



Estudo de um MSIP com uso de ferramentas de análise de dados

Study of an MSIP using tools for data analysis

Iago Maran Machado^{*}, Fernando José Antônio[†]

RESUMO

Motores elétricos passaram a ocupar grande espaço dentro do cenário industrial nas últimas décadas, devido a não utilizarem fontes não renováveis. Porém, ainda consomem muita energia elétrica, o que reduz sua eficiência e desperdiça recursos naturais. Tendo isso em vista, surgiram estudos acerca do Motor Síncrono de Ímã Permanente (MSIP), o qual é conhecido por possuir alto rendimento e ser um grande candidato a substituir os motores elétricos utilizados até o momento. Neste projeto buscou-se fazer um estudo acerca do MSIP usando métodos estatísticos de análise de dados. Através dos quais foi possível observar padrões comportamentais no motor, como o fato de a temperatura de refrigeração ser um fator crucial para seu funcionamento, assim como a geração de um sistema de movimento autoalimentado, com a velocidade do motor repetindo seu intervalo de valores em função do tempo. Além de tornar possível observar a grande variação de valores dos dados e de sua frequência de aparição, uma grande dificuldade são as flutuações na temperatura ambiente e a não consistência na coleta dos dados.

Palavras-chave: Motores síncronos, energia elétrica, motor elétrico, substituto.

ABSTRACT

Electric motors start to occupy a large space within the industrial scenario in recent decades, due to not using non-renewable sources and, therefore, not being harmful to the environment. However, they still consume a lot of electricity, which reduces their efficiency and wastes natural resources. With this in mind, studies have emerged on the Permanent Magnet Synchronous Motor (PMSM), which is known for having high performance and being a great candidate to replace the electric motors hitherto used. Thus, in this project, we sought to carry out a study about PMSM using statistical methods of data analysis. Through which it was possible to observe behavioral patterns in the engine, such as the fact that the cooling temperature is a crucial factor for its operation, as well as the generation of a self-powered movement system, with the engine speed repeating its range of values depending on of time. In addition to making it possible to observe the wide variation in data values and their frequency of appearance, a great difficulty are the fluctuations in ambient temperature and the lack of consistency in data collection.

Keywords: Synchronous motors, electric energy, electric motor, substitute.

1 INTRODUÇÃO

É inegável que a demanda por energia tende a crescer e juntamente com o uso dela, temos um aumento da poluição, dado que as maiores fontes de energia na atualidade fazem uso de recursos naturais, uma vez que fontes de energia renováveis não são igualmente viáveis. Sabe-se que os motores de combustão são responsáveis por cerca de 83,2% da emissão de CO na atmosfera (CETESB, 2021). Os motores elétricos têm

^{*} Engenharia Mecânica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; iagomachado@alunos.utfpr.edu.br

[†] Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil; fantonio@utfpr.edu.br



sido vistos como os principais substitutos para os motores a combustão, justamente por não fazerem uso de recursos não renováveis e por não serem tão poluentes durante o seu funcionamento. Porém, sistemas elétricos são responsáveis por cerca de 50% do consumo de energia no setor industrial brasileiro (Portal da Indústria, 2014). Sendo os motores elétricos responsáveis por cerca de 40% do consumo de energia mundial, (Revista Potencia, 2021). Desse modo, grande parte da comunidade científica e industrial tem dado como prioridade o estudo de formas alternativas de motores e sistemas otimizados, devido a esses sistemas serem mais eficientes e demandarem menos energia. A implementação de um sistema otimizado pode resultar em cerca de 30% a 60% de economia de energia dentro da indústria, sendo os motores otimizados responsáveis por cerca de 7% dessa economia (Motor Workshop, 2006; apud VENERO, s.d.).

O uso de Motores Síncronos de Ímã Permanente (MSIP) têm aumentado, devido a esses motores possuírem alto rendimento, maior densidade de potência e maior relação de torque por inércia, (JAHNS, 1996; QINGHUA, 2001). Esse motor é construído com enrolamento de estator concentrado, tendo as bobinas de uma fase colocadas em posição diametralmente opostas e ligadas em série, formando uma fase do estator. Também são utilizados ímãs na superfície rotórica com arco polar próximo de 180° elétricos.

Para a realização dos estudos do MSIP foram utilizados estudos sobre métodos estatísticos de análise de dados. O objetivo do projeto consiste no estudo de sistemas complexos, tal como temperatura, velocidade e torque de motores síncronos de ímãs permanentes. Com o intuito de investigar a existência de leis de escala, a presença de alometrias e a dinâmica temporal dos dados.

2 MÉTODOS

Para a realização do projeto utilizou-se dados coletados da plataforma Kaggle (c2020). O conjunto de dados compreende 52 conjuntos medidas coletadas de um MSIP implantado em uma bancada de teste. As medições foram coletadas na Universidade de Paderborn, na Alemanha. Para cada conjunto, o motor foi induzido através de ciclos de direção projetados à mão, obtendo uma velocidade e um torque de referência. As correntes e tensões em coordenadas d/q foram resultado de uma estratégia de controle padrão tentando seguir a velocidade e o torque de referência, que geraram as colunas de velocidade e torque do motor. Para nossas análises, separou-se os dados por sessão de medida e adicionou-se uma coluna de derivada da velocidade, que foi calculada numericamente com base no método de Euler:

$$\frac{df(t)}{dt} = \frac{f(t+\Delta t) - f(t)}{\Delta t}, \quad (1)$$

em que Δt é o intervalo de tempo entre duas medidas sucessivas. Outra ferramenta utilizada foi o método de *bootstrapping*, um método para se obter estimativas de parâmetros de interesse por meio de reamostragens do conjunto de dados original.

Ao longo deste trabalho, avaliou-se o comportamento das variáveis isoladas e também o comportamento de pares de variáveis em busca de correlações.

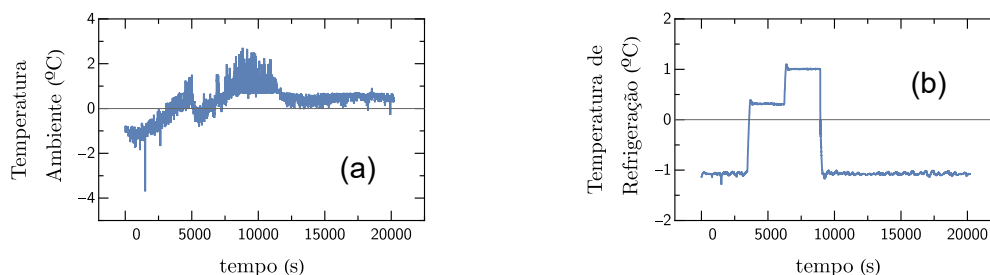
3 RESULTADOS

Na Figura 1(a) temos o gráfico da evolução da temperatura ambiente em uma das séries de medidas. Percebe-se uma flutuação média de cerca de 4°C, estabilizando em aproximadamente 0,5°C. Já na Fig. 1(b) é apresentado o gráfico de temperatura de refrigeração em função do tempo para a mesma série de medidas utilizadas para a Fig. 1(a). Pode-se observar que a temperatura de refrigeração para a sessão de medidas foi inserida na forma de platôs controlados. Entretanto, esse padrão não foi sempre o mesmo ao longo das



diferentes sessões. Quando comparada à Fig. 1a, é possível notar que com o aumento da temperatura ambiente é preciso aumentar a temperatura de refrigeração com o intuito de moderar a temperatura do motor.

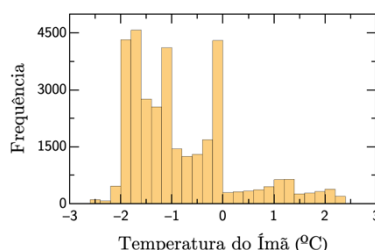
Figura 1 – Evolução temporal de (a) temperatura ambiente em °C e (b) temperatura de refrigeração em °C.



Fonte: Autoria própria (2020)

A Figura 2 apresenta um histograma da temperatura na superfície do ímã permanente (p_m), sendo demonstrado no gráfico em questão a primeira sessão dos dados. O gráfico permite identificar um aumento brusco na frequência dos dados quando atingido valores entre -2 e 0 graus Celsius, sendo possível notar que a temperatura negativa do rotor apresentou dados mais frequentes, o que já era esperado, devido ao fato de o motor ser refrigerado junto ao aumento de temperatura, ocorrendo com o intuito de manter a energia estável. Se comparado a outras variáveis, como os dados da temperatura ambiente e temperatura de refrigeração, é possível notar semelhanças no perfil dos histogramas, sendo a principal o fato de apresentarem maior frequência nas temperaturas baixas.

Figura 2 – Histograma de frequência de ocorrência de p_m para o conjunto de dados 4.

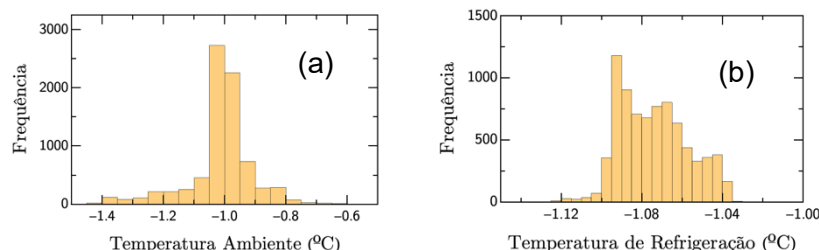


Fonte: Autoria própria (2020)

Para que houvesse um melhor entendimento acerca dos dados apresentados, foram feitos histogramas iguais ao da Fig. 2 para cada dado, fazendo várias seções de testes para analisar diferentes momentos e ver a forma como os dados se comportavam. Ficou evidente que houve grande variação de frequência, não só em relação ao dado como também ao tempo, sendo possível notar grande variação não só nos valores máximos de cada sessão, mas também nos mínimos, além de que os dados de p_m , tomando como exemplo a Fig. 2, variaram de forma significativa ao longo das baterias de teste.

De forma geral, foi possível notar que os dados se comportaram de forma muito semelhante dentro das baterias de testes (sem log, log y , log xy e log x), também observou-se que os dados de tensão u_d e u_q , velocidade do motor, torque e correntes i_d e i_q apresentaram as sessões com menor variação a partir da sessão 31, além de que todas as sessões apresentadas a partir dessa mesma citada foram muito semelhantes, sendo raras as vezes em que alguma apresentou maior variação ou mostrou-se diferente das demais. Quando comparados, os testes de temperatura ambiente e de refrigeração, demonstraram que foram poucas as sessões que possuíram baixa variação para ambos, sendo apenas as sessões 4, 11 e 38, como pode ser visto na Fig. 3.

Figura 3 – Histograma dos dados de temperatura (a) ambiente e (b) de refrigeração. Ambos são dados em °C e avaliados para o conjunto de dados 11.

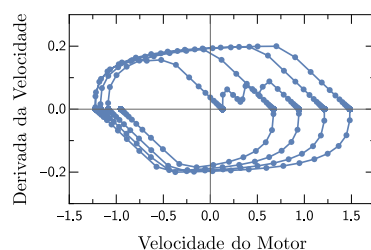


Fonte: Autoria própria (2021)

Pode-se observar que conforme a temperatura ambiente aumentou, a temperatura de refrigeração tendeu a diminuir, como pode ser observado no intervalo de $-1,1$ a $-1,0$, sendo que nessa região há o início do aumento da temperatura ambiente e o início da redução da temperatura de refrigeração. Além disso, observa-se que ambas ocorreram em torno de um intervalo muito próximo, sendo, respectivamente, o intervalo de $-1,4$ a $-0,6$ e $-1,13$ a $-1,07$, com os picos de máxima temperatura em $-1,09$ e $-1,00$.

O segundo passo consistiu em procurar relação entre as variáveis disponibilizadas nos dados. Na Fig. 4 tem-se um gráfico relacionando as variáveis ‘derivada da velocidade’ e ‘velocidade do motor’ para uma das séries de medidas. Nesse gráfico, é possível notar que há um padrão de simetria: o gráfico mantém-se limitado ao intervalo de $-0,2$ a $0,2$ no eixo da derivada da velocidade e de $-1,5$ a $1,5$ no eixo da velocidade do motor.

Figura 4 – Gráfico de derivada da velocidade em função da velocidade do motor para a série de dados 6.

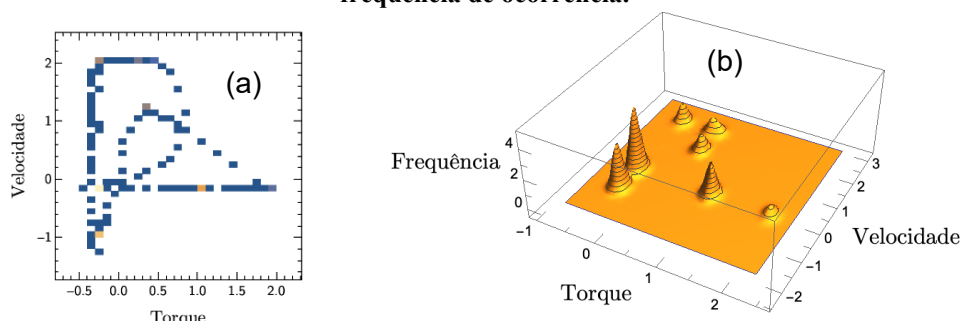


Fonte: Autoria própria (2020)

Um padrão similar foi observado em todas as séries de medidas analisadas quando comparamos as mesmas variáveis. Dessa forma, é possível prever que o sistema tem um movimento autoalimentado à medida que o tempo passa. Em particular, que a variação da velocidade está conectada à própria velocidade. Por esse método de análise, torna-se mais fácil definir quais são as melhores variáveis para o estudo, sendo, portanto, as variáveis com mais correlações. Os pares de variáveis ‘Torque’ e ‘Corrente i_d ’ e ‘Temperatura do Dente do Estator’ e ‘Temperatura do Enrolamento do Estator’ mostraram-se as melhores opções, pois apresentaram correlação linear em todas as seções. Já o par ‘Temperatura Ambiente’ e ‘Velocidade do Motor’ foi o pior dentre os dados.

A seguir, buscou-se uma relação entre a velocidade do motor e o torque, como pode ser visto na Fig. 5, a qual apresenta gráficos de velocidade do motor em função do torque para a sessão de medidas 6. É possível notar que as regiões com cores mais amareladas (Fig. 5a) e com maiores relevos (Fig. 5b) representam a maior presença de valores similares de velocidade em função do torque, ao passo que as regiões de maior incidência são azuladas (Fig. 5a) e sem relevos (Fig. 5b). Analisando esses gráficos é possível obter o padrão de velocidade que o motor vai seguir à medida que o tempo aumentar junto aos valores de torque.

Figura 5 – Análise da relação entre torque e velocidade para o conjunto de dados 6. (a) Histograma de densidade. (b) Histograma de densidade suavizado, evidenciando as regiões com picos, que têm a maior frequência de ocorrência.

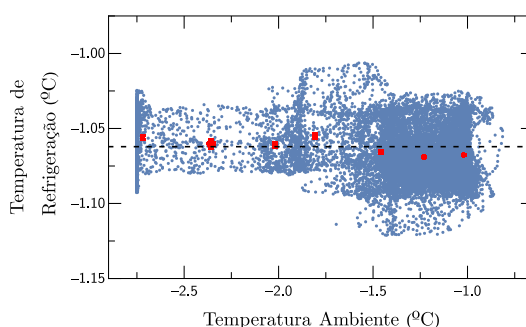


Fonte: Autoria própria (2020)

Para facilitar a análise, foram isoladas as variáveis que mais possuíam correlações lineares por meio de relações de alometrias. Os pares de variáveis ‘Temperatura Ambiente e Voltagem u_d ’, ‘Temperatura Ambiente e Voltagem u_q ’, ‘Temperatura Ambiente e Velocidade do Motor’, ‘Temperatura Ambiente e Temperatura do Stator Yoke’, ‘Voltagem u_d e Voltagem u_q ’ e ‘Torque e Corrente i_d ’ foram os conjuntos de dados com menos sessões correlacionadas. Já os pares de variáveis ‘Voltagem u_q e Velocidade do Motor’, ‘Torque e Corrente i_q ’, ‘Temperatura do Stator Yoke e Temperatura do Dente do Estator’, ‘Temperatura do Stator Yoke e Temperatura do Enrolamento do Estator’ e ‘Temperatura do Dente do Estator e Temperatura do Enrolamento do Estator’ foram os que possuíam mais sessões correlacionadas. Por fim, analisou-se as variáveis correlacionadas, observando que essas se manifestaram no formato de retas no gráfico, como demonstrado na Fig. 6.

Percebe-se da Fig. 6 que as variáveis temperatura de refrigeração e temperatura ambiente seguem uma lei de isometria decrescente. Para análise dos dados, separou-se o eixo x em janelas equidistantes. Sendo que os pontos vermelhos são as médias dentro de cada janela, os quais já contém barras de erro calculadas por meio do método de *bootstrapping*. Um ajuste aos pontos vermelhos da Fig. 6, em particular, mostrou uma reta de inclinação $-1,07511$ (intervalo de confiança de 95% dado por $(-1,0931, -1,05712)$ e $R^2 = 0,6493$). Dessa forma, percebe uma tendência decrescente entre as variáveis. Ou seja, à medida que a temperatura ambiente diminui, precisa-se de menos refrigeração no motor.

Figura 6 – ‘Temperatura Ambiente’ em função da ‘Temperatura de Refrigeração’. Os pontos vermelhos foram obtidos considerando-se médias dentro de janelas verticais equidistantes, e as barras de erro foram calculadas por *bootstrapping*. O ajuste linear tem inclinação $-1,07511$.



Fonte: Autoria própria (2021)



4 CONCLUSÃO

Foi notável a presença de padrões de valores e comportamentos, como o fato de tanto a temperatura de refrigeração quanto a da superfície do ímã terem aumentado assim que o motor foi ligado. Isso evidenciou que o motor gera aumento de temperatura, tornando a temperatura de refrigeração um componente essencial para o modelo estudado. Além disso, observou-se que o motor possui um sistema de movimento autoalimentado, ou seja, a velocidade do motor tende a repetir seu intervalo de valores em função do tempo, sendo que a variação de velocidade do motor está conectada à própria velocidade. Além disso, foi observada grande variação tanto no valor dos dados quanto na frequência em que apareceram. Isso provavelmente se deve ao fato de flutuações na temperatura ambiente e a não consistência na coleta de dados. Já em relação às variáveis isoladas, houve grande inconstância tanto na frequência em que os valores apareceram quanto nos intervalos. Por fim, determinou-se que os pares de variáveis ‘Torque’ e ‘Corrente i_d ’ e ‘Temperatura do Dente do Estator’ e ‘Temperatura do Enrolamento do Estator’ apresentaram a de correlação linear mais intensa, sendo que o par ‘Temperatura Ambiente’ e ‘Velocidade do Motor’ foi o pior dentre os dados.

REFERÊNCIAS

CETESB (São Paulo). Geradores. São Paulo, 2021. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br>>. Acesso em: 15 out. 2021.

JAHNS, T. M.; SOONG, W. L. **Pulsating torque minimization techniques for permanent magnet AC motor drives – a review**. IEEE Transactions on Industrial Electronics, v. 43, Issue 2, Apr 1996, p. 321 – 330.

KAGGLE INC. Kaggle, c2020. **Competições de data science públicas**. Disponível em: <<https://www.kaggle.com/>>. Acesso em: 23 ago. 2020.

PORTAL DA INDÚSTRIA. Agência de notícias da indústria, 2014. **Campanha da confederação nacional da indústria estimula uso eficiente da energia**. Disponível em: <<https://noticias.portaldaindustria.com.br/noticias/sustentabilidade/campanha-da-confederacao-nacional-da-industria-estimula-uso-eficiente-da-energia/>>. Acesso em: 15 ago. 2021.

QINGHUA, L.; JABBAR, M. A.; KHAMBADKONE, A. M. **Design optimization of interior permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation**. Proceedings Power Electronics and Drive Systems 2001, 2001 4th IEEE International Conference, v. 2, 22-25 Oct. 2001, p. 475 – 478.

REVISTA POTENCIA. Portal potencia, 2021. **Motores elétricos trifásicos WEG: eficiência e confiabilidade**. Disponível em: <<https://revistapotencia.com.br/portal-potencia/energia/motores-eletricos-trifasicos-weg-eficiencia-e-confiabilidade/>>. Acesso em: 15 out. 2021.

VENERO, Dany D. M. **Oportunidades de eficiência energética na indústria**. s.d. Disponível em: <<https://www.leonardo-energy.org.br/wp-content/uploads/2018/02/Doc-101-ga-ge-me-Webinar-Oportunidades-de-EE-na-Industria.pdf>>. Acesso em: 15 out. 2021.