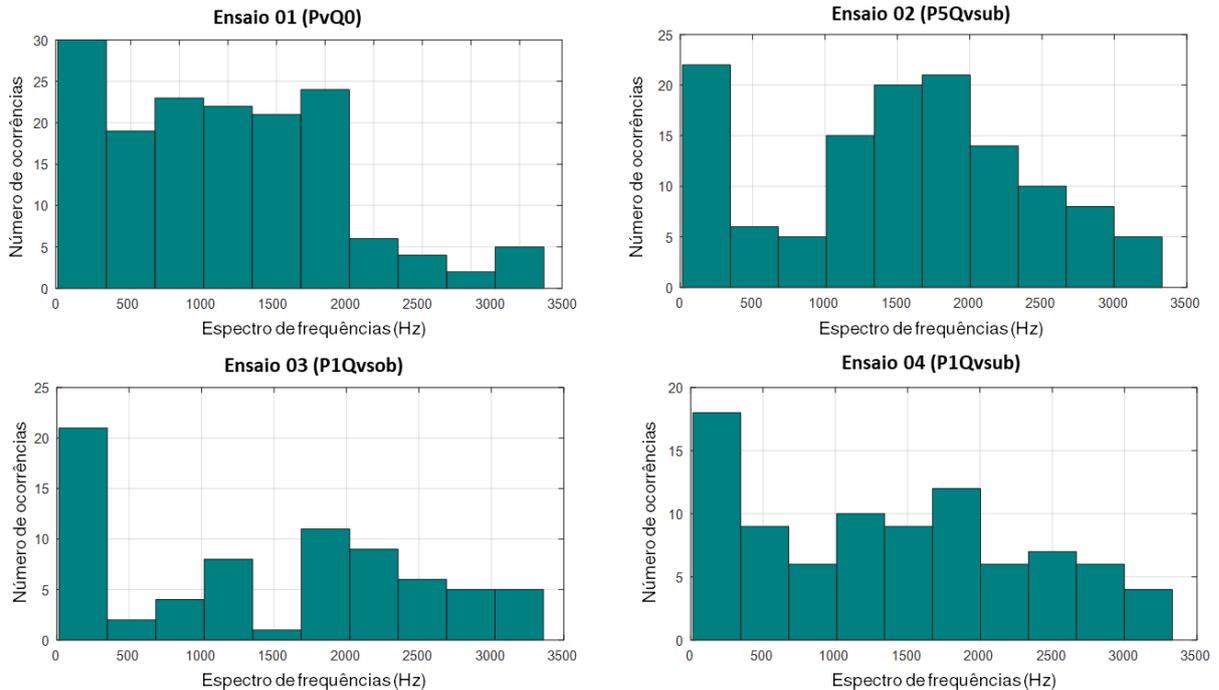
A partir do resultado destes ensaios, observou-se que o aumento de  $P$  tem forte impacto sobre a fundamental elétrica e algumas de suas componentes harmônicas, devido principalmente ao aumento da corrente nos enrolamentos do estator. Esta constatação experimental está de acordo com a forte relação de correlação linear observada entre a  $P$  e a  $f_e$  e entre a  $P$  e outras componentes harmônicas da  $f_m$ , apresentadas na seção 5.3.1.

Por outro lado, o aumento de  $Q$  depende da condição de operação do GS ou, de maneira mais direta, da corrente de excitação do enrolamento de campo ( $I_f$ ). A relação entre  $I_f$  e o fluxo magnético do entreferro ( $\Phi$ ) gerado também pelo enrolamento de excitação, do qual o campo magnético externado pela máquina é uma imagem, é dada por uma curva de magnetização similar à apresentada na Figura 2. De acordo com essa relação, o aumento de  $I_f$  do GS realizado para aumentar o despacho de  $Q$  na operação sobreexcitada (ensaios 1 e 3), aumenta o  $\Phi$  e a tensão interna da máquina ( $E_a$ ), gerando uma maior incidência de séries de amplitudes sensibilizadas e detectadas com aumento de amplitude. Por outro lado, a diminuição da corrente de campo para aumentar a absorção de potência reativa do sistema, na condição subexcitada (ensaios 2 e 4), provoca a diminuição de  $\Phi$  e da  $E_a$  induzida, gerando uma maior incidência de séries de amplitude sensibilizadas e detectadas com diminuição de amplitude. Estes resultados obtidos em ensaios controlados em laboratório corroboram com os resultados da análise apresentada no capítulo 5 para o GS de 305 MVA de uma usina hidrelétrica.

A localização de ocorrência das séries de amplitude alteradas e detectadas no espectro de frequências é a característica que apresenta maior dificuldade para se estabelecer um padrão. A Figura 66 apresenta histogramas com o número de

ocorrência de séries sensibilizadas e detectadas em diferentes faixas de frequência ao longo do espectro de frequências para os ensaios avaliados nesta seção, abrangendo as séries de amplitudes detectadas pelos 4 sensores para cada ensaio.

Figura 66. Número de ocorrências de séries detectadas no espectro de frequência.



Fonte: Autor.

É possível observar que ocorrem alterações de amplitude em componentes harmônicas da  $f_m$  em todas as faixas de frequência observadas, com diferenças notáveis entre os ensaios realizados. Além disso, para cada ensaio, as regiões de maior ocorrência de séries alteradas entre os diferentes sensores também são distintas, fato esperado pela diferença de seus posicionamentos ao redor da carcaça do GS. O único padrão sólido que pode ser constatado é a maior incidência de harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas e detectadas na região de baixa frequência (até 300 Hz), onde a amplitude das componentes harmônicas é, em geral, maior que a das componentes harmônicas em frequências mais elevadas, apresentando também maior sensibilidade às variações do ponto de operação do GS. Esse padrão é observado também analisando as medições de cada sensor individualmente. A maior incidência de séries alteradas e detectadas na região do espectro de frequências até 300 Hz está de acordo com as constatações apresentadas na seção 5.3.3, que indica uma maior incidência de componentes harmônicas da  $f_m$  com correlação forte com  $P$  e/ou  $Q$  nessa faixa do espectro de frequência.

Os padrões observados são sintetizados no Quadro 1 que apresenta as principais características observadas nos ensaios apresentados nesta seção e servem como uma referência para a interpretação e avaliação do espectro de frequências do campo magnético externo obtido na monitoração de geradores síncronos em operação sincronizada com a rede.

Quadro 1. Características dos padrões de alteração da assinatura magnética obtidas por meio do campo magnético externo e decorrentes de variações de carregamento do GS ensaiado.

Padrão avaliado	Características
Número de séries sensibilizadas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Depende da amplitude de variação do ponto de operação. Quanto maior a variação das grandezas elétricas do GS, maior o número de séries sensibilizadas e maior a detectabilidade das alterações;</li> <li>• Depende da posição do sensor: o campo magnético externo tem características distintas dependentes da posição de medição.</li> </ul>
Tipo de alteração do histórico de amplitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A alteração de cada série detectada pode ser diretamente ou inversamente proporcional à variação do ponto de operação (aumento ou diminuição de amplitude), ou se manifestar como transitórios no histórico de amplitudes;</li> <li>• Algumas séries têm baixa sensibilidade às variações do ponto de operação (não apresentam alteração ou apresentam alterações não detectáveis);</li> <li>• O tipo de alteração depende da posição do sensor e da característica de operação do GS: 1) Aumento de potência ativa gerada ou de despacho de potência reativa com o GS operando na condição sobrecitada provoca uma maior incidência de séries sensibilizadas e detectadas com aumento das amplitudes; 2) Aumento de potência reativa absorvida com o GS operando na condição subexcitada provoca o aumento do número de séries sensibilizadas com diminuição das amplitudes.</li> </ul>
Percentual de variação de amplitude	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As variações de amplitude observadas nas séries sensibilizadas são proporcionais à amplitude da variação do ponto de operação. Em geral, quanto maior a variação das grandezas elétricas maior é a variação de amplitude das harmônicas da <math>f_m</math> sensibilizadas e detectadas.</li> </ul>
Localização de harmônicas sensibilizadas no espectro de frequências	<ul style="list-style-type: none"> <li>• As componentes harmônicas da <math>f_m</math> com amplitude sensibilizada pela variação do ponto de operação ocorrem por todo espectro de frequências;</li> <li>• A região de maior ocorrência de componentes harmônicas da <math>f_m</math> sensibilizadas é a região de baixa frequência (até 300 Hz), premissa válida para diversas configurações e alterações do ponto de operação do GS, ocorrendo em todos os sensores instalados em posições distintas;</li> <li>• A frequência fundamental mecânica (<math>f_m</math>) e a frequência fundamental elétrica (<math>f_e</math>) apresentam grande sensibilidade às alterações do ponto de operação, comprovado também pela análise de correlação apresentada no capítulo 5. É comum a alteração simultânea destas componentes, manifestando-se em todos os sensores simultaneamente diante de grandes alterações de carregamento da máquina.</li> </ul>

Fonte: Autor.

## 7.4 APLICAÇÃO DA METODOLOGIA DE AVALIAÇÃO PERIÓDICA DA ASSINATURA MAGNÉTICA CONTINUADA DO GS

Nesta seção é apresentada a comprovação da eficácia da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada na detecção de diferentes tipos de faltas, por meio de sua aplicação na análise de *datasets* obtidos no GS de 10 kVA, em ensaios experimentais de laboratório com imposição de faltas, e no GS de 305 MVA, em operação em uma usina hidrelétrica no período de ocorrência de uma falta. Os *datasets* avaliados são compostos pela assinatura magnética continuada de cada máquina e pelas séries de medidas de  $P$  e  $Q$  em cada caso, sincronizadas com as medições de campo magnético que geraram a assinatura magnética.

### 7.4.1 *Datasets* obtidos em ensaios experimentais em laboratório

Estes *datasets* foram obtidos por meio de ensaios experimentais com imposição controlada de faltas no GS de 10 kVA e 8 polos, operando em sincronismo com a rede elétrica. Os ensaios foram realizados com o ponto de operação aproximadamente constante para limitar a influência de variações de geração de potência da máquina sobre a assinatura magnética continuada. Nos ensaios para obtenção dos *datasets* avaliados nesta seção, o GS operou próximo à condição de regime com 7 kVA, o que corresponde a 70% do carregamento da máquina. Nestes ensaios, pequenas perturbações no ponto de operação estão sempre presentes e são devidas i) à influência térmica no sistema, tanto da variação de temperatura da máquina primária quanto do GS ao longo da operação e ii) à influência das pequenas oscilações típicas da rede elétrica na operação em sincronismo. Para estes ensaios, a variação máxima de potência aparente foi mantida em uma faixa de 2% da potência nominal ( $0,02S_{nominal}$ ) em torno da potência aparente alvo (7 kVA), de maneira a garantir a condição de operação em uma faixa limitada de despacho de potências na metodologia desenvolvida (atende a etapa de estratificação).

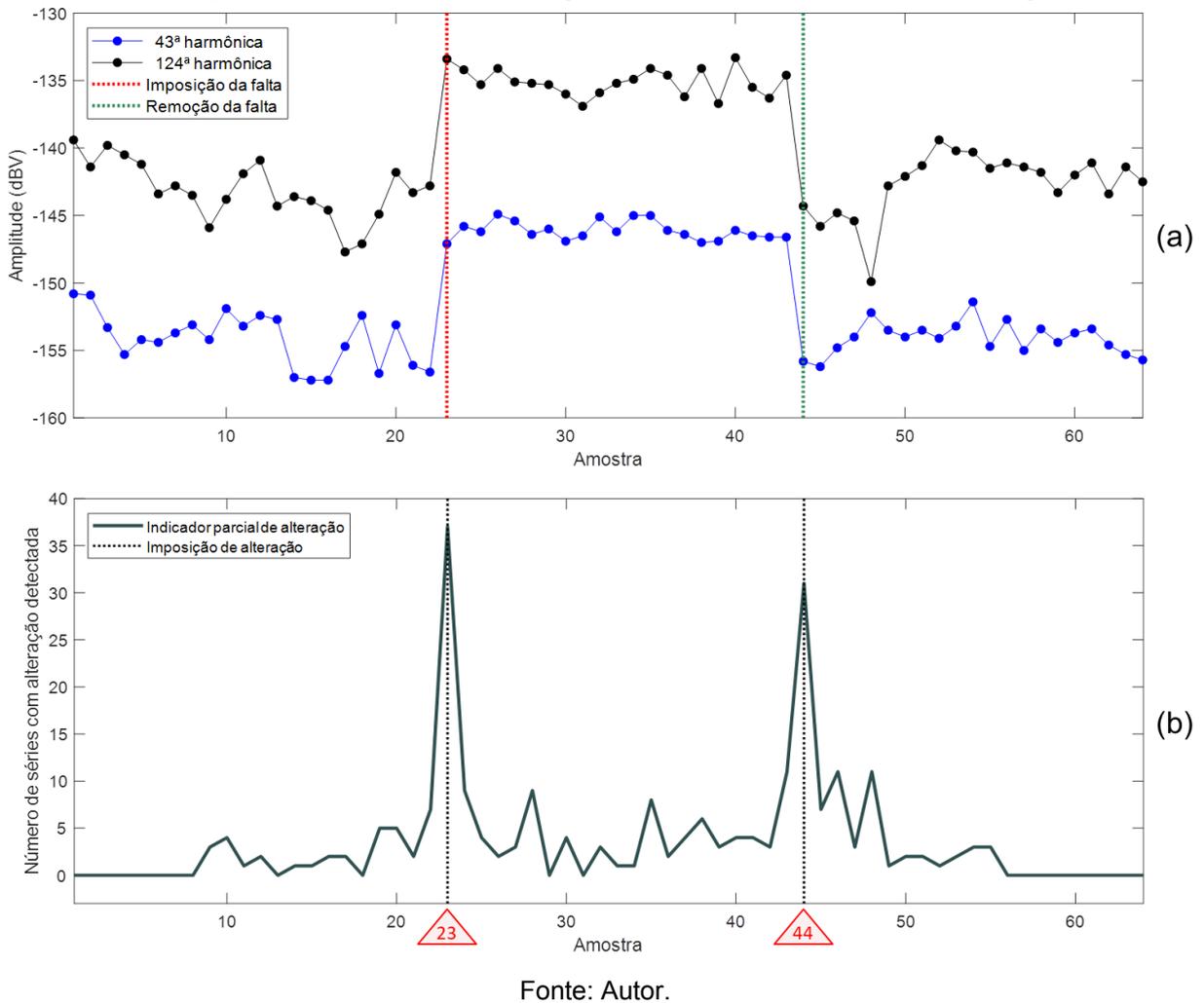
Os ensaios são realizados inicialmente com a máquina sadia para definir uma região de referência em regime estacionário. Na sequência, as faltas são impostas e o GS opera um período de tempo com a falta. Por fim, as faltas são

removidas, de modo que o GS volte à condição sadia. Os ensaios são realizados com medições periódicas a cada 22 segundos, sendo monitoradas as amplitudes de 225 componentes harmônicas da  $f_m$  das medições provenientes de três sensores posicionado na parte externa da carcaça da máquina. As faltas avaliadas foram: i) curto-circuito de 17% das espiras de um polo de uma fase do estator; ii) retirada de 50% das espiras de um polo de uma fase do estator; iii) retirada de 20% e 50% de espiras de um polo do rotor; e iv) curto-circuito de um conjunto de chapas do núcleo do estator.

A aplicação da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética nestes *datasets* foi realizada definindo uma região de referência com 8 amostras, utilizada para o cálculo dos limites de controle. Considerando um processo de monitoração contínua na busca por alterações sucessivas no conjunto de dados, após a detecção de uma alteração, uma nova região de referência é estabelecida em um novo patamar de estacionariedade. Assim, novos limites de controle são definidos, permitindo que as séries que apresentaram alteração de amplitude sejam monitoradas na busca de uma nova condição de máquina.

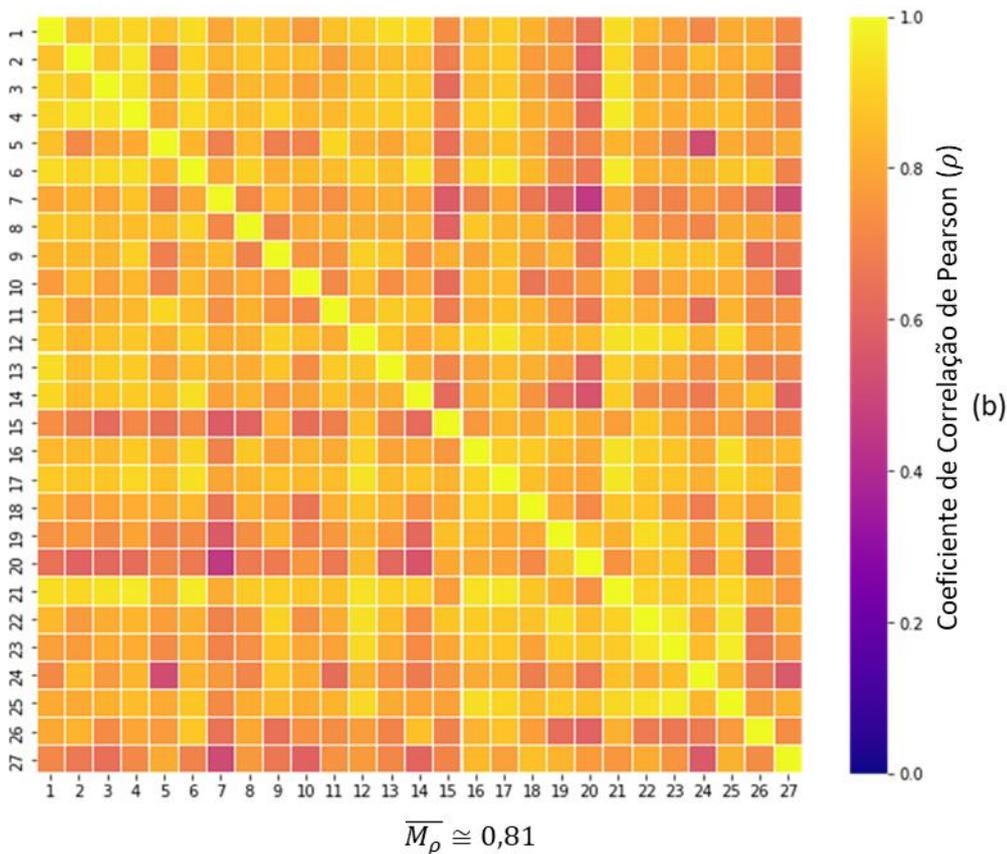
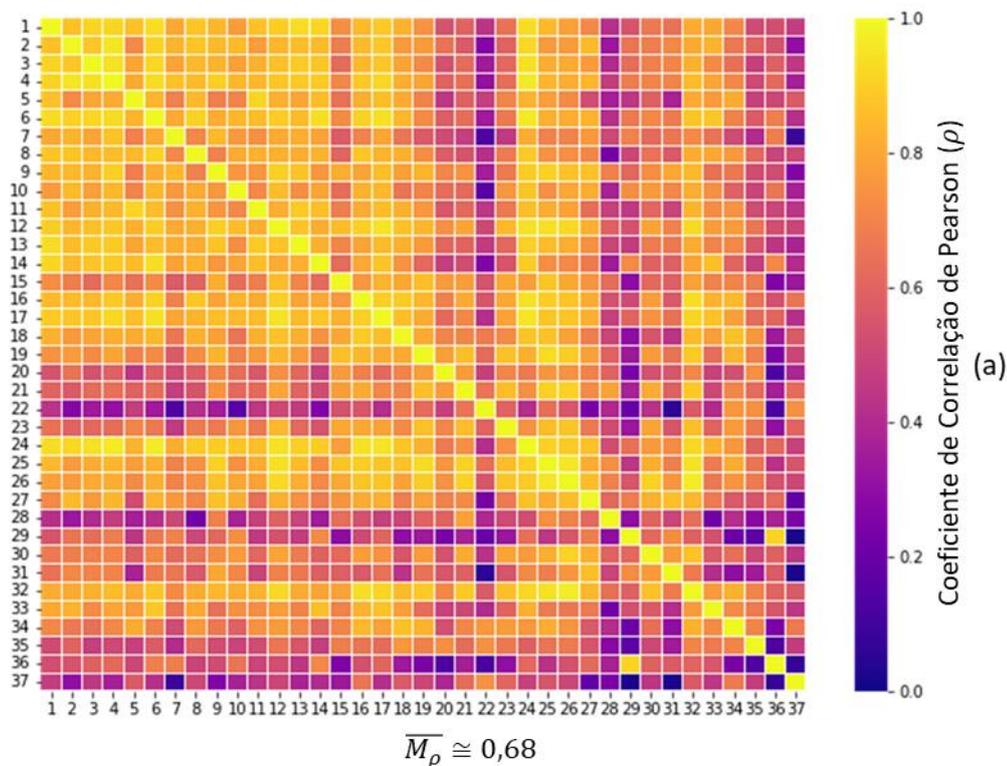
Um ensaio com a imposição e a retirada de uma falta de curto-circuito de 17% das espiras de um polo de uma fase do estator é utilizado para demonstrar o funcionamento das etapas desta metodologia. A Figura 67 (a) mostra as séries temporais com o histórico de amplitudes de duas harmônicas da  $f_m$  que foram sensibilizadas no sensor 1 pela imposição e retirada da falta. É possível observar que a imposição da falta provoca instantaneamente o aumento de amplitude destas séries temporais e, após a retirada da falta, a máquina volta a operar na condição sadia com a amplitude próxima a do período de referência. A Figura 67 (b) apresenta a evolução do indicador parcial de alteração,  $I_{PA}(t)$ , ao longo do período avaliado. Os pontos de imposição e retirada das faltas são conhecidos, *a priori*, nos ensaios e são também indicados na Figura 67 (b). Observa-se que nos instantes de imposição e de retirada da falta o número de séries temporais alteradas simultaneamente é mais significativo que nos demais instantes amostrais. Esta é uma característica de faltas instantâneas, como as que são aplicadas no GS nestes ensaios experimentais. A ocorrência de falsos positivos proveniente do processo de detecção de alterações também é observada ao longo do ensaio, em menor proporção com relação aos instantes de imposição e retirada da falta (verdadeiros positivos).

Figura 67. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas pela imposição e pela retirada de uma falta de curto-circuito de espiras de um polo do estator; (b) Evolução do indicador parcial de alterações  $I_{PA}(t)$ .



O processamento do indicador global de alteração ( $I_{GA}$ ) é realizado por meio da matriz de correlação do conjunto de séries temporais alteradas em cada instante  $t$  do  $I_{PA}(t)$ . Uma análise visual deste procedimento pode ser realizada por meio da ilustração da matriz de correlação das 37 séries temporais com alteração detectada no entorno do instante  $t = 23$  do indicador parcial de alteração,  $I_{PA}(23) = 37$ , apresentado na Figura 67 (b), que corresponde ao ponto de imposição da falta. Essa matriz é ilustrada na Figura 68 (a) por meio de um correlograma associado a um gráfico de calor, onde se observa que a maioria dos pares de séries temporais alteradas e detectadas apresenta coeficiente de correlação superior a 0,5. Observa-se também a ocorrência de falsos positivos neste conjunto, como as séries temporais 22, 28 e 37 que apresentam coeficientes de correlação inferiores a 0,5 quando comparadas com a maioria das demais séries do conjunto.

Figura 68. (a) Matriz de correlação do conjunto de séries detectadas com alteração no instante de imposição da falta, representada por um gráfico de calor; (b) Matriz de correlação do conjunto reduzido de séries temporais com maiores coeficientes de correlação, representada por um gráfico de calor.

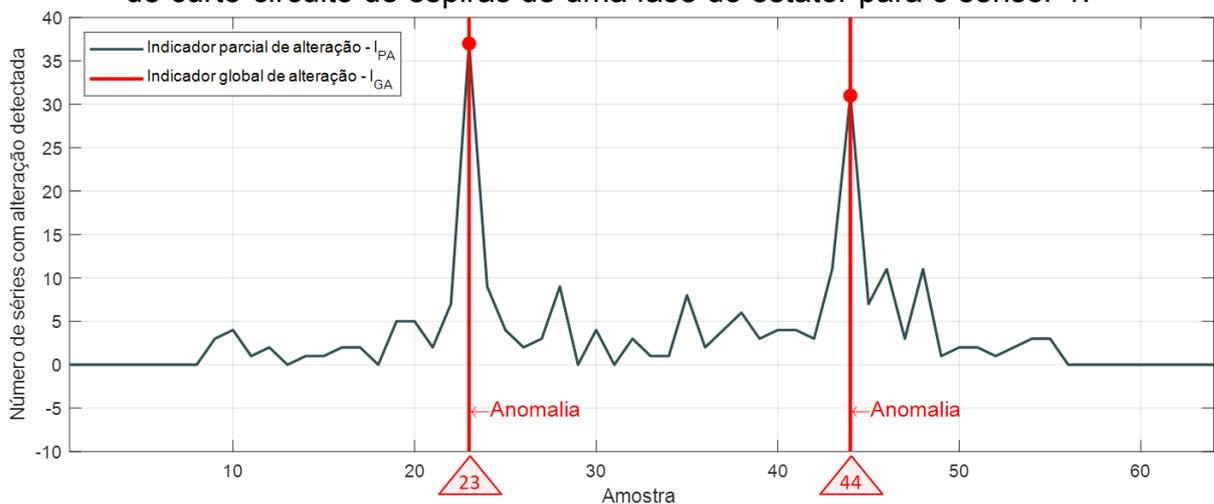


Fonte: Adaptado de Grillo *et al.* (2022a).

O índice  $\overline{M}_\rho$  para este conjunto inicial de 37 séries é aproximadamente 0,68. Para aprimorar a resposta deste índice, retirou-se gradativamente 10 séries com baixo coeficiente de correlação e obteve-se um novo conjunto com 27 séries e com índice  $\overline{M}_\rho \cong 0,81$ , apresentado graficamente na Figura 68 (b). Neste novo conjunto de séries resultante, a maioria dos pares de séries apresenta coeficiente de correlação superior a 0,8. Este valor é adequado para estabelecer uma associação entre as séries temporais deste conjunto e gerar o indicador global de alteração  $I_{GA}$ .

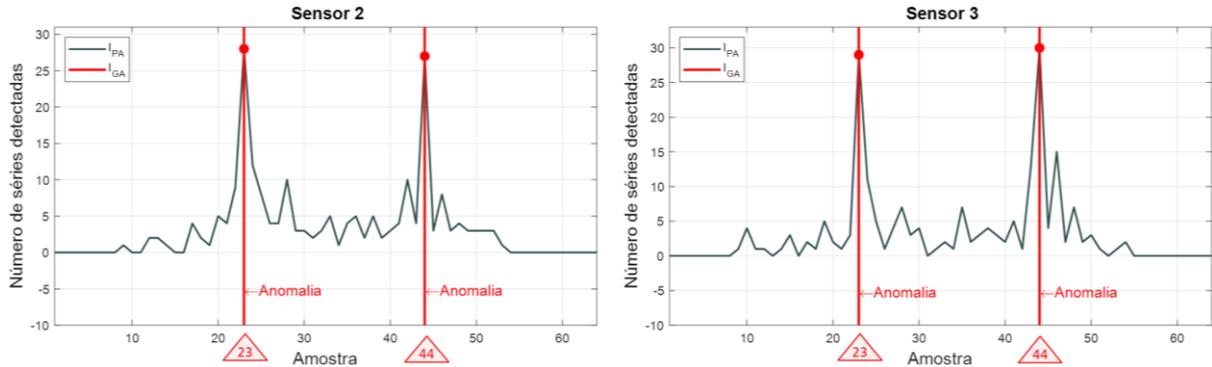
A resposta final da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada é apresentada na Figura 69 para o sensor 1, que mostra a evolução do indicador parcial de alteração junto ao indicador global de alteração gerado, representado pelos alertas de ocorrência de anomalias na assinatura magnética continuada do GS no ensaio avaliado. Esses pontos de alerta coincidem com os instantes de imposição e retirada da falta investigada neste ensaio. Esta resposta mostra que o sistema de monitoramento proposto foi eficiente na detecção de alterações impostas sobre a máquina, detectando os momentos de ocorrência e de reparo desta falta incipiente. A avaliação dos outros pontos do  $I_{PA}(t)$  com as matrizes de correlação possibilitou descartar os falsos positivos do processo de detecção de alteração que ocorreram ao longo do experimento. A avaliação dos *datasets* obtidos pelos sensores 2 e 3 apresentaram resultados similares, como mostra a Figura 70, com o indicador global de alteração identificando corretamente os pontos de anomalia da assinatura magnética do GS.

Figura 69. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de curto-circuito de espiras de uma fase do estator para o sensor 1.



Fonte: Autor.

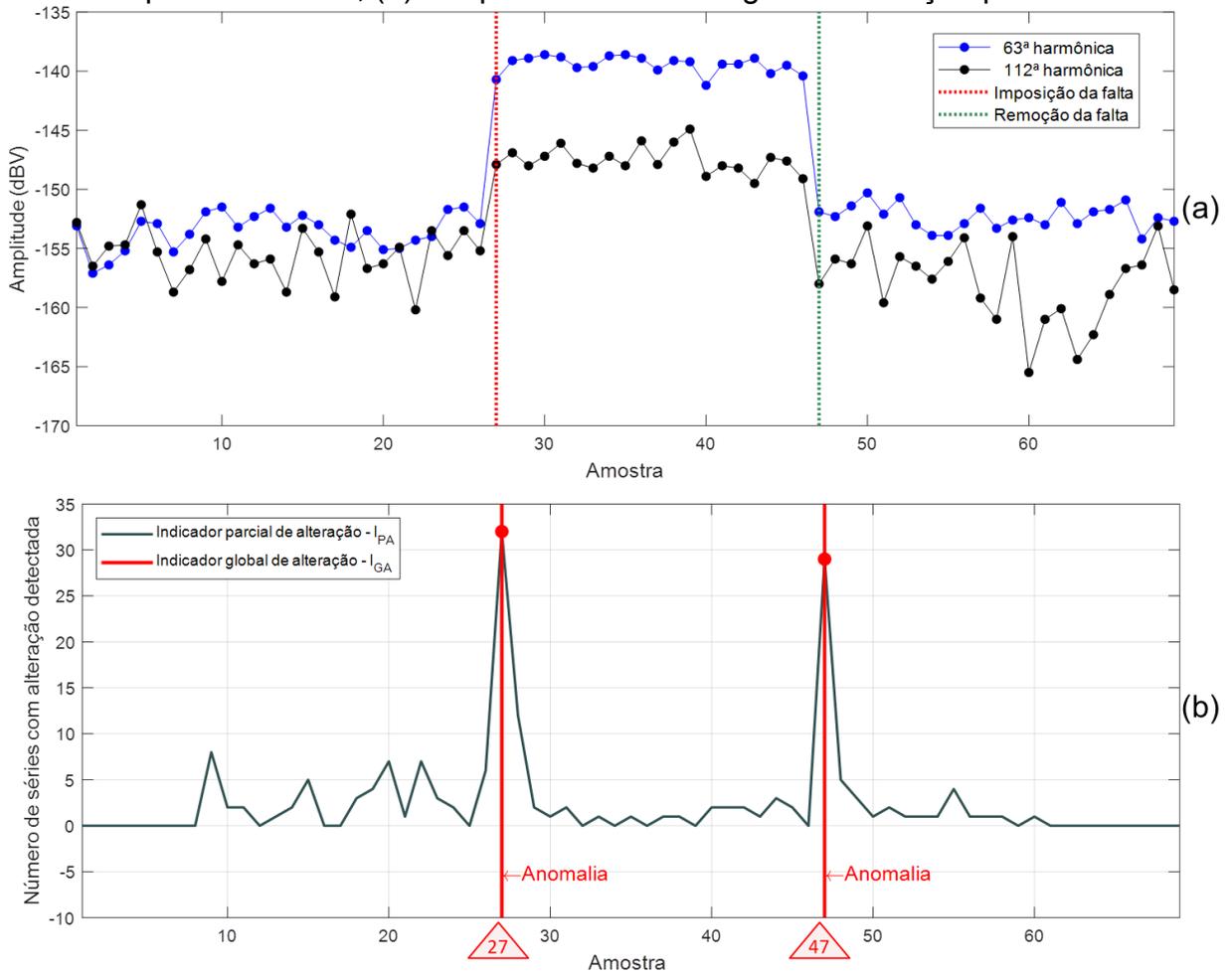
Figura 70. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de curto-circuito de espiras de uma fase do estator para os sensores 2 e 3.



Fonte: Autor.

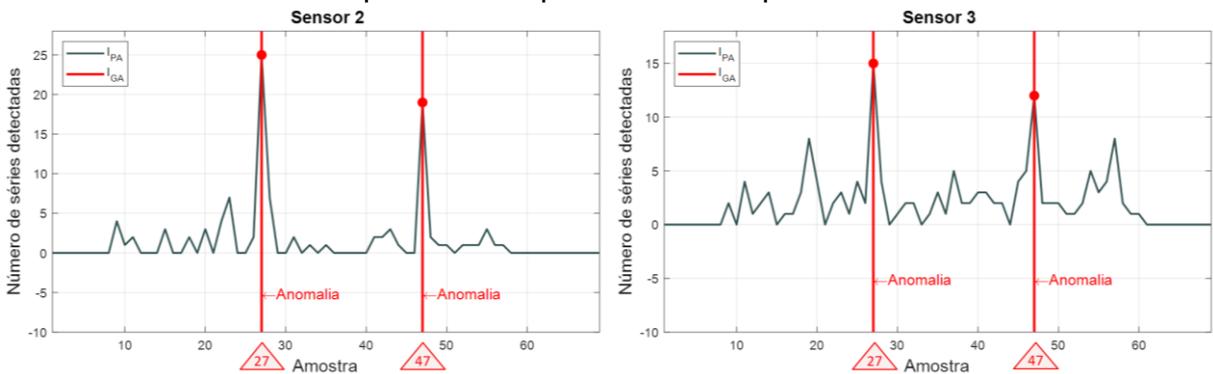
A Figura 71 apresenta o resultado da aplicação do sistema de diagnóstico proposto na avaliação do ensaio com a imposição e a remoção de uma falta de retirada de 50% das espiras de um polo do estator. A Figura 71 (a) apresenta a evolução do histórico de amplitudes das componentes harmônicas de ordem 63 e 112, que são sensibilizadas nos instantes da imposição e da retirada desta falta. A Figura 71 (b) apresenta os indicadores de alteração obtidos por meio da metodologia de avaliação periódica. Observa-se pela evolução do  $I_{PA}(t)$  a grande incidência de séries detectadas com alteração nas duas modificações realizadas no circuito eletromagnético da máquina. A análise da matriz de correlação permitiu a geração do  $I_{GA}$  nestes dois instantes, de maneira que o sistema de diagnóstico periódico detectou automaticamente os instantes de imposição e retirada da falta. A Figura 72 mostra a avaliação dos *datasets* obtidos pelos sensores 2 e 3, trazendo resultados complementares ao resultado obtido para o sensor 1, com o  $I_{GA}$  identificando os mesmos pontos de alteração da assinatura magnética continuada do GS.

Figura 71. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de retirada de espiras de um polo do estator; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica.



Fonte: Autor.

Figura 72. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de retirada de espiras de um polo do estator para os sensores 2 e 3.

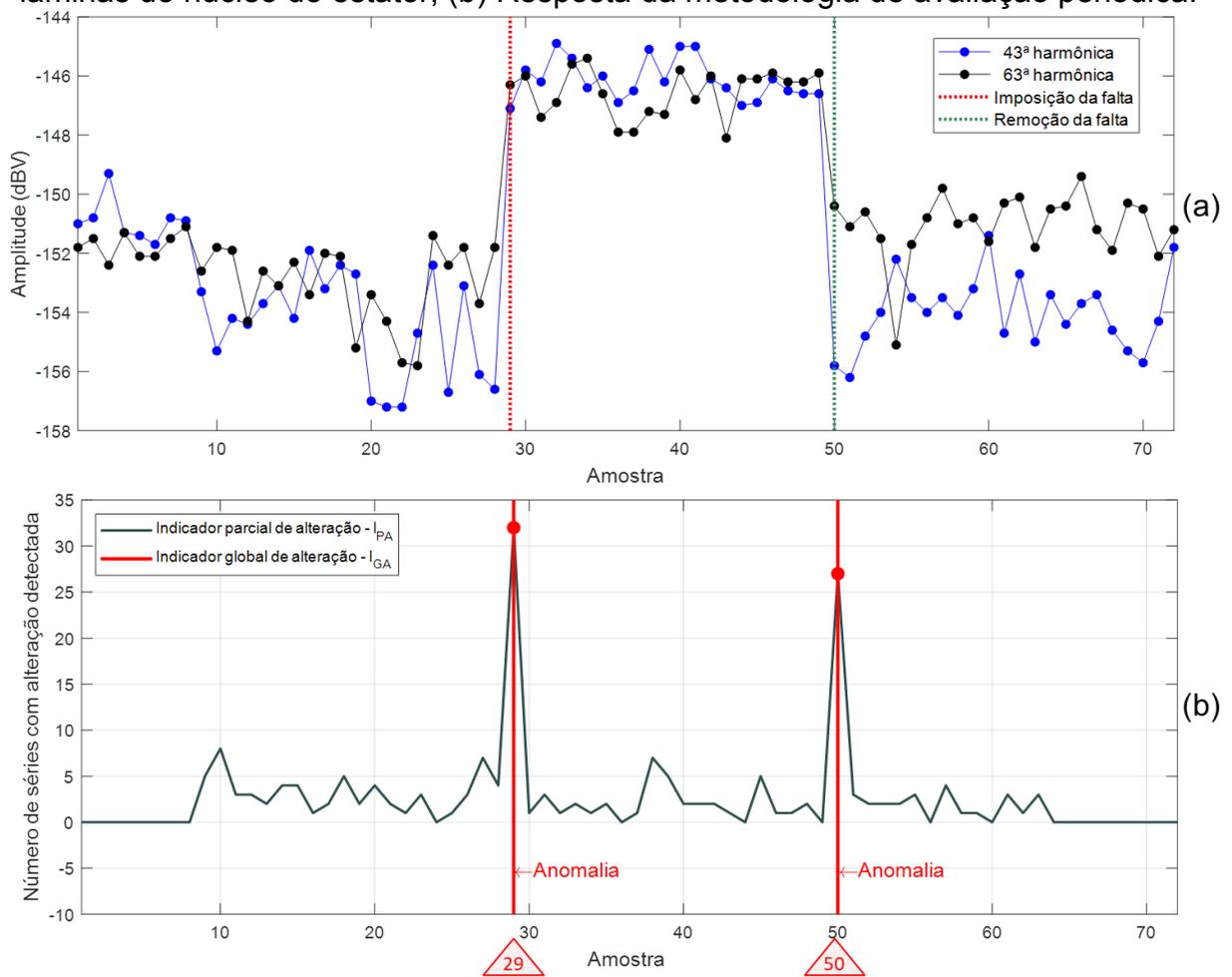


Fonte: Autor.

A Figura 73 apresenta o resultado da aplicação do sistema de diagnóstico proposto na avaliação de um ensaio com a imposição e a remoção de uma falta de

curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator. Na Figura 73 (a) é apresentada a evolução do histórico de amplitudes da 43ª e da 63ª harmônica da  $f_m$ , que são sensibilizadas nos instantes da imposição e da retirada desta falta. A Figura 73 (b) apresenta os indicadores de alteração obtidos por meio da metodologia de avaliação periódica. Observa-se que a metodologia proposta também detectou os dois eventos de alteração da assinatura magnética impostos na máquina, gerando dois alertas globais de alteração coincidentes com os pontos de imposição e remoção das faltas.

Figura 73. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica.

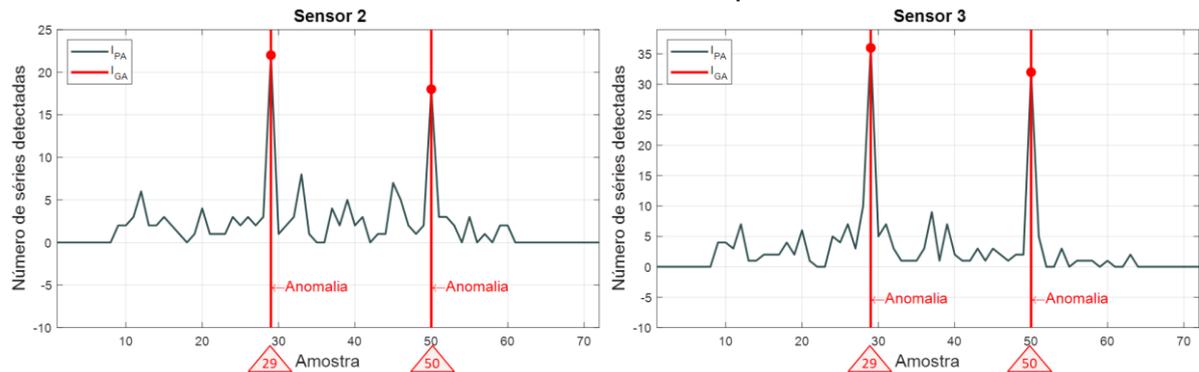


Fonte: Autor.

A Figura 74 mostra a avaliação dos *datasets* obtidos pelos sensores 2 e 3, que trazem resultados que reforçam o resultado obtido para o sensor 1. Para estes dois sensores, o indicador global de alteração identificou os mesmos pontos de alteração da assinatura magnética da GS, com alterações de número de séries

detectadas com alteração entre os sensores devido a diferença de posição entre eles.

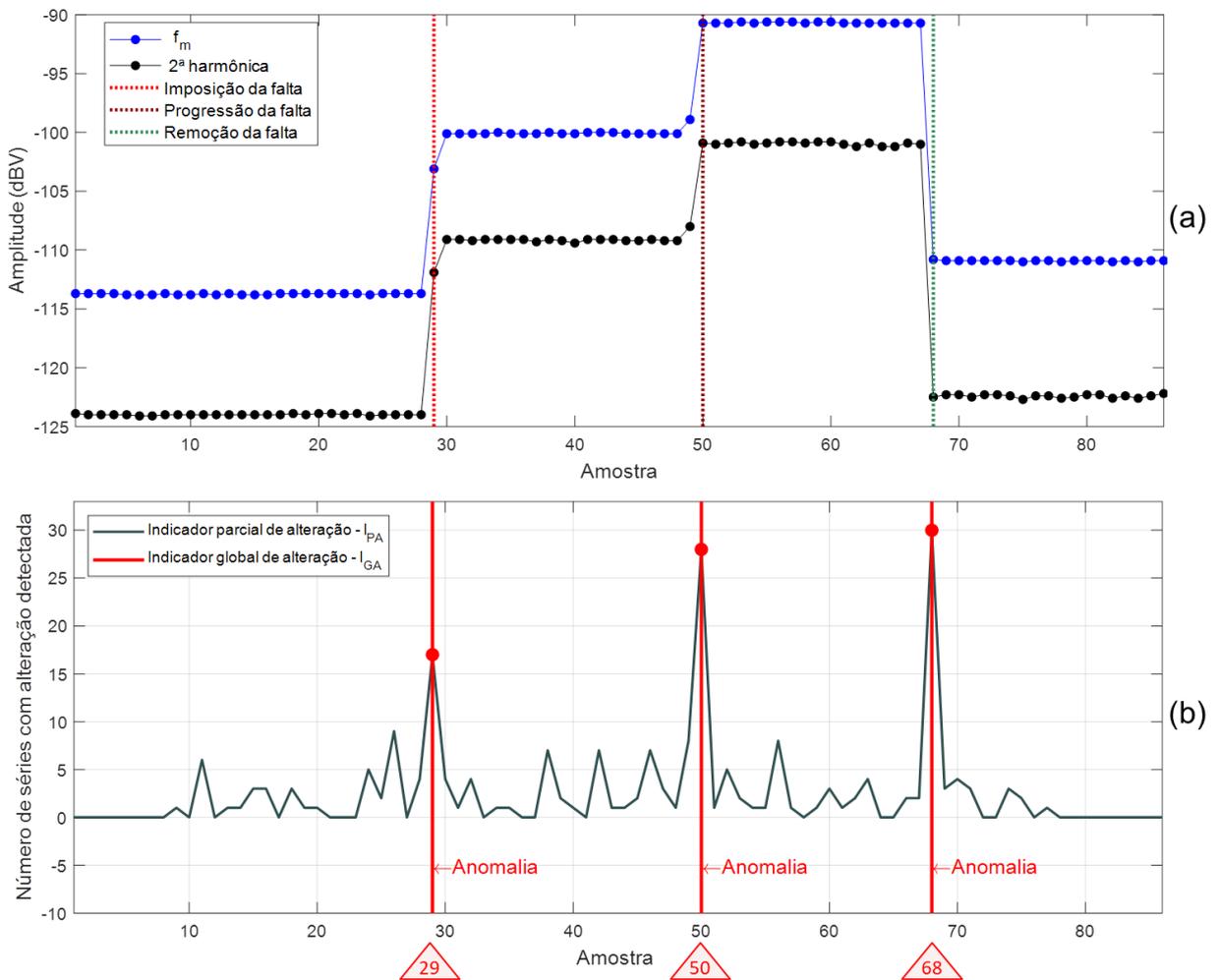
Figura 74. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de curto-circuito entre lâminas do núcleo do estator para os sensores 2 e 3.



Fonte: Autor.

Por fim, a Figura 75 apresenta o resultado da aplicação da metodologia de avaliação periódica no *dataset* com dados do ensaio de retirada de espiras de um polo do rotor. Neste ensaio, a falta foi aplicada em dois níveis, sendo removidas inicialmente 20% das espiras de um polo e na sequência 50% das espiras deste mesmo polo, simulando uma progressão da falta incipiente. Na sequência destes dois eventos, a falta é removida e o GS volta a operar na condição sadia, totalizando três alterações no circuito eletromagnético do GS durante o ensaio. A Figura 75 (a) apresenta a evolução do histórico de amplitudes da  $f_m$  e da sua 2ª harmônica, que são sensibilizadas nos instantes da imposição e da retirada desta falta. A Figura 75 (b) apresenta os indicadores de alteração obtidos por meio da metodologia de avaliação periódica. Observa-se pela evolução do  $I_{PA}(t)$  e pelos indicadores globais de alteração gerados, representados pelos alertas de detecção de anomalias, que a metodologia de avaliação periódica foi capaz de detectar as três alterações na assinatura magnética continuada do GS neste ensaio experimental. É possível também observar um maior número de séries com amplitudes alteradas e detectadas com o aumento da severidade da falta.

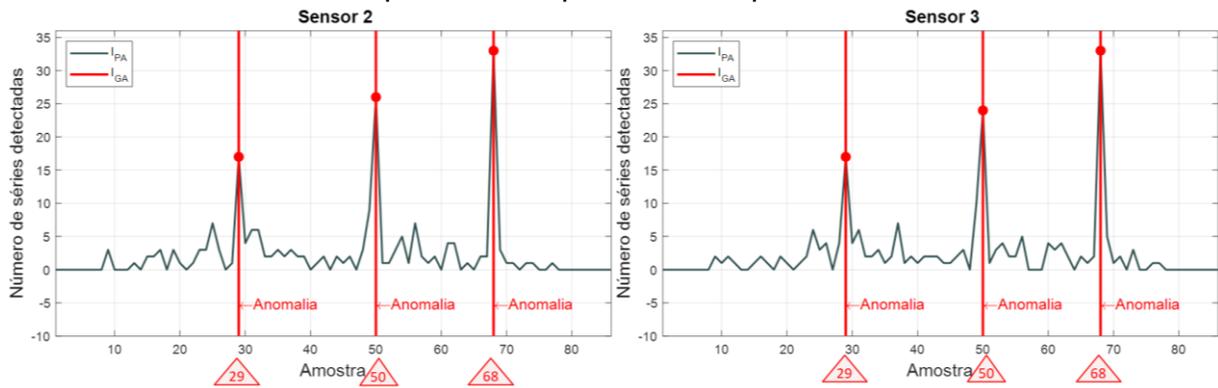
Figura 75. (a) Séries de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas pela imposição e pela remoção de uma falta de retirada de espiras de um polo do rotor; (b) Resposta da metodologia de avaliação periódica.



Fonte: Autor.

Estes resultados são reforçados pela avaliação dos *datasets* obtidos pelos sensores 2 e 3, cujos resultados são apresentados na Figura 76. Observa-se que os indicadores globais de alteração assinalam os mesmos instantes de alteração da assinatura magnética da máquina, que é o comportamento esperado para as faltas instantâneas avaliadas nestes ensaios experimentais.

Figura 76. Resposta da metodologia de avaliação periódica em um ensaio de falta de retirada de espiras de um polo do rotor para os sensores 2 e 3.



Fonte: Autor.

Comparando os resultados obtidos para os três sensores em cada ensaio, observa-se diferenças tanto na evolução do  $I_{PA}(t)$  quanto no número de séries alteradas e correlacionadas que geram o  $I_{GA}$ . Esta diferença se deve, principalmente, à diferença de posição entre os sensores, que captam campos magnéticos com características distintas em cada posição.

De maneira geral, a aplicação dos *datasets* dos ensaios experimentais realizados no GS de 8 polos na metodologia de avaliação periódica desenvolvida apresentou resultados positivos, permitindo a detecção de todas as alterações do circuito eletromagnético da máquina nos ensaios realizados.

#### 7.4.2 *Dataset* obtido em um GS de uma usina hidrelétrica

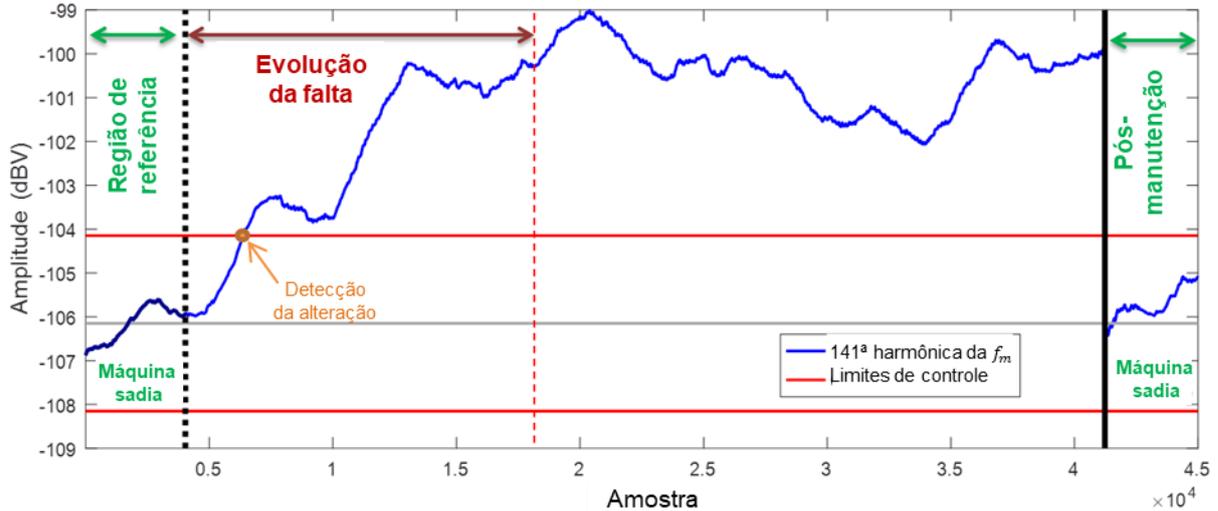
O *dataset* avaliado nesta seção foi obtido no GS de 305 MVA e 56 polos em uma usina hidrelétrica operando conectada ao sistema elétrico brasileiro. A  $f_m$  para este GS é de aproximadamente 2,14 Hz na operação em 60 Hz. A assinatura magnética continuada foi obtida por meio de um equipamento para monitoração do campo magnético externo do GS projetado e instalado para realizar a monitoração contínua da máquina enquanto em operação. Este equipamento foi apresentado na seção 3.3.3 e conta com seis sensores de campo magnético por indução posicionados próximo ao centro da altura do pacote estatórico, na parte externa da carcaça do estator, de maneira distribuída para monitorar diferentes regiões do GS. A estrutura de instalação e posicionamento dos sensores é apresentada na Figura 13. O *dataset* avaliado é composto pelas séries com histórico de amplitudes

das componentes harmônicas da  $f_m$  até a frequência de 1000 Hz, totalizando 467 séries temporais que compõe a assinatura magnética do GS neste período. Além disso, séries temporais contendo as medidas de  $P$  e  $Q$  no período avaliado completam o conjunto de dados de entrada aplicado na metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada do GS.

O período avaliado neste *dataset* compreende a evolução de uma falta incipiente de vibração mecânica no eixo do GS. Esta falta sensibilizou a assinatura magnética do GS por meio da alteração do valor médio de algumas séries temporais de amplitude de harmônicas da  $f_m$ , o que possibilitou sua detecção. A análise da assinatura magnética continuada do GS diante desta ocorrência de falta é relatada por Grillo *et al.* (2022b, 2022a), Santos (2021) e Freitas *et al.* (2019). Além deste caso, não foi encontrado na literatura científica relatos de detecção de faltas por meio do campo magnético externo em um GS neste patamar de potência, em operação sincronizada com um sistema elétrico.

A Figura 77 mostra o histórico de amplitudes da 141ª componente harmônica da  $f_m$  durante a ocorrência da falta de vibração mecânica. Nesta figura apresenta-se um período de aproximadamente onze meses, cerca de 45000 amostras, compreendendo um mês antes do início da evolução da falta, utilizado como referência da máquina sadia, e o período de evolução da falta que ocorreu entre três e quatro meses. Após este período, a máquina operou com a falta até um evento de parada do GS para manutenção, onde foi realizado o reparo da falta de vibração. Após a manutenção, com o GS operando novamente na condição sadia, apresenta-se um período de um mês em que o patamar de amplitude desta componente harmônica volta para um nível próximo a condição pré-falta. A aplicação do gráfico de controle Shewhart com limites  $3\sigma$  se mostrou eficiente na detecção de alteração do valor médio desta componente, como apresentado na Figura 77. A alteração de amplitude devido à falta observada nesta série foi muito superior às alterações provocadas por variações do ponto de operação do GS, permitindo a detecção da falta mesmo sem a aplicação do processo de estratificação da assinatura magnética de acordo com o ponto de operação do GS.

Figura 77. Série com o histórico de amplitudes da 141ª componente harmônica da  $f_m$  durante a evolução de uma falta de vibração mecânica no GS de 305 MVA.



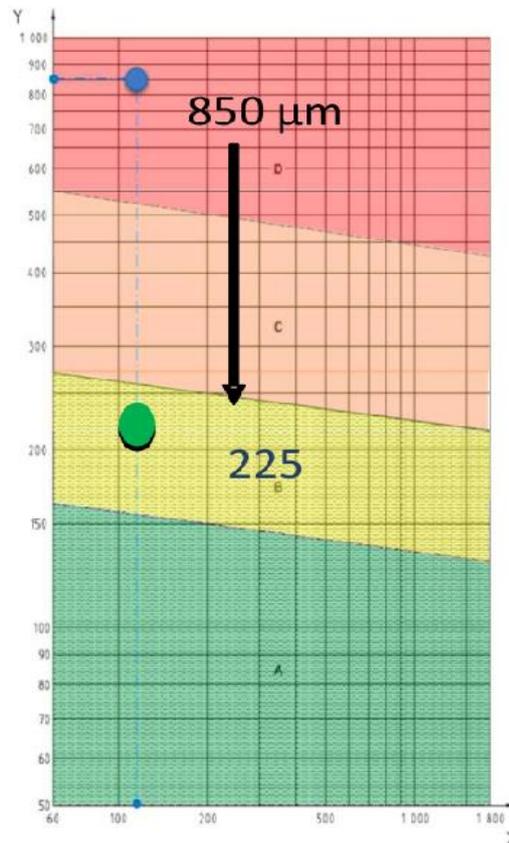
Fonte: Adaptada de Grillo *et al.* (2022a).

Na ocasião de ocorrência da falta, a análise e detecção das alterações na assinatura magnética continuada foram realizadas de maneira visual por um especialista, demandando um elevado tempo para avaliação e deixando as conclusões limitadas pela constatação de um pequeno número de séries de amplitude com alteração visual perceptível. Além disso, a influência das variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética continuada não foi levada em consideração na avaliação, de maneira que apenas as séries com grande alteração de amplitude devido à falta puderam ser detectadas (Freitas *et al.*, 2019; Santos, 2021). Neste contexto, a metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada desenvolvida nesta tese apresenta a vantagem de fornecer uma resposta automática rápida, além de considerar as influências das variações do ponto de operação sobre a assinatura magnética para geração de indicadores de falta.

A evolução desta falta também foi detectada por um sistema comercial de monitoração de vibração mecânica instalado no GS e constatada pela equipe de manutenção da usina em uma parada de manutenção onde foi feito o reparo da falta. As medições de vibração mecânica realizadas na linha de eixo do GS indicaram uma vibração de 850  $\mu\text{m}$  pico a pico, estando em uma condição inaceitável segundo a norma ISO 7919-5, que descreve diretrizes para avaliação de vibrações mecânicas em geradores síncronos de usinas hidrelétricas. Os critérios desta norma são apresentados na Figura 78, onde a faixa vermelha indica uma

condição inaceitável, a faixa laranja indica uma condição insatisfatória, a faixa amarela indica uma condição aceitável e a faixa verde indica uma condição boa. Nesta figura, o eixo das abcissas se refere à velocidade de rotação do eixo do GS, em rotações por minuto (rpm), e o eixo das ordenadas se refere à vibração, em  $\mu m$  pico a pico. Após as ações de manutenção para correção desta falta, a medição de vibração passou de 850  $\mu m$  pico a pico para 225  $\mu m$  pico a pico, estando dentro de uma condição aceitável de acordo com a norma, como indicado na Figura 78 para o GS operando com velocidade nominal de 128 rpm (Freitas *et al.*, 2019).

Figura 78. Critérios da norma ISO 7919-5 para vibração do eixo do gerador síncrono, com a indicação dos valores de vibração medidos no GS com a falta e medidos após as ações de reparo pela equipe de manutenção da usina.



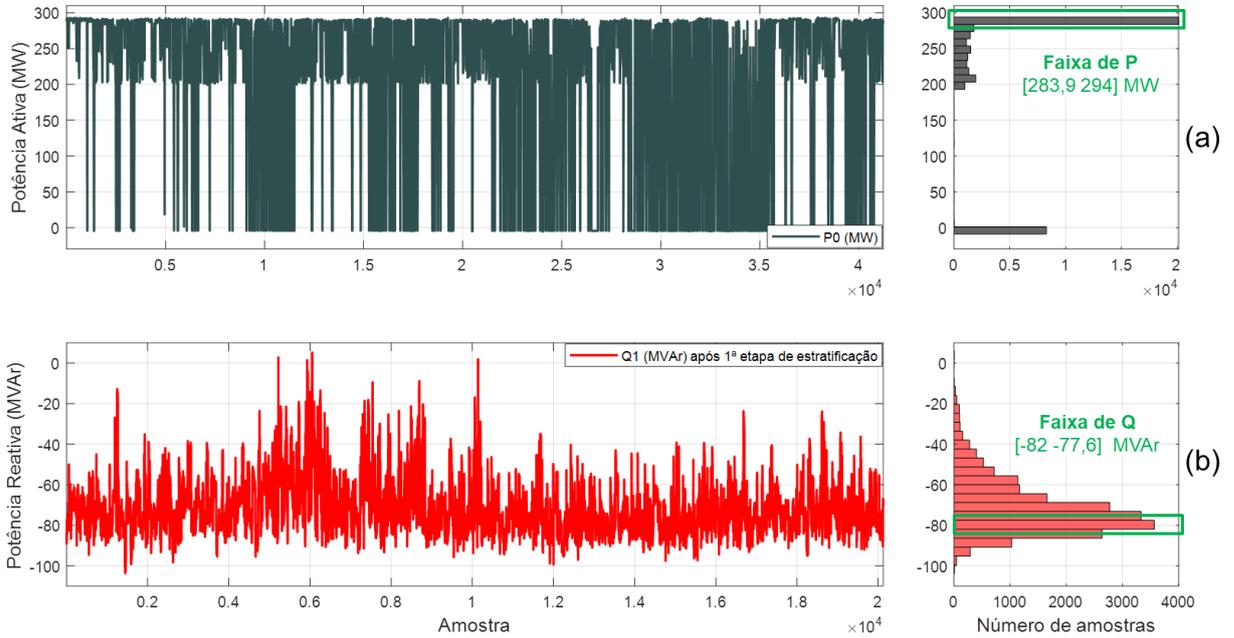
Fonte: Adaptada de Freitas *et al.*(2019).

A aplicação da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética foi realizada por meio da avaliação de um *dataset* contendo a assinatura magnética continuada do GS e as séries de medidas de  $P$  e  $Q$  obtidas em um período de 10 meses (aproximadamente 41000 amostras), que engloba o período de evolução da falta. As medidas foram sincronizadas para a avaliação. Na sequência, foi realizado

o processo de estratificação da assinatura magnética continuada de acordo com o ponto de operação. A Figura 79 (a) apresenta a  $P$  do GS no período inicial avaliado, assim como o histograma que indica as regiões com maior frequência de operação do GS. Para a primeira etapa do processo de estratificação, selecionou-se a região de maior ocorrência de medições de potência ativa, que compreende a faixa de 283,9 à 294 MW, correspondendo a uma faixa de variação estreita de aproximadamente 3,3% da potência nominal do GS. Com esta divisão, o *dataset* resultante apresentou aproximadamente 20100 amostras. A segunda etapa do processo de estratificação foi realização com relação à potência reativa. A Figura 79 (b) apresenta a  $Q$  para o *dataset* resultante da primeira etapa do processo de estratificação, onde é apresentado também o histograma mostrando as regiões de operação com maior número de medições. Para esta segunda etapa, selecionou-se as medidas quando o GS operou com  $Q$  na faixa de -82 à -77,6 MVar, o que corresponde a uma faixa de variação de aproximadamente 1,4% da potência nominal do GS. O *dataset* final apresentou aproximadamente 3500 amostras, correspondendo às medições realizadas com o GS operando com pequenas variações de operação.

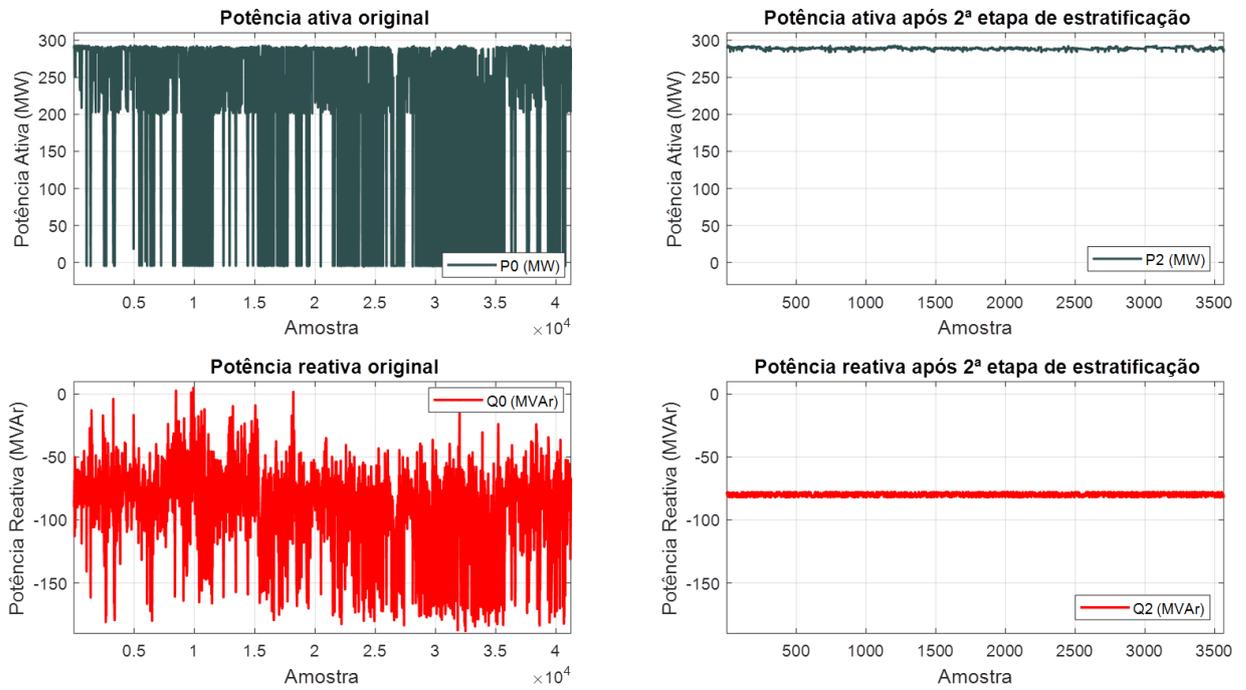
A Figura 80 apresenta o resultado do processo de estratificação das séries de medidas de  $P$  e  $Q$  com relação aos conjuntos de medidas iniciais. Pode-se observar que os conjuntos de medidas de  $P$  e  $Q$  após as duas etapas de estratificação apresentam uma variabilidade muito menor que o conjunto inicial de medidas, limitando a variação de amplitude de despacho de potência no período selecionado. A Figura 81 mostra o histórico de amplitudes da 141ª componente harmônica da  $f_m$  após o processo de estratificação, assim como a aplicação dos limites de controle  $3\sigma$  para detecção da alteração do valor médio. Comparando esta série com o histórico de amplitudes original, apresentado na Figura 77, observa-se uma redução nas oscilações de amplitude, embora os valores médios na condição sadia e em falta sejam próximos.

Figura 79. (a) Série com medidas de  $P$  no período inicial de avaliação com histograma para identificação das regiões de operação; (b) Série com as medidas de  $Q$  resultante da primeira etapa do processo de estratificação com o histograma para identificação das regiões de operação.



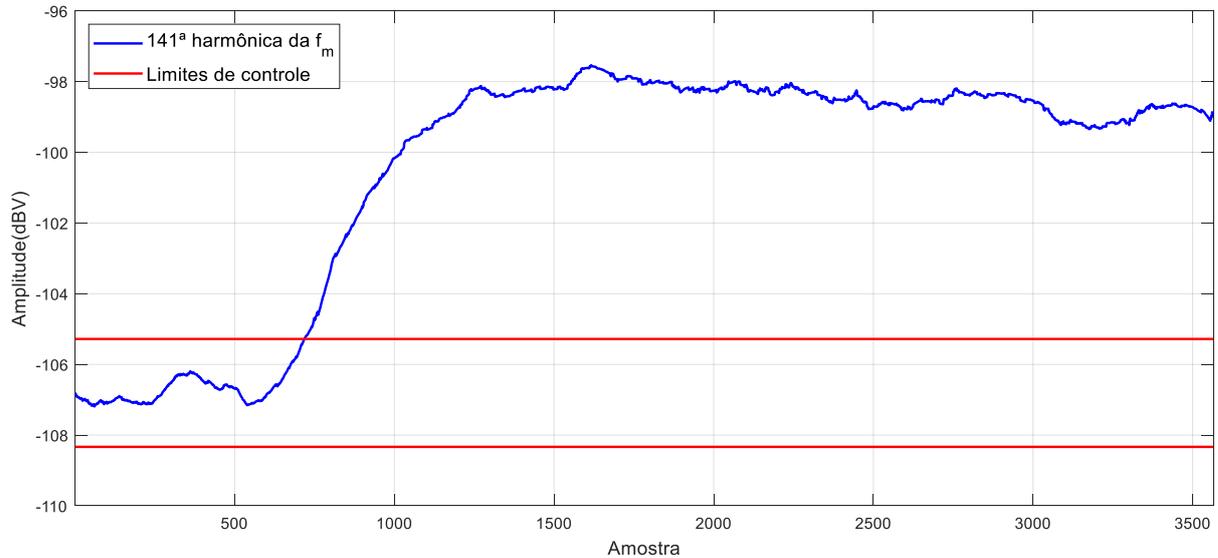
Fonte: Adaptada de Grillo *et al.* (2022a).

Figura 80. Potência ativa e potência reativa do *dataset* original e do *dataset* resultante do processo de estratificação.



Fonte: Autor.

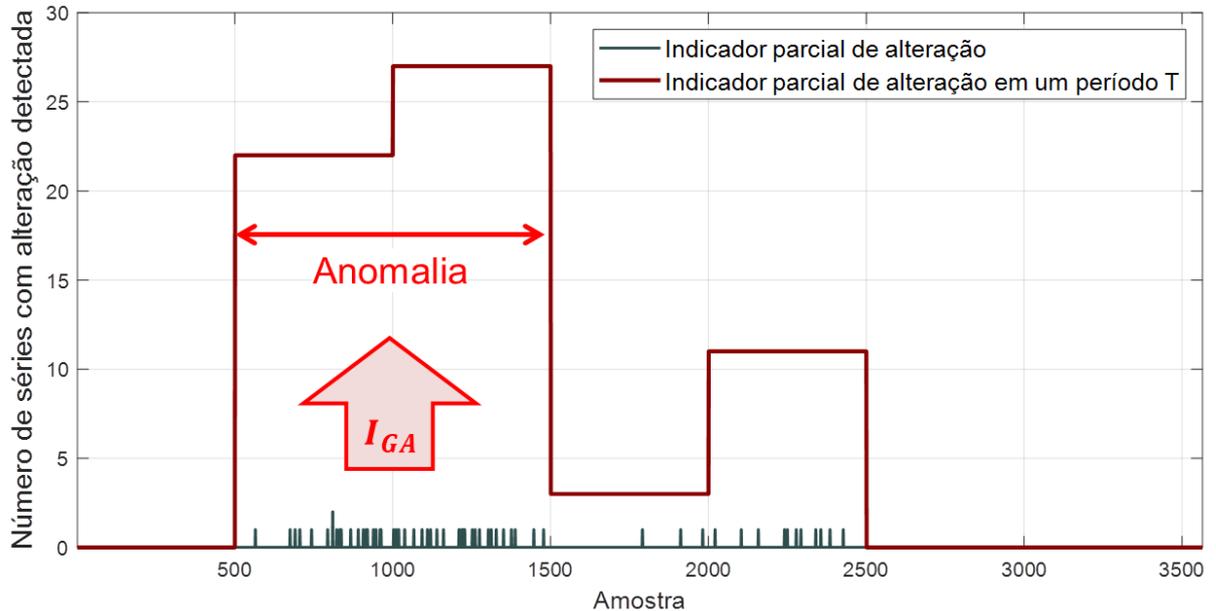
Figura 81. Série com o histórico de amplitudes da 141ª componente harmônica da  $f_m$  após as duas etapas do processo de estratificação.



Fonte: Autor.

O resultado da aplicação da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética continuada é apresentado na Figura 82. O processo de detecção de alterações é aplicado sobre o *dataset* resultante do processo de estratificação, composto por séries com aproximadamente 3500 amostras. A evolução do indicador parcial de alteração apresenta uma maior densidade de pontos não nulos na região de evolução da falta incipiente. Este comportamento do  $I_{PA}(t)$  se deve a natureza de evolução da falta incipiente investigada. As harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas apresentam uma alteração de tendência lenta e são detectadas com alteração em diferentes instantes, dependendo da velocidade de evolução da alteração de cada série. Este comportamento difere da avaliação de dados experimentais, onde a imposição é instantânea e as harmônicas sensibilizadas mudam conjuntamente em um curto período de tempo. Por este motivo, o  $I_{PA}(t)$  é também apresentado por períodos por meio de um somatório do número de séries detectadas com alteração em períodos ( $T$ ) compostos por 500 amostras. Com isso, consegue-se ilustrar de maneira mais assertiva as regiões com maior número de séries alteradas e detectadas.

Figura 82. Resposta da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética para o *dataset* obtido no GS de 305 MVA durante a ocorrência de uma falta incipiente de vibração mecânica.



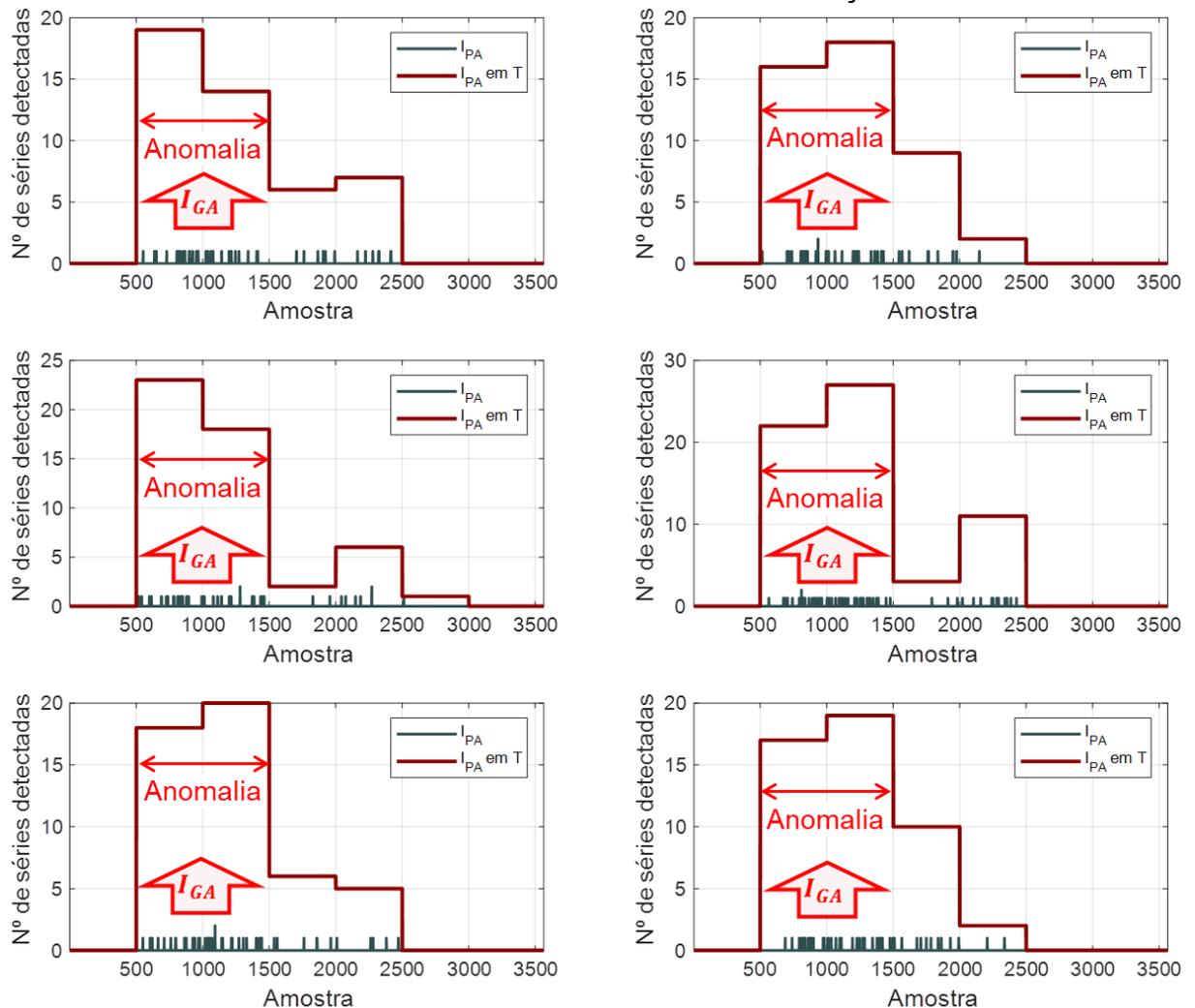
Fonte: Autor.

Avaliando os períodos entre as amostras 500 e 1500, foram detectadas 49 séries com alteração, gerando com conjunto de séries com histórico de amplitudes de harmônicas da  $f_m$  com índice de correlação  $\overline{M}_\rho$  de 0,67. Para melhorar este indicador e verificar o grau de associação linear das séries detectadas, foram retiradas 5 séries com baixa correlação deste conjunto, elevando o índice de correlação  $\overline{M}_\rho$  para 0,82. Com isso, obteve-se um conjunto com 44 séries temporais detectadas e com correlação forte entre si, permitindo a geração de um  $I_{GA}$  para sinalizar uma anomalia na assinatura magnética continuada do GS neste período.

Avaliando os *datasets* obtidos nos demais sensores por meio da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética, conseguiu-se detectar conjuntos de séries alteradas e correlacionadas em todos os sensores, como apresentado na Figura 83. Com isso, foi possível gerar um indicador global de alteração em cada um dos seis *datasets* avaliados, corroborando para a detecção da alteração da assinatura magnética continuada do GS durante a ocorrência desta falta. É possível notar a diferença do número de séries alteradas e detectadas no  $I_{PA}$  no período  $T$  entre as respostas dos diferentes sensores devido à diferença de posição entre os sensores no entorno do GS. Nestes resultados, algumas componentes harmônicas da  $f_m$  foram detectadas com alteração em todos os

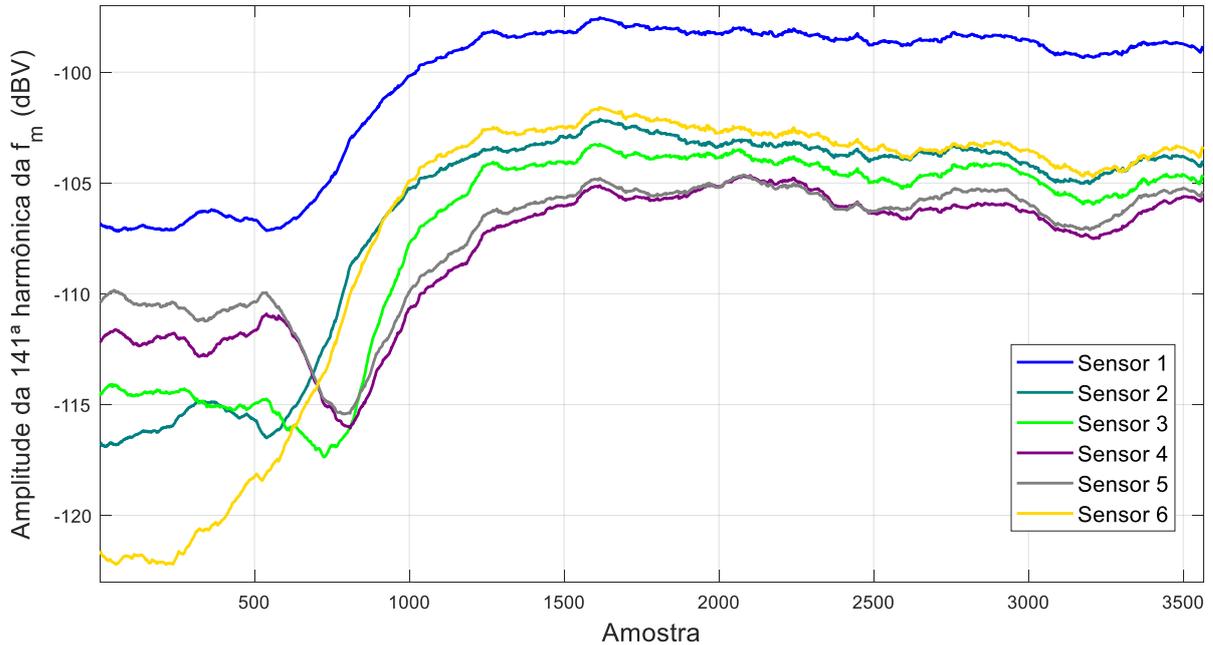
sensores, como a 141ª harmônica da  $f_m$  já utilizada em exemplos anteriores. A Figura 84 apresenta a evolução do histórico de amplitudes desta componente nos seis sensores monitorados, durante o período de ocorrência da falta incipiente. Este resultado confirma diretrizes para detecção de faltas obtidos por Santos (2021), que indicam a ocorrência de harmônicas da  $f_m$  sensibilizadas em todos os sensores conjuntamente em faltas de origem mecânica ou associadas ao rotor do GS.

Figura 83. Resposta da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética para os *datasets* obtidos em 6 sensores na monitoração do campo magnético externo durante a ocorrência de uma falta de vibração mecânica.



Fonte: Autor.

Figura 84. Evolução da série com o histórico de amplitudes da 141ª componente harmônica da  $f_m$ .



Fonte: Autor.

O resultado da aplicação da metodologia de avaliação periódica da assinatura magnética neste caso permitiu a detecção automática da falta por meio da avaliação da assinatura magnética continuada do GS obtida pela monitoração do campo magnético externo da máquina. Além disso, esta avaliação autônoma permitiu a detecção de conjuntos com uma quantidade maior de séries alteradas com relação às análises anteriores deste evento realizadas de maneira visual (Freitas *et al.*, 2019; Santos, 2021). Este resultado foi permitido pelo processo de estratificação da assinatura magnética continuada da máquina com relação à  $P$  e à  $Q$ , que permitiu minimizar a influência do ponto de operação sobre as séries de medidas avaliadas. Isso permitiu a detecção de alterações em séries pouco sensibilizadas pela falta, que apresentavam maiores variações devido às alterações do ponto de operação, não permitindo a sua detecção visual.

## 7.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS DO CAPÍTULO

Neste capítulo foi avaliado o desempenho de diversas técnicas de detecção de alterações em séries temporais para aplicação na monitoração do campo magnético externo, apresentando seu desempenho por meio da avaliação de dados sintéticos e dados experimentais. Um grande conjunto de dados experimentais foi

avaliado com uma destas técnicas, permitindo a caracterização de alguns padrões preliminares nas faltas impostas nos ensaios experimentais, semelhante a estudos conclusivos realizados por Santos (2021). Outro segmento abordado foi a influência do ponto de operação sobre a amplitude das componentes espectrais do campo magnético externo, que também permitiu a constatação de padrões associados a este fenômeno, complementando algumas conclusões obtidas no capítulo 5. Por fim, o sistema de diagnóstico periódico foi aplicado na monitoração de dados obtidos em ensaios experimentais no GS de 10 kVA e de dados obtidos em um equipamento de monitoração no GS de 305 MVA. Estas aplicações apresentaram sucesso na detecção dos eventos investigados, validando os sistemas e as metodologias propostas para monitoração da condição do GS por meio da medição do seu campo magnético externo.

## 8 CONCLUSÕES

Nessa tese foi apresentado o desenvolvimento de uma metodologia para avaliação periódica da assinatura magnética continuada de GSs por meio da monitoração do seu campo magnético externo, a qual permite a detecção de faltas incipientes. Esta estratégia não invasiva para monitoração da condição de GSs tem potencial de aplicação prática em GSs operando sincronizados aos sistemas elétricos e foi concebida para avaliar a máquina em diferentes condições de carga, sem interferir em sua operação. A investigação foi conduzida a fim de se obter uma estratégia de detecção de faltas simples, de fácil implementação, que agregue rapidez e simplicidade, com o mínimo de exigências de capacidades de softwares e de hardwares. Assim, desenvolveu-se uma estratégia com a característica de ser apta e econômica para ser agregada em um equipamento que gere, sem grandes esforços computacionais, alertas de alterações incipientes em máquinas síncronas, minimizando falsos positivos. A metodologia pode ser agregada em softwares destinados à análise de faltas incipientes em GSs por especialistas.

A proposição dos procedimentos para avaliação da assinatura magnética do GS para a monitoração de sua condição partiu de uma revisão bibliográfica sobre a utilização de medidas do campo magnético externo para a detecção de faltas em máquinas síncronas e da avaliação de trabalhos anteriores desenvolvidos no GRUCAD neste campo de aplicação. Essa revisão bibliográfica cumpre o primeiro e segundo objetivo metodológico dessa tese. A partir da análise destes trabalhos, identificou-se como principais limitações das pesquisas existentes a necessidade de técnicas de detecção automática de alterações das características magnéticas da máquina diante de faltas e a necessidade de uma avaliação das influências das variações naturais de operação da máquina sobre estas características magnéticas. Estas limitações motivaram o desenvolvimento dessa tese, que apresenta procedimentos para a análise automática de centenas ou milhares de séries temporais contendo a assinatura magnética continuada do GS atualizada por meio de medidas do campo magnético externo obtidas ao longo de sua operação. O sistema de diagnóstico desenvolvido considera a influência das variações de operação do GS sobre as características magnéticas monitoradas, viabilizando desta maneira a aplicação prática desta estratégia na monitoração de GSs operando de forma sincronizada com sistemas elétricos.

O desenvolvimento deste procedimento para monitoração da condição do GS por meio da monitoração do seu campo magnético externo tomou como referência os trabalhos de Rigoni (2014) e Santos (2021), que utilizam como característica magnética a assinatura magnética continuada da máquina de maneira incipiente, formada pelo histórico de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  do GS. Esta estratégia exige a avaliação de centenas ou milhares de séries temporais para cada sensor utilizado pelo sistema de monitoração, dificultado a sua aplicação na geração de alertas de alterações da máquina, bem como da análise e da interpretação por parte de um especialista. As análises apresentadas nos trabalhos de Rigoni (2014) e Santos (2021) foram realizadas por meio de avaliações visuais comparativas, muitas vezes avaliando apenas algumas séries de amplitudes escolhidas. Neste cenário, essa tese propôs a utilização de técnicas de detecção de anomalias baseadas nos métodos de gráficos de controle, que compõe uma estratégia analítica de simples implementação computacional que permite automatizar esta avaliação.

A aplicação das técnicas de gráficos de controle Shewhart, de soma cumulativa (CUSUM), da média móvel exponencialmente ponderada (MMEP) e da variância móvel (VM) na avaliação de dados sintéticos, obtidos por simulação computacional, e de dados experimentais, obtidos por meio de ensaios em um GS de 10 kVA, apresentaram resultados positivos na detecção de alterações da assinatura magnética continuada provocadas por faltas. Estas técnicas se mostraram eficientes na detecção de alterações instantâneas e graduais nos *datasets* testados, comprovando a viabilidade de sua aplicação na metodologia desenvolvida para detecção de faltas. A repetibilidade dos resultados obtidos com o método de gráficos de controle Shewhart por meio da avaliação de dezenas de conjuntos de dados experimentais em condições operativas e de faltas distintas fortaleceu a proposta de utilização deste método para o desenvolvimento da metodologia proposta, que é uma solução inovadora neste segmento de monitoração não invasiva de máquinas elétricas (Grillo *et al.*, 2022b, 2022a). A obtenção dos dados sintéticos, a coleta de dados por meio da medição do campo magnético externo em GSs em condições de falta e a avaliação destes *datasets* com técnicas analíticas para detecção de anomalias em séries temporais cumprem o terceiro e o quarto objetivo metodológico dessa tese.

A avaliação da influência das variações do ponto de operação do GS sobre a sua assinatura magnética continuada evidenciou características e padrões de correlação entre as séries com as medidas de grandezas elétricas do GS e as séries com os históricos de amplitudes de componentes harmônicas da  $f_m$  obtidas por meio de medições do campo magnético externo. Com esta investigação, constatou-se a alta sensibilidade de algumas componentes harmônicas da  $f_m$  diante das variações de operação do GS, caracterizada por alterações de amplitude na assinatura magnética continuada monitorada. Estas alterações apresentam o potencial de gerar falsos positivos em processos de detecção de faltas em GS a partir da monitoração da assinatura magnética, comprovando a impossibilidade de dissociação entre estes dois conjuntos de variáveis na monitoração da condição do GS. Os resultados obtidos possibilitaram a elaboração de uma metodologia de estratificação da assinatura magnética continuada com relação às medidas de grandezas elétricas que caracterizam o ponto de operação do GS. Este processo possibilita a análise da assinatura magnética continuada com o GS operando em faixas limitadas de geração de potência ativa e potência reativa, com pequenas perturbações, o que contribui para a mitigação de falsos positivos no processo de detecção de faltas. Este estudo e o processo de estratificação da assinatura magnética continuada do GS proposta são contribuições desta tese, já que a revisão bibliográfica não indicou a presença de estudos direcionados à avaliação dos efeitos e do impacto das variações do ponto de operação sobre a avaliação do espectro de frequências das medidas do campo magnético externo na detecção de faltas. Esta avaliação cumpre o quinto objetivo metodológico desta tese.

A metodologia desenvolvida para monitoração periódica da assinatura magnética continuada de GSs integrou o processo de estratificação dos conjuntos de dados com relação ao ponto de operação com a técnica de detecção de alterações no valor médio nas séries temporais, cumprindo o sexto objetivo metodológico dessa tese. Além disso, a metodologia desenvolvida permite o processamento de um indicador global de alteração para o *dataset* avaliado para um sensor, o que possibilita o alerta de eventos onde ocorre a detecção de alterações em várias séries de amplitude em um mesmo período de tempo. A aplicação desta metodologia apresentou sucesso na detecção de faltas em *datasets* obtidos em ensaios experimentais no GS de 10 kVA em operação sincronizada, onde aplicou-se diferentes tipos de faltas de estator e de rotor. Além disso, esta metodologia foi

empregada na avaliação de *datasets* obtidos por meio de um equipamento de monitoração do campo magnético externo instalado em um GS de 305 MVA operando em uma usina hidrelétrica. Estes *datasets* foram obtidos no intervalo de evolução de uma falta incipiente de vibração mecânica, detectada tanto pela avaliação visual da assinatura magnética continuada obtida por meio do campo magnético externo quanto por um equipamento comercial de análise de vibrações. A avaliação destes *datasets* com a metodologia desenvolvida permitiu a detecção automática das alterações na assinatura magnética continuada, facilitando a detecção da falta. Estes resultados comprovam o forte potencial de aplicação da metodologia desenvolvida nessa tese em aplicações práticas de monitoração não invasiva de GS operando sincronizados aos sistemas elétricos. A validação da metodologia desenvolvida nessa tese com dados de ensaios experimentais e com dados obtidos por um equipamento instalado em um GS operando em uma usina hidrelétrica cumprem o sétimo e último objetivo metodológico dessa tese. Dessa maneira, o objetivo principal dessa tese foi alcançado, por meio do desenvolvimento e da validação de uma metodologia para monitoração periódica da assinatura magnética de geradores síncronos, obtida a partir de medidas do campo magnético externo, que permite a detecção de faltas incipientes.

Em suma, as principais contribuições inéditas desta tese são:

- i. A aplicação de técnicas analíticas de detecção de alterações baseadas em gráficos de controle na avaliação da assinatura magnética continuada de GS para detecção de faltas;
- ii. A análise e a avaliação da influência de variações do ponto de operação da máquina sobre a assinatura magnética do GS e suas implicações em processos de detecção de faltas por meio da monitoração do campo magnético externo;
- iii. O desenvolvimento de uma metodologia de monitoração periódica da assinatura magnética continuada que incorpora o processo de estratificação da assinatura magnética continuada com relação ao ponto de operação e o processo de geração de indicadores globais de alteração para geração de alertas automáticos diante de eventos detectados.

A validação prática da metodologia desenvolvida na avaliação de *datasets* obtidos em GSs operando com falta e sincronizados com o sistema elétrico, que

promoveu a detecção automática destas faltas nestas condições, são uma contribuição indireta desta tese.

A otimização desta metodologia de monitoração de GSs por meio do campo magnético externo pode ser explorada em trabalhos futuros por meio da investigação de estratégias mais robustas para detecção de alterações nas séries temporais, considerando tanto a aplicação de outras técnicas analíticas quanto a aplicação de técnicas de inteligência artificial. Além disso, pode-se investigar estratégias para identificar a confiabilidade de monitoração de cada componente harmônica da  $f_m$ , o que pode reduzir significativamente o número de séries de dados para análise e facilitar o processo de monitoração periódica, além de poder reduzir a incidência de falsos positivos. Outra vertente de pesquisa é a aplicação da transformada de Wavelet na transformação dos sinais medidos pelos sensores de campo por indução e o tratamento do espectro resultante para fins de monitoração da condição da máquina. Metodologias que possam caracterizar uma máquina sadia individualmente em função do seu ponto de operação se constitui também uma linha de investigação que pode colaborar tanto para a detecção de alterações no campo magnético externo devido a faltas quanto agregar maior robustez para evitar falsos positivos, principalmente. Tal investigação também poderia definir as faixas de avaliação em função dos pontos de operação com análises do comportamento de cada uma das séries, bem como caracterizar a sensibilidade das séries obtidas por cada sensor levando em conta assim a sua posição no entorno da máquina.

## REFERÊNCIAS

- AFRANDIDEH, S. *et al.* Turn to turn fault detection, discrimination, and faulty region identification in the stator and rotor windings of synchronous machines based on the rotational magnetic field distortion. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 35, n. 1, p. 292-301, 2020.
- ALBRIGHT, D. Interturn short-circuit detector for turbine-generator rotor windings. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems**, v. PAS-90, n. 2, p.478-483, 1971.
- AURICH, D. G. **Modelagem analítica para simulação de interações entre grandezas eletromagnéticas em geradores síncronos**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2022.
- BASTOS, J. P. A. **Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática**. 4. ed. Florianópolis, Brasil: Editora da UFSC, 2004.
- BEVILACQUA, M.; BRAGLIA, M. The analytic hierarchy process applied to maintenance strategy selection. **Reliability Engineering & System Safety**, v. 70, n. 1, p. 71-83, 2000.
- BIM, E. **Máquinas Elétricas e Acionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro, Brasil: Elsevier, 2012.
- BUSSAB, W. O; MORETTIN, P. A. **Estatística básica**. 9. ed. São Paulo, Brasil: Saraiva, 2017.
- CAPOLINO, G.-A. *et al.* State of the art on stray flux analysis in faulted electrical machines. *In: IEEE Workshop on Electrical Machines Design, Control and Diagnosis. Anais [...]*. Atenas, Grécia: IEEE, 2019.
- CEBAN, A.; PUSCA, R.; ROMARY, R. Study of rotor faults in induction motors using external magnetic field analysis. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 59, n. 5, p. 2082-2093, 2012.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. Porto Alegre, Brasil: McGraw-Hill, 2013.
- COSTA, A. F. B; EPPRECHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. 2. ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2009.
- CUEVAS, M. *et al.* Non-invasive detection of rotor short-circuit fault in synchronous machines by analysis of stray magnetic field and frame vibrations. **IEEE Transactions on Magnetics**, v. 52, n. 7, p. 1-4, 2016.
- EHYA, H. *et al.* Detailed magnetic field monitoring of short circuit defects of excitation winding in hydro-generator. *In: International Conference on Electrical Machines. Anais [...]*. Gotemburgo, Suécia: IEEE, 2020.

FOGLIATO, F. S.; RIBEIRO, J. L. D. **Confiabilidade e manutenção industrial**. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2011.

FREITAS, L. M. *et al.* Emprego de nova técnica na detecção de falta incipiente em gerador síncrono através do campo magnético externo. *In: XXV Seminário nacional de produção e transmissão de energia elétrica. Anais [...]*. Belo Horizonte, Brasil: 2019.

GRILLO, L. O. S. *et al.* A method for statistical processing of magnetic field sensor signals for non-invasive condition monitoring of synchronous generators. **Sensors**, v. 22, n. 22, p. 8631, 2022a.

GRILLO, L. O. S. *et al.* Equipment for monitoring synchronous generators condition through external magnetic field waveforms. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 21, n. 4, p. 527-548, 2022b.

GUIMARÃES, C. H. C. **Simulação dinâmica de sistemas elétricos de potência considerando os fenômenos de longa duração**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Rio de Janeiro, RJ: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2003.

HAN, Y.; SONG, Y. H. Condition monitoring techniques for electrical equipment - a literature survey. **IEEE Transactions on Power Delivery**, v. 18, n. 1, p. 4-13, 2003.

HENAO, H. *et al.* Trends in fault diagnosis for electrical machines: a review of diagnostic techniques. **IEEE Industrial Electronics Magazine**, v. 8, n. 2, p. 31-42, 2014.

HOWE, D.; HAMMOND, P. Examination of the axial flux in stator cores with particular reference to turbogenerators. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, n. 12, p. 1536, 1974.

IEEE STD 1129-1992. **IEEE Recommended practice for monitoring and instrumentation of turbine generators**, 1992.

IRHOUMAH, M. *et al.* Information fusion with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 3, p. 2642-2652, 2018.

IRHOUMAH, M. *et al.* Detection of the stator winding inter-turn faults in asynchronous and synchronous machines through the correlation between harmonics of the voltage of two magnetic flux sensors. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 55, n. 3, p. 2682-2689, 2019.

IRHOUMAH, M. *et al.* Stray flux multi-sensor for stator fault detection in synchronous machines. **Electronics**, v. 10, n. 18, p. 2313, 2021.

KEDJAR, B.; MERKHOUF, A.; AL-HADDAD, K. Large synchronous machines diagnosis based on air-gap and stray fluxes - an overview. *In: International conference on electrical machines. Anais [...]*. Gotemburgo, Suécia: IEEE, 2020.

KLIMAN, G. B. *et al.* Noninvasive detection of broken rotor bars in operating induction motors. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 3, n. 4, p. 873-879, 1988.

KUNDUR, P. **Power system stability and control**. Nova York, Estados Unidos: McGraw-Hill, 1994.

LE COAT, G. *et al.* Electromagnetic signature of induction machines. **IEEE Transactions on Energy Conversion**, v. 14, n. 3, p. 628-632, 1999.

MAZAHERI-TEHRANI, E.; FAIZ, J. Airgap and stray magnetic flux monitoring techniques for fault diagnosis of electrical machines: An overview. **IET Electric Power Applications**, v. 16, n. 3, p. 277-299, 2022.

MOBLEY, R. K. **An introduction to predictive maintenance**. Woburn, Estados Unidos: Elsevier, 2002.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 7. ed. Rio de Janeiro, Brasil: LTC, 2019.

NETI, P.; DEHKORDI, A. B.; GOLE, A. M. A new robust method to detect rotor faults in salient-pole synchronous machines using structural asymmetries. *In: IEEE Industry applications society annual meeting*. **Anais [...]**. Edmonton, Canadá: IEEE, 2008.

NETI, P.; NANDI, S. Stator interturn fault detection of synchronous machines using field current and rotor search-coil voltage signature analysis. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 45, n. 3, p. 911-920, 2009.

PUSCA, R. *et al.* Procedure for detection of stator inter-turn short circuit in AC machines measuring the external magnetic field. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1132, 2021.

RIGONI, M. *et al.* Detection and analysis of rotor faults in induction motors by the measurement of the stray magnetic flux. **Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications**, v. 11, n. 1, p. 68-80, 2012.

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

RIGONI, M. *et al.* **Sistema e método para identificar características de uma máquina elétrica**. Patente: Privilégio de Inovação; Número do registro: BR1020150114389; Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial; Depósito: 19/05/2015; Concessão: 18/08/2020.

ROMARY, R.; ROGER, D.; BRUDNY, J. F. Analytical computation of an AC machine external magnetic field. **The European Physical Journal Applied Physics**, v. 47, n. 3, p. 31102, 2009.

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

(Mestrado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2016.

SANTOS, H. F. **Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo**. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) - Florianópolis, SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 2021.

SASIC, M.; CAMPBELL, S. R.; LLOYD, B. Flux monitoring improvement. **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 17, n. 5, p. 66-69, 2011.

SEN, P. C. **Principles of electric machines and power electronics**. 3. ed. Hoboken, Estados Unidos: Wiley, 2013.

TAVNER, P. J.; HAMMOND P.; PENMAN, J. Contribution to the study of leakage fields at the ends of rotating electrical machines. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 125, n. 12, p. 1339-1349, 1978.

THAILLY, D. *et al.* Synchronous machine diagnosis using an external magnetic flux sensor. *In: International Conference on Electrical Machines*. **Anais [...]**. Chania Grécia: 2006.

THOMPSON, D. *et al.* Contribution to the study of leakage fields at the ends of rotating electrical machines. **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 126, p. 840, 1979.

THOMPSON, W. T. A review of on-line condition monitoring techniques for three - phase squirrel cage induction motors - past present and future. **IEEE SDEMPED'99**, p. 3-18, 1999.

UMANS, S. D. **Máquinas Elétricas de Fitzgerald e Kingsley**. 7. ed. Porto Alegre, Brasil: AMGH, 2014.

WU, Y. *et al.* Detection of field coil short-circuit fault in synchronous generators based on magnetic bypass shunt effect. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, p. 1-10, 2023.

ZAMUDIO-RAMIREZ, I. *et al.* Smart-sensors to estimate insulation health in induction motors via analysis of stray flux. **Energies**, v. 12, n. 9, p. 1658, 2019.

ZAMUDIO-RAMIREZ, I. *et al.* Magnetic flux analysis for the condition monitoring of electric machines: a review. **IEEE Transactions on Industrial Informatics**, v. 18, n. 5, p. 2895-2908, 2022.

ZIDAT, F. *et al.* Non invasive sensors for monitoring the efficiency of AC electrical rotating machines. **Sensors**, v. 10, n. 8, p. 7874-7895, 2010.

ZONTA, T. *et al.* Predictive maintenance in the Industry 4.0: A systematic literature review. **Computers & Industrial Engineering**, v. 150, p. 106889, 2020.