Testes em gerador síncrono de polos salientes para estudo do ponto de operação usando campo magnético externo

Alexandre Henrique Brescovitt
GRUCAD/EEL/CTC
Univ. Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
alexandrebrescovitt@gmail.com

Leandro dos Santos Coelho
DELT
Universidade Federal do Paraná
Curitiba, PR, Brasil
lscoelho2009@gmail.com

Gustavo Felipe Martin Nascimento
GRUCAD/EEL/CTC
Univ. Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
gustavo.nascimento@posgrad.ufsc.br

Luis Otavio Steffenmunsberg Grillo
GRUCAD/EEL/CTC
Univ. Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
luis.otavio.grillo@posgrad.ufsc.br

Luciano Mendes Freitas
Engenharia de Manutenção de Ativos de Sistemas (EMAS)
Engie Brasil Energia
Florianópolis, SC, Brasil
luciano.freitas@engie.com

Nelson Jhoe Batistela
GRUCAD/EEL/CTC
Univ. Federal de Santa Catarina
Florianópolis, SC, Brasil
jhoe.batistela@ufsc.br

***Abstract*— O monitoramento do campo magnético externo de geradores síncronos é uma estratégia utilizada para se extrair informação sobre a condição da máquina. Em primeiro momento, é preciso entender como o campo externo é influenciado pelo ponto de operação. Este artigo apresenta um estudo sobre a detecção do ponto de operação de um gerador síncrono de polos salientes por meio da medição do campo magnético externo realizado em uma bancada experimental com o gerador conectado à rede elétrica. Os testes foram realizados variando o ponto de operação do gerador de maneira semelhante à operação de um gerador em usina hidroelétrica, respeitando o diagrama de capabilidade. O tratamento dos dados e a metodologia dos testes realizados são apresentados em detalhes. Como resultado imediato deste artigo, obteve-se um conjunto de dados de pontos de operação, onde cada ponto de operação possui suas respectivas informações sobre o campo magnético externo do gerador. Com os dados coletados dos experimentos é possível verificar uma alta correlação de certas harmônicas do campo externo com a potência ativa e/ou com a potência reativa da máquina. Por meio do estudo do campo magnético externo de um gerador síncrono de polos salientes conectado à rede elétrica, observa-se que esta grandeza contém conjuntos de informações relevantes sobre o ponto atual de operação. Assim, o conjunto de dados do campo magnético externo pode ser utilizado para modelar o ponto de operação da máquina.**

Keywords*— *campo magnético externo; ponto de operação; sensor de indução; gerador síncrono.

I. INTRODUÇÃO

O monitoramento do campo magnético externo de geradores síncronos (GS) é uma estratégia utilizada para extração de informação sobre a saúde atual destas máquinas [1]. Entende-se que este monitoramento está no escopo de manutenções preditivas, uma vez que conhecido o estado atual da máquina e com conhecimento prévio sobre o comportamento de máquinas semelhantes, pode-se estimar o tempo até que seja necessária uma parada para manutenção ou, ainda, verificar se há alguma falta se desenvolvendo no interior da máquina. A aplicação da metodologia de monitoramento pelo campo magnético externo é facilitada por ser um método não invasivo, pela utilização de sensores localizados no exterior da carcaça da máquina, e por permitir a detecção de faltas tanto de rotor quanto de estator em seus estágios iniciais [2].

Antes de avaliar como o campo magnético externo se comporta na presença de falhas internas, é preciso entender como o ponto de operação da máquina influencia esse campo externo. Dessa maneira, é possível discriminar se uma mudança percebida no campo magnético externo advém de uma mudança no ponto de operação ou de uma falta incipiente. Conforme apresentado por [3], compreender o comportamento do campo perante alterações no ponto de operação é uma etapa fundamental para o desenvolvimento de um sistema capaz de detectar uma potencial falta em um GS, além de classifica-las.

O primeiro passo adotado para estudar o comportamento do campo magnético externo de um gerador síncrono de polos salientes (GSPS) com relação ao ponto de operação foi realizar um planejamento dos experimentos necessários para a coleta de dados. A operação do gerador de bancada deve se assemelhar à operação de um gerador instalado em usina. Portanto, os pontos de operação escolhidos foram baseados nos dados de operação em um período de tempo coletados de um gerador instalado na Usina Hidrelétrica Itá, localizada em Itá, SC, sendo estes apresentados na Fig. 1.

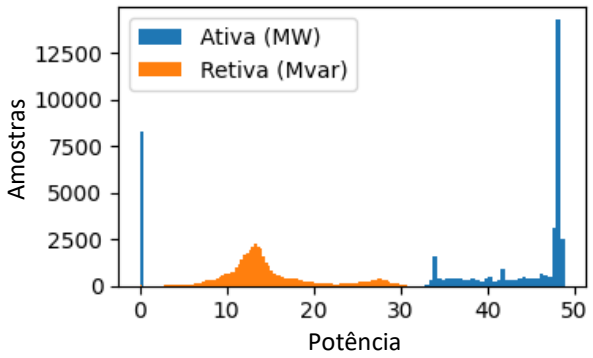


Fig. 1 - Dados de operação de um GSPS de usina hidroelétrica.

Observa-se dos histogramas da Fig. 1, que o gerador em questão operou, no período da coleta de dados, somente de maneira capacitiva e sua geração de potência ativa é, em geral, próxima do seu limite máximo. Entende-se que, com o conjunto de dados em mãos, é possível obter conclusões quanto à modelagem do campo magnético externo e encontrar relações entre as potências e as informações contidas no campo.

Este artigo tem por objetivo apresentar os experimentos realizados para construir um conjunto de dados representativo da operação de um GSPS e seu campo magnético externo nas condições de operação sadia e conectado à rede elétrica.

A seção II apresenta a descrição da bancada especial para testes em geradores e sua instrumentação. Também são descritos a metodologia utilizada para coletar os dados de operação e campo magnético externo do GSPS e o pré-processamento aplicado aos dados obtidos. A seção III apresenta a análise de correlação dos dados de ponto de operação com os dados do campo magnético externo.

II. EXPERIMENTOS E CONJUNTO DE DADOS

Esta seção descreve a bancada de testes utilizada durante os experimentos para obtenção de dados. Também são descritos a metodologia experimental aplicada e o tratamento dos dados coletados.

A. Bancada de testes e sistema de aquisição de dados

Um conjunto de experimentos foi proposto de maneira a mapear o campo magnético externo de um GSPS em três pontos distintos do exterior da máquina: 1) Campo tangencial no centro do pacote, 2) Campo tangencial no centro do pacote defasado de 90º e 3) Campo axial na região de cabeça de bobina, conforme observado na Fig. 2 e respectivamente indicados como CH1, CH2 e CH3. Na figura, a máquina é representativa, não sendo uma foto do gerador empregado.

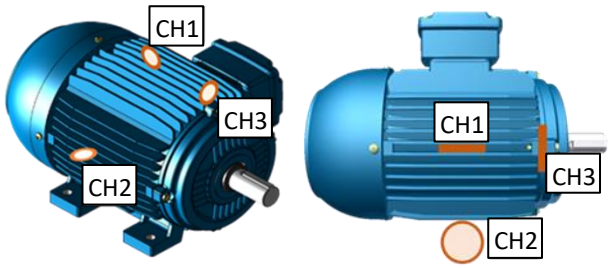


Fig. 2 – Representação do posicionamento dos sensores indutivos sobre o GSPS.

Os dados do ponto de operação da máquina foram adquiridos simultaneamente com os dados de campo para conseguir traçar um mapa com os eixos de potência ativa, potência reativa e as grandezas de interesse do campo. Vale ressaltar que, para o mapa de pontos de operação pretendido, os pontos de operação são assumidos independentes entre si, ou seja, o ponto de operação atual da máquina independe do ponto de operação anterior.

Outras grandezas entendidas como grandezas de suporte também foram adquiridas simultaneamente aos dados do campo, que apesar de não serem o foco deste trabalho, podem ser úteis para a interpretação e análise do conjunto de dados. Alguns exemplos dessas grandezas de suporte são: a corrente de campo, a corrente de armadura, a tensão terminal e a temperatura da máquina.

Com os experimentos realizados, pôde-se agrupar todos os dados obtidos em um conjunto com informação do campo para cada ponto de operação e as respectivas grandezas de suporte.

Os testes foram realizados no GSPS de oito polos, 10 kVA, 380 V, do grupo gerador especial do laboratório de máquinas elétricas da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), produzido pela empresa Equacional Elétrica e Mecânica Ltda, conforme ilustrado na Fig. 3.



Fig. 3 - Bancada de testes de geradores da UFSC.

A instrumentação associada à bancada permite adquirir os dados do ponto de operação do grupo gerador. O principal componente desta instrumentação é o sistema de monitoramento VibraOne que está conectado à bancada e realiza coleta ininterruptamente de dados enquanto a máquina estiver em operação. Este sistema realiza a aquisição e o tratamento dos dados de vibração em tempo real com o sistema SCADA (*Supervisory Control and Data Acquisition*) [4]. Conectado ao sistema VibraOne está um medidor de grandezas elétricas. As grandezas elétricas são adquiridas junto com as grandezas de vibração, formando um único conjunto de dados que pode ser acessado por meio do sistema SCADA.

De maneira a complementar a instrumentação da bancada, foi adicionado um sistema capaz de monitorar o campo magnético externo ao GSPS denominado Unidade de Medição Móvel (UMM). A Fig. 4 apresenta a UMM conectada à um computador para monitoramento e coleta de dados. Ao todo, até quatro sensores podem ser utilizados com a UMM. O sensor responsável pela aquisição do campo é de formato circular com área de seção de 7,65 cm^2 [5]. A UMM possui internamente uma placa de aquisição da *National Instruments* USB-6361 BNC. A Fig. 4 também apresenta o diagrama de conexão do sensor indutivo utilizado para medir a taxa de variação do campo magnético externo. Conectado ao sensor, existe um circuito analógico para o condicionamento do sinal elétrico referente à taxa de variação do campo. Estão incluídos um filtro de entrada, um pré-amplificador, um amplificador de ganho variável e um filtro anti-recobrimento. O sinal é convertido de analógico para digital pelo sistema USB-6366.

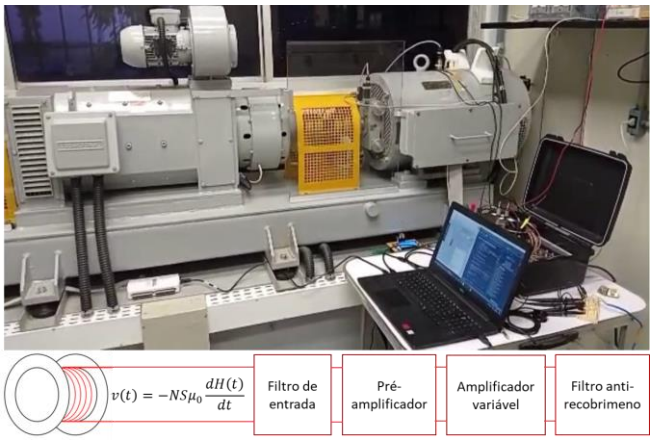


Fig. 4 - Sistema complementar de aquisição de dados UMM.

Uma limitação dos testes é que os sistemas de aquisição de dados não estão sincronizados e possuem taxas de aquisição diferentes. O sistema do VibraOne adquire os pontos de operação a uma taxa de 1 amostra a cada 10 segundos, assim como o sistema de aquisição de temperatura adquire dados de temperatura. O sistema de aquisição do campo adquire os dados do campo magnético a uma taxa de 125 000 amostras por segundo. Entretanto, os conjuntos de dados são sincronizados e adequados para a análise, formando um banco de dados único.

B. Metodologia de testes

Inicialmente, adequou-se a obtenção de valores de duas grandezas que estiveram fora do controle do operador durante os testes: 1) a tensão terminal e 2) a temperatura da máquina. Com a máquina conectada à rede elétrica, a tensão terminal do gerador segue a tensão imposta pelo barramento da rede visto que a potência do gerador utilizado neste trabalho é insignificante perante a do sistema elétrico. Na tensão terminal ocorrem ainda leves perturbações na frequência fundamental de 60 Hz da rede elétrica comercial, além das oscilações na amplitude da tensão terminal causada por adição e retirada de cargas e de mudanças em taps de transformadores de subestações de energia elétrica próximas. A temperatura do gerador influencia os valores de seus parâmetros internos e, tendo em vista que este gerador é “pequeno”, variações na temperatura ambiente tendem a provocar alteração em sua temperatura de maneira rápida. Dentre as variações dos parâmetros estão incluídas alterações nos valores das resistências dos enrolamentos de cobre do estator e do rotor, bem como mudança das propriedades magnéticas do núcleo. Dessa maneira, a janela de tempo escolhida para coleta de dados não deve ser muito longa possibilitando assim a diminuição da influência das perturbações na tensão terminal e, principalmente, mitigar os efeitos da variação de temperatura.

Antes de iniciar qualquer coleta dos dados de campo magnético e do ponto de operação, o gerador é colocado para operar em um patamar de carga com alta potência ativa e alta potência reativa para aquecer a máquina até seu ponto de regime térmico. Por experiência de testes anteriores de natureza similar, a temperatura do GSPS em regime permanente está na faixa de 38 °C a 40°C para uma temperatura ambiente média de 35 °C. Uma vez que a máquina atinja seu regime térmico, prossegue-se com a imposição dos pontos operação desejados e a coleta de dados. Conforme a temperatura aumenta, os parâmetros do GSPS e da máquina primária se modificam, sendo necessário eventuais ajustes suaves no campo do gerador (potência reativa) e campo da máquina primária (potência ativa). O controle da temperatura ambiente foi realizado com o controle do fluxo de ar na sala do grupo gerador. Ao permitir a troca de ar com o ambiente externo, a temperatura tende a diminuir, da mesma forma que interrompendo este fluxo a temperatura tende a aumentar.

Após a máquina atingir o seu equilíbrio térmico, seguiu-se o procedimento de aquisição dos dados de maneira decrescente de potência reativa. A máquina funcionou por cerca de 1 minuto em cada ponto de operação.

Tomou-se especial cuidado para abranger a maior quantidade possível de diferentes pontos de operação dentro da capacidade de geração do GSPS. Além disso, buscou-se eleger os pontos de maneira a cobrir a maior parte da curva de capabilidade do GSPS. Pontos de alta potência ativa tiveram preferência, de modo a reproduzir a operação típica de um gerador de uma usina hidrelétrica. Os pontos de operação coletados são apresentados na Fig. 5, dentro da curva de capabilidade do GSPS da bancada do grupo gerador. Os pontos azuis indicam os pontos de operação coletados experimentalmente, a curva em azul indica o limite térmico do campo do gerador, a curva em laranja indica o limite térmico da armadura do gerador, a curva em vermelho indica o limite mínimo de excitação do gerador.

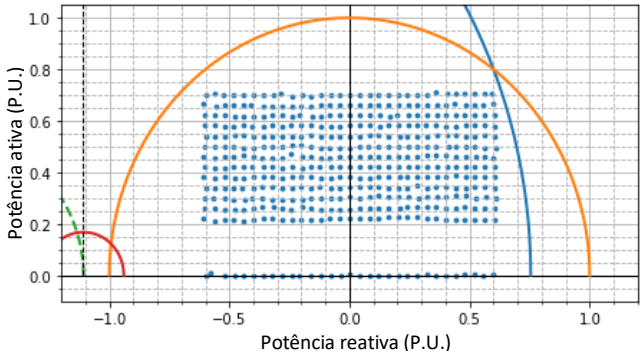


Fig. 5 - Curva de capabilidade com os pontos de operação escolhidos.

Os valores de potência ativa e reativa, junto com as demais grandezas elétricas do gerador, foram adquiridos com o VibraOne, como já mencionado. As grandezas do campo da máquina foram adquiridas com a UMM, como mencionado, e os valores de temperatura com um *dataloger* Yokogawa GP-10.

A ordem utilizada para coleta de dados segue os seguintes passos:

1. Máquina colocada para operar no ponto de operação desejado.

2. Espera-se a máquina estabilizar em um ponto de operação próximo ao desejado.

3. Corrige-se o ponto de operação com ajustes finos até atingir proximidade suficiente com o ponto de operação desejado. Adotou-se uma diferença de 50 W do ponto desejado para a potência ativa e de 50 var para a potência reativa como referência para os ajustes finos.

4. Quando a máquina estabilizar em um ponto de operação suficientemente próximo ao valor desejado, é

iniciada a aquisição dos dados de campo com a UMM por pelo menos um minuto. Aquisição de dados do ponto de operação e temperatura são ininterruptos por todo o tempo em que o GSPS está operado.

5. Deve-se observar atentamente o ponto de operação. Se necessário, aplicar ajustes finos no ponto de operação para corrigir os desvios causados pela temperatura ou reinicializar o processo de medição se houver algum degrau de tensão no barramento ao qual o GSPS está ligado.

6. Após a janela de aquisição, a máquina é posta a operar no próximo ponto de operação seguindo os mesmos procedimentos descritos nos itens de 1 a 5.

C. Tratamento de dados

Com a totalidade dos dados obtidos foi possível formar dois conjuntos de dados. Um conjunto de dados dinâmicos, ou seja, que possuem dependência do tempo, e um conjunto de dados que independe do tempo. O conjunto dependente do tempo são as formas de onda obtidas para a taxa de variação do campo magnético externo do GSPS. As informações contidas nestes dados são extraídas e adicionadas ao conjunto de dados que independe do tempo, formado pelos demais dados do ponto de operação.

Os dados obtidos do sistema de monitoramento VibraOne e do *datalogger* de temperatura precisaram ser selecionados antes de serem tratados e adicionados ao conjunto de dados independentes do tempo. Dentro deste trabalho, os pontos de operação de interesse foram obtidos através da média dos pontos obtidos após o GSPS operar de maneira estável dentro de um patamar de carregamento. Em outras palavras, pode-se pensar como uma sequência de eventos em que o GSPS é posto a operar no ponto de operação teórico desejado, em seguida a máquina naturalmente sofre uma leve alteração em seu ponto de operação e se acomoda em um ponto próximo. Uma vez que o GSPS estiver estável, calcula-se a média aritmética dos dados coletados para este ponto de operação durante a janela de aquisição.

A Fig. 6 apresenta o procedimento descrito para obtenção dos dados do ponto de operação conforme apresentado anteriormente. Os blocos em azul com borda tracejada incluem apenas os pontos onde o GSPS possui operação estável em torno de um ponto de operação. Pode-se entender esses blocos como o patamar de carregamento para um determinado ponto de operação. Os patamares de carregamento apresentados são: (7 kW; 5,2 kvar), (7 kW; 4,8 kvar), (7 kW; 4,4 kvar), (7 kW; 4 kvar), (7 kW; 3,6 kvar) e (7 kW; 3,2 kvar). O procedimento foi o mesmo para os demais pontos.

O conjunto de dados obtido são os dados do ponto de operação da máquina juntamente com os dados das grandezas auxiliares. Para este conjunto de dados, a informação do tempo não é de interesse, pois assume-se que os pontos obtidos são independentes entre si e possuem características próprias. Ou seja, a informação contida no ponto de 7 kW e 6 kvar é independente da informação do ponto 7 kW e 5,6 kvar. Assim, não é de interesse para este trabalho saber qual foi o valor gerado a cada instante de tempo, mas sim um valor médio durante a janela de aquisição de 1 minuto. Assume-se que para a máquina operando em um ponto (Q, P), sendo Q a potência reativa e P a potência ativa, dentro da curva de capabilidade, as características do campo serão constantes dentro do intervalo de aquisição se a máquina estiver estável no ponto de operação. Como se sabe que existem leves perturbações no valor das grandezas adquiridas, utiliza-se os valores médios dentro da janela de aquisição.

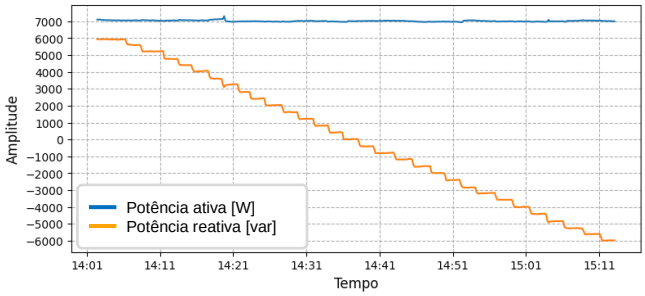


Fig. 6 - Seleção de pontos obtidos do sistema de monitoramento VibraOne.

Partindo da premissa de que o campo externo contenha informações suficientes sobre o ponto de operação do GSPS, obtém-se o espectro de frequência para cada vetor de tensão obtido dos sensores dispostos ao redor do GSPS. Com os espectros em mãos, os picos das harmônicas múltiplas da frequência fundamental mecânica do gerador (15 Hz) são obtidos. Essas amplitudes das harmônicas são adicionadas ao conjunto de dados da mesma maneira que os dados de potência, de modo que o valor de amplitude de uma determinada harmônica é o valor médio desta harmônica dentro da janela de 1 minuto de aquisição.

III. Análise do Conjunto de Dados

Com a finalidade de explorar as relações entre os dados de campo e os pontos de operação no conjunto dos dados invariantes no tempo, foi realizado um estudo de correlação. Conforme indicado em [6], pode-se selecionar bons atributos para prever uma variável através do estudo de correlação. Um grupo adequado de atributos é composto por atributos altamente correlacionados com a variável alvo, porém não correlacionados entre si. Ou seja, um atributo é útil se ele for correlacionado com a variável alvo e, caso contrário, o atributo é dito irrelevante. Neste estudo se utilizou a correlação de Pearson para avaliar a relação de linearidade entre as grandezas. Como exemplo, a Fig. 7 apresenta o comportamento das amplitudes das harmônicas 330 Hz, 1650 Hz e 2520 Hz em função das potências ativa e reativa e que possuem alta correlação com a potência ativa, e baixa correlação com a potência reativa.

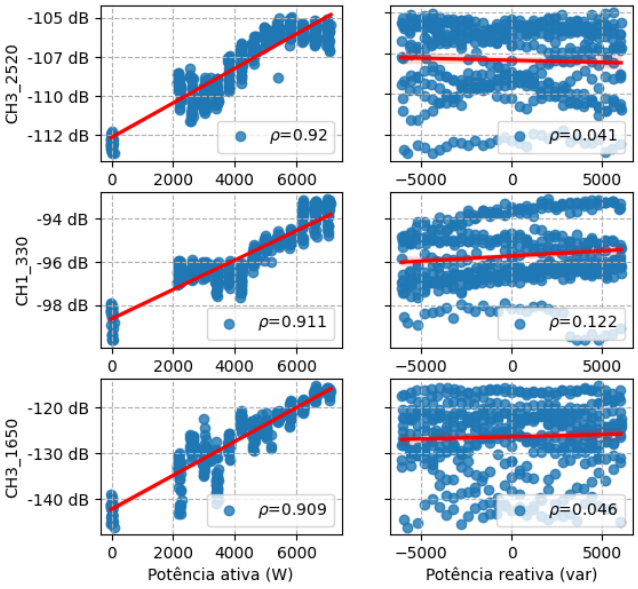


Fig. 7 - Exemplo de grandezas que apresenta alta correlação com a potência ativa.

A definição da correlação de Pearson é a covariância entre duas variáveis dividido pelo produto de seus desvios padrão [7]. Em (1) é apresentado como calcular o coeficiente de correlação ρ (ρ de Pearson), com (2) (covariância entre duas variáveis) e (3) (desvio padrão) como equações auxiliares. Nestas equações, $\rho_{x,y}$ é o coeficiente de correlação de Pearson entre as variáveis x e y. σ_x é o desvio padrão da variável x. σ_y é o desvio padrão da variável y. $\bar{x}$ é o valor médio de x e $\bar{y}$ é o valor médio de y. x_i é o iésimo elemento de x e y_i é o iésimo elemento de y. n é o número total de amostras.

$$\rho_{x,y} = \frac{cov(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (1)$$

$$cov(x,y) = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{n} \quad (2)$$

$$\sigma_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2}{n}} \quad (3)$$

A correlação de Pearson é utilizada para avaliar a relação de linearidade entre duas variáveis. O coeficiente de correlação ρ pode variar de -1, indicando uma forte correlação negativa, à 1, indicando uma forte correlação positiva. Uma correlação com valor igual a zero indica a inexistência de relação linear entre as variáveis. Os resultados obtidos com o cálculo da correlação de Pearson para o conjunto de dados independentes do tempo foram ranqueados em ordem decrescente (atributo com a maior para a menor correlação). Uma maneira simples e intuitiva de verificar a correlação é por meio do gráfico de pontos.

Voltando aos resultados da Fig. 7, ela apresenta as três grandezas da taxa de variação do campo magnético externo mais correlacionadas com a potência ativa, sendo a harmônica da frequência 2520 Hz do canal 3 (CH_32520), a harmônica da frequência 330 Hz do canal 1 (CH1_330) e a harmônica da frequência 1650 Hz do canal 3 (CH3_1650). De maneira semelhante, a Fig. 8 apresenta as três grandezas da taxa de variação do campo magnético externo mais correlacionadas com a potência reativa, sendo o valor RMS da tensão do sensor do canal 2 (CH2), valor RMS da tensão do sensor do canal 3 (CH3) e a harmônica da frequência 60 Hz do canal 3 (CH3_60). Os valores das harmônicas são apresentados em dB com referência em 1 V. Cada gráfico contém o coeficiente de correlação ρ das grandezas apresentadas e a linha vermelha em cada gráfico representa a linha da regressão linear obtida pelo método dos mínimos quadrados.

Observa-se destas figuras que as harmônicas mais correlacionadas com a potência ativa apresentam uma relação geralmente não linear em contraste com as harmônicas mais correlacionadas com a potência reativa, que são mais próximas de uma relação linear. Também se nota que o valor RMS (*Root Mean Square*) do campo contém uma forte correlação com a potência reativa, independente do canal medido. A relação entre as variáveis é visualmente linear, o que explica o coeficiente de correlação estar próximo da unidade. Também é possível observar pelos gráficos que o valor RMS para os canais 2 e 3 não apresentam relação significativa com a potência ativa.

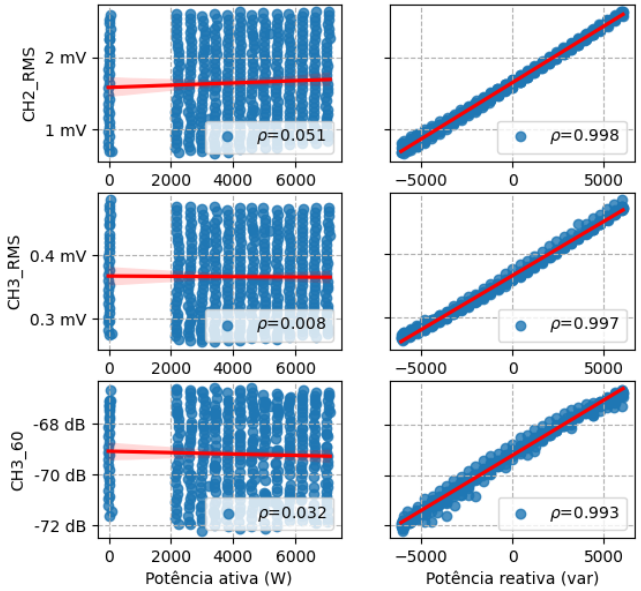


Fig. 8 - Exemplo de grandezas que apresenta alta correlação com a potência reativa.

Na Tabela 1 são apresentados os 15 atributos com o maior coeficiente de correlação ρ para cada potência. Os valores são absolutos, portanto, também estão nesta lista os módulos dos atributos que estão fortemente relacionados negativamente com as potências. Para a potência ativa, o canal 3 (sensor posicionado na cabeça de bobina) foi o posicionamento que apresentou maior correlação de modo geral. Para a potência reativa, a correlação se mostra bem distribuída entre os canais.

Tabela 1 - Ranqueamento dos 15 atributos mais correlacionados com a potência ativa e a potência reativa.

Rank	Potência ativa		Potência reativa	
	Atributo	ρ	Atributo	ρ
1	CH3_2520	0,920	CH2_RMS	0,998
2	CH1_330	0,910	CH3_RMS	0,997
3	CH3_1650	0,901	CH3_60	0,993

4	CH3_3450	0,891	CH2_60	0,992
5	CH3_1515	0,879	CH1_60	0,986
6	CH3_3735	0,875	CH1_RMS	0,980
7	CH3_2880	0,874	CH1_1155	0,978
8	CH3_1425	0,863	CH2_1125	0,971
9	CH3_1440	0,860	CH2_75	0,967
10	CH2_150	0,858	CH1_1065	0,957
11	CH2_120	0,854	CH1_15	0,957
12	CH1_375	0,848	CH3_1035	0,943
13	CH1_915	0,844	CH1_1020	0,937
14	CH3_3600	0,838	CH1_2235	0,933
15	CH3_585	0,833	CH2_1020	0,930

A Fig. 9 apresenta a matriz de correlação para as dez grandezas mais correlacionadas com a potência ativa e a Fig. 10 apresenta a matriz de correlação para as dez grandezas mais correlacionadas com a potência reativa. Das imagens é possível observar que as grandezas correlacionadas com a potência ativa apresentam correlação entre si. O mesmo fenômeno é observado para as grandezas correlacionada com a potência reativa. Em geral, as grandezas apresentadas na Fig. 9 possuem uma correlação próxima da unidade. Por conta deste comportamento das grandezas, é esperado que o conjunto de dados contenha multicolinearidade. Assim, entende-se que a informação contida nestas grandezas fortemente correlacionadas com a potência reativa tende a ser redundante. A multicolinearidade é uma condição definida como a relação de dependência entre duas variáveis independentes. Uma alta correlação entre os atributos a serem utilizados por um modelo é um indicativo da existência deste fenômeno [8].

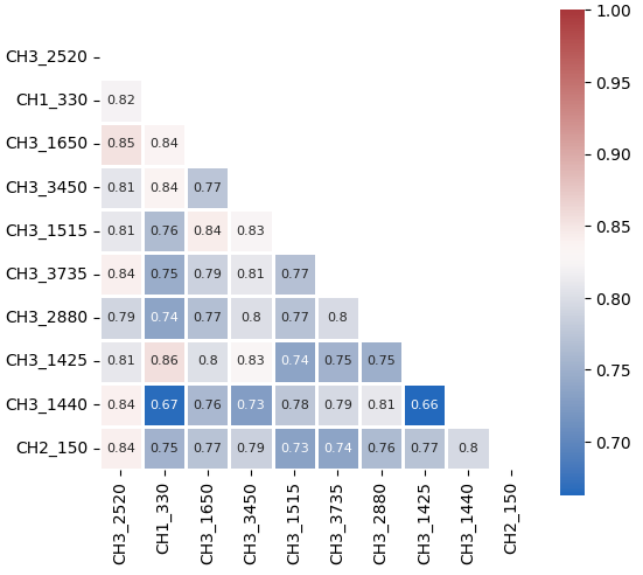


Fig. 9 – Correlação entre as grandezas mais correlacionadas com a potência ativa.

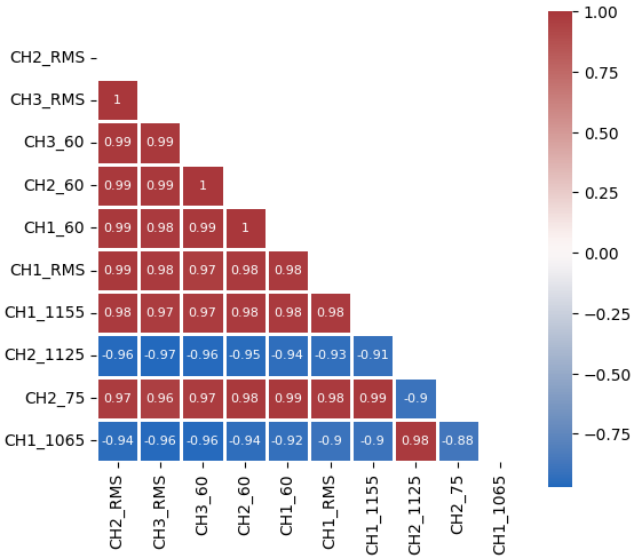


Fig. 10 - Correlação entre as grandezas mais correlacionadas com a potência reativa.

IV. Conclusão

Este trabalho apresentou um conjunto de testes realizado de maneira a reproduzir a operação de gerador de hidroelétrica em um gerador de uma bancada. Com esses testes foi possível obter um conjunto de dados que relaciona um ponto de operação com uma leitura da taxa de variação do campo magnético externo ao gerador em três pontos distintos. Da medição do campo magnético externo, foram extraídas informações sobre o conteúdo do espectro em frequência da taxa de variação do campo magnético e o valor RMS da tensão gerada nos sensores após o condicionamento do sinal.

Este artigo também apresentou uma análise da correlação dos dados obtidos experimentalmente. O foco do estudo de correlação foi a relação das grandezas obtidas da taxa de variação do campo magnético externo com o ponto de operação do gerador.

Com a análise de correlação dos dados é possível concluir que o campo magnético externo possui informação relevante sobre o ponto de operação do gerador síncrono, tanto para a potência ativa, quanto para a potência reativa. Observou-se que, em geral, os atributos mais correlacionados com a potência ativa possuem baixa relação com a potência reativa, o que as tornam boas candidatas para serem usadas em um modelo de regressão que estima somente a potência ativa. Da mesma maneira se observa que os atributos correlacionados com a potência reativam possuem alta correlação entre si e baixa correlação com a potência ativa, o que os tornam bons candidatos para um modelo de regressão que estima somente a potência reativa.

O estudo de correlação também mostrou que as grandezas que apresentam alta correlação com as potências, também apresentam alta correlação entre si, sendo o caso mais crítico para a potência reativa. Assim, entende-se que a informação contida nestes atributos fortemente correlacionadas com a potências ativa e reativa apresentam multicolinearidade e, portanto, a informação contida nestas grandezas tende a ser redundante.

Espera-se que com o conjunto de dados descrito neste artigo seja possível continuar com a exploração de outras potenciais relações entre o campo magnético externo e o ponto de operação. Uma vez que se tem verificada as relações descritas, pode-se gerar modelos para estimação do ponto de operação do gerador que tem como entrada a taxa de variação do campo magnético externo e tem como saída o ponto de operação do gerador síncrono.

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi motivado e parcialmente custeado pelos projetos regulados pela ANEEL e desenvolvidos no âmbito do Programa de P&D da ENGIE Brasil Energia, PD-00403-0048/2019 e PD-00403-0057/2023, ambos intitulados "Equipamento Não Invasivo para Detecção de Falhas em Geradores Síncronos através do Campo Magnético Externo", e com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001 e do CNPq.

REFERÊNCIAS

[1] H. Henao et al. "Trends in fault diagnosis for electrical machines: A review of diagnostic techniques", IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 8, n. 2, p. 31–42, 2014.

[2] H. F. dos Santos et al. "Non-invasive monitoring system of synchronousgenerator using external field", Journal of Microwaves, Optoelectronicsand Electromagnetic Applications, vol. 16, no. 1, 2017.

[3] H. F. dos Santos , "Detecção e avaliação de faltas em geradores síncronos por meio de históricos de harmônicos do campo magnético externo", Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, SC, 2021.

[4] AQTECH. 2023. AQTech. Disponível em: https://www.aqtech.com/hidro. Acesso em: 20 jul. 2023.

[5] G. F. Santos et al. "Estudo de Aspectos Construtivos de Sensores de Campo Magnético por Indução", 19º Simpósio Brasileiro de Micro-ondas e Optoeletrônica, 14º Congresso Brasileiro de Eletromagnetismo, Anais. p. 506-510. 2020.

[6] D. G. Pascua "Artificial intelligence tools decision support systems in condition monitoring and diagnosis". 1. ed. boca raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2015.

[7] J. Brownlee, "How to Calculate Correlation Between Variables in Python", MachineLearningMastery.com. Acesso em: 24 de fevereiro de 2024. [Online]. Disponível em: https://machinelearningmastery.com/how-to-use-correlation-to-understand-the-relationship-between-variables/

[8] J. I. Daoud, "Multicollinearity and Regression Analysis", Journal of Physics: Conference Series, vol. 949, p. 012009, dez. 2017, doi: 10.1088/1742-6596/949/1/012009.