



# Estudo sobre o dimensionamento de máquinas YASA

**Palavras-Chave:** Máquinas elétricas, Máquinas de fluxo axial, YASA

**Autores(as):**

**Mateus Capoccia Ferreira dos Santos, FEEC – UNICAMP**

**Prof. Dr. Mateus Giesbrecht, FEEC - UNICAMP**

---

## INTRODUÇÃO:

O cenário atual de descarbonização das fontes de energia nos leva à busca por diversificar e propor novos modelos de uso dessa energia. É sabido que o cenário de eletrificação está sendo planejado e gradualmente adotado ao redor do mundo, e o setor de transportes não ficará de fora dessa eletrificação. No entanto, tão importante quanto a fonte de energia é o modo como ela é utilizada. Os carros elétricos possuem um trem de força muito interessante e novos modelos de máquinas elétricas para tração veicular estão sendo propostos para esse fim.

Com base na demanda atual e futura de tração, a máquina elétrica síncrona de ímãs permanentes e de fluxo axial passa a se tornar uma opção interessante como propulsor desses carros, devido à sua alta densidade de torque e potência [5]. Especificamente, a versão YASA dessa máquina é a proposta a ser desenvolvida neste estudo.

Para o dimensionamento dessa nova máquina, foram consideradas as características de desempenho da máquina BG95X80, que é uma máquina síncrona de ímãs permanentes e fluxo radial. Tal máquina mencionada é utilizada para tração de um veículo elétrico produzido por uma equipe de atividade extracurricular da Unicamp.

## METODOLOGIA:

Foram propostas duas formas de dimensionamento da máquina, para se chegar a esses modelos foram criadas 3 etapas que podem ser destacadas como

- Análise e estudo da máquina axial
- Elaboração do algoritmo para cálculo eletromagnético analítico
- Dimensionamento analítico

### **Análise e estudo da máquina axial**

Para os estudos da máquina axial, foram feitas consultas no livro [1] que possibilitou o aprendizado de algumas características da máquina axial. Consultas adicionais foram feitas a [2-3] de forma a entender melhor o conceito e o dimensionamento analítico dessa máquina. A máquina estudada pode ser vista de forma superficial na figura 1 a seguir.



Figura 1: YASA em perspectiva

## Elaboração do algoritmo para cálculo eletromagnético analítico

A referência [1] foi utilizada para começar a análise do projeto da máquina, mais especificamente o capítulo 2 que dava uma boa base de quais dimensões eram necessárias para o início do projeto, esses parâmetros eram os diâmetros, torque e fluxos magnéticos. É importante ressaltar que as características geométricas desse modelo são muito diferentes das máquinas radiais, entretanto vários paralelos podem ser traçados entre os dois tipos e até mesmo as equações seguem um padrão bem parecido. Assim foi utilizado [6], que apesar de focar no projeto de máquina radial, possuía boas estimativas de dimensionamento que poderiam ser usadas nesse projeto.

### Dimensionamento analítico

Para começar o dimensionamento do motor, foram usados como base os valores nominais de torque, potência e corrente do BG95X80, apresentados na tabela 1.

Tabela 1: valores nominais do motor BG95X80

Potência nominal (W)	Torque (Nm)	Corrente de armadura (A)
1044	2,61	24,6

O principal objetivo era a de conseguir os pesos dos materiais utilizados na construção da máquina, pois a proposta aqui é a de chegar em um equipamento que contém as mesmas características de desempenho nominal que o motor BLDC radial utilizado como referência.

O subcapítulo 2.8 de [1] entrega uma boa base de como se pode modelar o equipamento, entretanto vários caminhos poderiam ser seguidos para se chegar no objetivo final. O primeiro proposto foi através das geometrias, cálculos das resistências e indutâncias. Mas ao procurar mais referências de dimensionamento, uma nova proposta foi feita e seria a do projeto eletromagnético vista em [2].

As novas variáveis de entrada são potência, torque e corrente nominal, para essa análise foram adotadas algumas simplificações.

Primeiramente precisamos de um valor inicial do diâmetro da máquina, e esta foi a principal maneira de verificar se as equações e os valores faziam sentido. Foi criado no *matlab* um modelo da máquina para facilitar as contas, e este programa retorna um novo valor de diâmetro externo ( $D_0$ ) conforme os dados de geometria são alterados como entreferro, número de voltas no dente do estator, número de polos etc. Se o número estimado inicialmente fizesse sentido, seria retornado um valor de  $D_0$  parecido com o escolhido inicialmente.

Já o fluxo magnético no entreferro foi definido como sendo o mesmo do circuito magnético inteiro, não foram consideradas neste primeiro momento a dispersão de fluxo magnético. Assim ficaria mais fácil calcular as densidades de fluxo magnético em cada área do circuito.

As áreas das seções transversais das diferentes regiões do motor também foram simplificadas, foram considerados trapézios com dimensões bem definidas para facilitar os cálculos das densidades de fluxo em um primeiro momento.

O importante era manter os valores de torque e potência constantes mesmo que as dimensões da máquina final não fossem condizentes com o esperado, entretanto o ajuste dos parâmetros foi feito manualmente de maneira a tentar reduzir os custos, pois os o preço dos materiais está atrelado ao peso, então a tarefa era diminuir a massa dos componentes.

Para a ajuda do dimensionamento e para uma maior clareza, a imagem abaixo retirada de [2] indica os parâmetros principais.

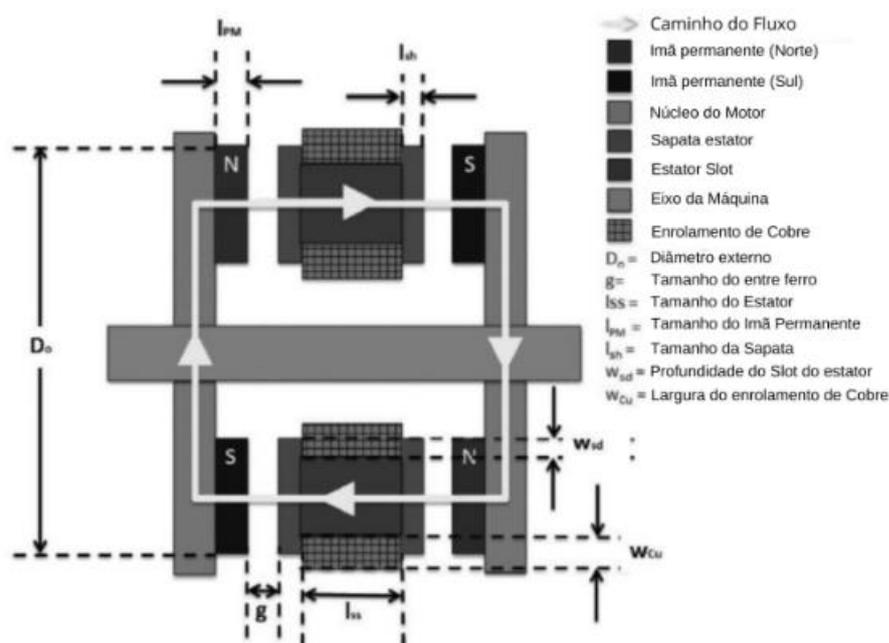


Figura 2: Modelo de uma máquina YASA e seus parâmetros geométricos. Adaptada de [2]

## RESULTADOS E DISCUSSÃO:

A partir das equações propostas pelas referências, foi realizado assim um pequeno programa no *matlab* que executava as equações e retornava os parâmetros do rotor e do estator.

Assim como comentado, a referência era sempre D0, o resultado do diâmetro externo deveria ser pelo menos próximo da estimativa inicial. Para ajustar os cálculos, eram feitas diversas tentativas de estimativas iniciais, desde alteração no valor do entreferro até a mudança do número de polos.

Realizado um dimensionamento inicial mais as alterações para que D0 se aproximasse do valor estimado inicialmente, sempre mantendo as condições iniciais de torque, potência e corrente nominais, chegou-se às dimensões e massas indicadas na tabela 2.

*Tabela 2: medidas retornadas do script proposto*

Propriedade	Valor
Comprimento do ímã permanente	0,0141 m
Comprimento da sapata polar	0,095 m
Comprimento do núcleo do estator	0,0523 m
Massa de cobre	0,63 kg
Diâmetro externo	0,2163 m
Diâmetro interno	0,168 m
Comprimento do rotor	0,0107 m
Massa dos ímãs permanentes	1,26 kg
Massa do núcleo do rotor	1,733 kg
Entreferro	0,005 m

Com base nos resultados, obtemos um valor de peso aproximado de 3,623 kg para a máquina axial, enquanto a BG95X80 tem uma massa de cerca de 5,1 kg. Além disso, a primeira possui um diâmetro externo de aproximadamente 0,2163m, comparado aos cerca de 0,098m da BLDC de fluxo radial.

Esses resultados são intrigantes, pois dimensionaram uma máquina mais leve em relação à outra. No entanto, conforme esperado, o diâmetro externo da máquina axial é significativamente maior do que o diâmetro externo da radial. Isso estava previsto no projeto, uma vez que máquinas axiais tendem a ter um diâmetro externo maior do que suas contrapartes radiais.

Para a aplicação direta na roda, a máquina axial se mostra superior ao motor radial, como podemos observar na comparação, apresentando menor peso e fornecendo os mesmos valores nominais de potência e torque que o motor radial. O fato de possuir um diâmetro externo maior que a BLDC não representa um obstáculo significativo numa primeira perspectiva, pois os

motores nas rodas teriam uma certa margem em relação ao tamanho. Ou seja, inserir nas rodas não seria problemático, uma vez que as dimensões das caixas dos pneus são maiores do que o diâmetro desses motores axiais.

## CONCLUSÕES

A máquina axial YASA demonstra um grande potencial para ser aplicada como tração veicular devido a várias razões. Primeiramente, ela possui um baixo peso, o que contribui para reduzir a massa total do veículo, resultando em melhor eficiência energética e desempenho.

Além disso, a máquina apresenta um valor de eficiência maior em comparação com suas contrapartes, o que significa que converte uma maior quantidade de energia elétrica em energia mecânica, resultando em um aproveitamento mais eficiente da energia armazenada na bateria.

No entanto, o maior benefício é seu formato compacto. Essa característica permite que ela seja integrada diretamente às rodas do veículo, eliminando a necessidade de um sistema de transmissão complexo e pesado. Atualmente, o sistema de transmissão é uma das principais fontes de perda de energia em um carro padrão a combustão. Ao remover essa fonte de perda, o conjunto ajuda a aumentar a eficiência geral do veículo elétrico.

As dimensões da máquina axial encontrada nesse projeto específico demonstram seu grande potencial como substituta dos motores radiais, especialmente em aplicações de tração veicular. A capacidade de integração direta às rodas e o formato compacto tornam a máquina axial YASA uma escolha promissora para impulsionar a próxima geração de veículos elétricos.

Os resultados apresentados neste estudo dizem respeito exclusivamente ao dimensionamento eletromagnético. Para confirmar as massas finais, será necessário conduzir estudos térmicos, cálculos de ventilação e análises mecânicas estruturais. No entanto, essas etapas estão além do escopo desta iniciação científica e podem ser aprofundadas em futuros trabalhos de pesquisa.

## BIBLIOGRAFIA

- [1] GIERAS, Jacek F.; WANG, Rong-Jie; KAMPER, Maarten J. Axial flux permanent magnet brushless machines. Springer Science & Business Media, 2008.
- [2] S. T. Vun and M. D. McCulloch, "Optimal Design Method for Large-Scale YASA Machines," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 30, no. 3, pp. 900-907, Sept. 2015, doi: 10.1109/TEC.2015.2397342.
- [3] A. Allca-Pekarovic, P. J. Kollmeyer, A. Forsyth and A. Emadi, "Experimental Characterization and Modeling of a YASA P400 Axial Flux PM Traction Machine for Electric Vehicles," *2022 IEEE Transportation Electrification Conference & Expo (ITEC)*, Anaheim, CA, USA, 2022, pp. 433-438, doi: 10.1109/ITEC53557.2022.9813938.
- [4] L. Xu, Y. Xu, J. Xu, B. Wang and F. Xin, "Optimal design and electromagnetic analysis of yokeless and segmented armature machine based on finite-element method and genetic algorithm," *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo, Asia-Pacific (ITEC Asia-Pacific)*, Harbin, China, 2017, pp. 1-6, doi: 10.1109/ITEC-AP.2017.8080983.
- [5] R. Huang, Z. Song, H. Zhao and C. Liu, "Overview of Axial-Flux Machines and Modeling Methods," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*.
- [6] Pyrhönen, J., Jokinen, T., & Hrabovcová, V. (2014). *Design of Rotating Electrical Machines*. John Wiley & Sons.