

# OTIMIZAÇÃO DO TORQUE ELETROMAGNÉTICO DE UMA SM-PMSM COM BASE NA OTIMIZAÇÃO TOPOLÓGICA

Luiz Henrique Reis de Jesus

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Universidade Federal de Goiás  
Goiânia, Goiás, Brasil  
luizhenriqueengineer@gmail.com

Celio Corrêa Lemes Filho

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Universidade Federal de Goiás  
Goiânia, Goiás, Brasil  
eng.celiofilho@gmail.com

Allan Gregori de Castro

Escola de Engenharia de São Carlos – Dep. Eng. Elétrica  
Universidade de São Paulo  
São Carlos, São Paulo, Brasil  
allagregori@gmail.com

Leonardo da Cunha Brito

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Universidade Federal de Goiás  
Goiânia, Goiás, Brasil  
brito.lc@gmail.com

Geyverson Teixeira de Paula

Escola de Engenharia Elétrica, Mecânica e de Computação  
Universidade Federal de Goiás  
Goiânia, Goiás, Brasil  
geyverson@gmail.com

**Resumo**— Este artigo propõe um método de otimização topológica para o projeto ótimo de uma máquina síncrona com ímãs permanentes na superfície do rotor (SM-PMSM). Para tanto foi desenvolvido um algoritmo, que, associando o método dos Tensores (Back-EMF MST) à métodos de otimização evolucionária (Algoritmo Genético Compacto e Estratégias de Evolução), permitiu ao processo de otimização um número menor de avaliações, haja visto a grande dimensão de análises de elementos finitos de uma SM-PMSM. Para determinar os parâmetros de otimização, foram consideradas os efeitos de saturação e as densidades de fluxo magnético no entreferro quando submetido a carga nominal. Verificou-se que o método proposto proporciona ao projeto da SM-PMSM uma redução na ondulação do torque eletromagnético em torno de 37% bem como uma redução no volume estrutural de 38,23%. Além disso, a saturação presente na força contra eletromotriz (Back-EMF) é reduzida, tendo o comportamento em carga similar ao comportamento à vazio.

**Palavras-chave**— Algoritmo Genético Compacto, Estratégias de Evolução, Método dos Tensores, Otimização Topológica, Máquina Síncrona com Ímãs Permanentes na Superfície do Rotor.

## I. INTRODUÇÃO

O processo de otimização das máquinas síncronas de ímãs permanentes (PMSM) é um tema abordado em diversos artigos e pesquisas no mundo [1]-[5]. A otimização do torque eletromagnético por sua vez é um dos principais objetivos dentre os processos de otimização das PMSMs. Outro objetivo, também aplicado, se faz por meio da otimização da força

contra eletromotriz (Back-EMF). No entanto, a dificuldade em se obter os parâmetros que a compõe, dificultam a sua implementação. Normalmente, o processo de otimização das PMSMs tem, independente do objetivo escolhido, como fatores determinantes e restritivos o custo de produção, o esforço computacional empregado ao processo, a eficácia e precisão de seus resultados, entre outros. Vale ressaltar que esses fatores valem para qualquer topologia de PMSM empregada, tendo seus valores mais restritivos ou mais flexíveis dependendo da aplicação atendida.

Dentre as abordagens de otimização de projeto de máquinas elétricas, a otimização do dimensionamento e do formato da estrutura vem sendo amplamente aplicada em diversos estudos. Na última década a otimização topológica apresentou um grande impacto no processo de otimização das máquinas de ímãs permanentes, baseando-se em métodos como definição de níveis [6], rede gaussiana normalizada (NGnet) [7], método ON/OFF [8], método bubble [9], [10], entre outros, tornando-se uma metodologia de otimização promissora para contornar os problemas supracitados.

Com o objetivo de contribuir com este tema, este artigo propõe a otimização topológica de uma máquina síncrona de ímãs permanentes na superfície do rotor (SM-PMSM) [11], em que o objetivo do processo de otimização é a redução das ondulações presentes no torque eletromagnético. Foram consideradas e comparadas como metodologias de otimização, o método algoritmo genético compacto (CGA) [12] e o método estratégias de evolução (ES) [13]-[16], associado ao método de avaliação da máquina, método dos tensores (Back-EMF MST)

[17], [18]. É importante ressaltar que apesar do método Back-EMF MST ter como intuito a obtenção e avaliação da Back-EMF, sua aplicação demonstra a grande importância na composição do torque eletromagnético e sua respectiva forma de onda, sendo possível avaliar o impacto da saturação e da variação dos parâmetros dimensionais da máquina na saturação eletromagnética, tornando o processo de otimização mais assertivo e rápido.

Este artigo está organizado da seguinte forma: Seção 2 apresenta uma descrição do problema. A seção 3 descreve a metodologia proposta para avaliar e então otimizar o problema. A seção 4 apresenta as metodologias de otimização e como serão implementadas ao processo. Os resultados e suas discussões são apresentados na seção 5 e, por fim, as conclusões são apresentadas na seção 6.

## II. DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

É essencial obter uma solução ótima para o projeto de uma máquina síncrona com ímãs permanentes na superfície do rotor (SM-PMSM), em que a ondulação do torque eletromagnético seja reduzida significativamente e apresente uma redução no custo de produção da máquina. Além disso, o tempo de processamento de otimização de cada solução (esforço computacional) para a SM-PMSM deve ser observado para a redução de custos nas etapas de projeto e prototipagem da máquina. Dessa forma, para atender o quesito de redução de esforço computacional, o primeiro passo é a análise da simetria da geometria da PMSM sob investigação para que, posteriormente, possa-se focar apenas na redução do esforço computacional demandado por cada método de otimização. Sendo assim, no presente artigo, em que uma PMSM de 4 polos é analisada e otimizada, apenas  $\frac{1}{4}$  da seção transversal é simulada com o método dos elementos finitos, proporcionando, portanto, uma redução considerável do número de elementos de malha (elementos finitos) e acelerando o processo de simulação pelo método dos elementos finitos. A Fig. 1 ilustra  $\frac{1}{4}$  da seção transversal da máquina, enfatizando a topologia adotada no rotor, a distribuição das bobinas, os parâmetros os quais serão otimizados e a disposição da sequência dos destes da SM-PMSM para a otimização a 2 dentes, explicadas na seção seguinte.

Na TABELA I são apresentadas as características dimensionais do estator e do rotor da SM-PMSM. Vale ressaltar que a escolha pelo modelo de ímãs na superfície (SM-PMSM) se fez principalmente por possibilitar a geração de parcelas relevantes de torque de borda, presente nas ondulações

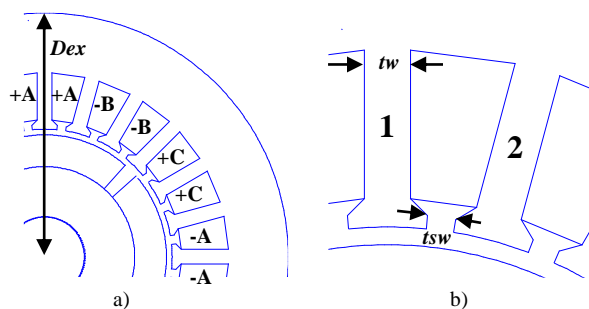


Fig. 1. SM-PMSM Inicial. a) Seção Transversal; b) Formato Do Dente.

do torque eletromagnético.

TABELA I. CARACTERÍSTICAS E DIMENSÕES DA SM-PMSM.

Parâmetro	Dimensão
Número de Ranhuras	24
Diâmetro Externo do Estator (Dex)	116,6mm
Diâmetro Interno do Estator	61mm
Espessura da Carcaça do Estator	14,35mm
Largura do Dente (tw)	3,52mm
Abertura de Ranhura (tsw)	2,15mm
Espessura da Ponta da Sapata do Dente	1mm
Diâmetro dos Condutores Utilizados	21 AWG
Número de Polos	4
Entreferro	1,35mm
Diâmetro Externo do Rotor	58,3mm
Diâmetro do Eixo	19mm
Espessura do Ímã	7,6mm
Ímã	Ferrite
Ângulo do Arco do Ímã	82,5°

## III. METODOLOGIA PROPOSTA

A otimização topológica aplicada neste artigo é proposta por meio da discretização das variáveis de otimização estrutural, a qual avalia a importância de cada bit com relação ao objetivo do processo de otimização para se obter o projeto ótimo da SM-PMSM. Os bits influentes ao objetivo proposto são mantidos na estrutura, caracterizado pelo material do estator, e os bits que não influenciam no objetivo proposto são removidos, substituindo o material do estator pelo ar. Por fim, o algoritmo de otimização atua sobre a estrutura discretizada para então obter o projeto otimizado.

### A. Processo de Otimização

Conforme proposto por [19], baseado nos parâmetros da SM-PMSM aqui analisada, o processo de otimização considerou a otimização de apenas 2 dentes almejando uma redução no tempo de otimização e no esforço computacional, visto que, para as características e dimensões da máquina sob investigação, apresentadas na TABELA I, e conforme evidenciado em [11], [19], a otimização de 2 dentes e a replicação deles para os outros dentes do estator da máquina garantem convergência e proporciona um processo de otimização mais rápido.

A estratégia utilizada neste trabalho para a otimização dos parâmetros variáveis da SM-PMSM foi:

- Discretização variável: discretização do contorno da estrutura do dente com dimensão variável para os bits de ambas as extremidades (lado direito e lado esquerdo).

A discretização do contorno da estrutura mencionada na discretização variável, refere-se à dimensão dos bits contida entre os limites inferiores e superiores das variáveis de

otimização da SM-PMSM (largura do dente ( $tw$ ) e abertura de ranhura ( $tsw$ )). A Fig. 2 ilustra a discretização aqui analisada.

Além dos parâmetros de otimização do dente, o diâmetro externo do estator ( $Dex$ ) também foi incluído como parâmetro de otimização, visando uma redução no volume da SM-PMSM e conseqüentemente uma redução no custo de produção. A TABELA II apresenta os limites das variáveis de otimização do projeto. Cabe ressaltar que os valores dos limites dos parâmetros largura do dente ( $tw$ ) e abertura de ranhura ( $tsw$ ) são compatíveis o suficiente para que o estator possa ser bobinado sem que os fios do enrolamento original necessitem substituição por fios mais finos ou mais espessos, não comprometendo, portanto, as características de resistência por fase; e os limites para o parâmetro diâmetro externo do estator ( $Dex$ ) compatíveis com a redução do volume da máquina, evitando que o seu desempenho seja afetado com um aumento de sua saturação.

### B. Método dos Tensores (Back-EMF MST)

Proposto por [17], [18], o método Back-EMF MST relaciona o método da permeabilidade fixa (FP) com os tensores de Maxwell (MST) por meio do método dos elementos finitos (FEM) para uma avaliação adequada da força contra eletromotriz (Back-EMF), do torque eletromagnético e das parcelas que o compõe, baseando-se na distribuição das densidades de fluxo magnético [11], [17], [18].

Assim sendo, o método Back-EMF MST propõe para o cálculo do torque eletromagnético ( $T_{el}$ ):

$$T_{el} = \frac{l_{fe}}{\mu_0} \left\{ \left[ (B_{PM-FP})_R (B_{i-FP})_T + (B_{i-FP})_R (B_{PM-FP})_T \right] + \left[ (B_{i-FP})_R (B_{i-FP})_T + (B_{PM-FP})_R (B_{PM-FP})_T \right] \right\} d\theta \quad (1)$$

onde  $l_{fe}$  corresponde à altura do pacote de laminas do estator,  $\mu_0$  a permeabilidade absoluta do vácuo,  $r$  o raio do entreferro,  $(B_{PM-FP})_R$  componente radial recalculada da densidade de fluxo magnético proveniente dos ímãs,  $(B_{PM-FP})_T$  componente tangencial recalculada da densidade de fluxo magnético proveniente dos ímãs,  $(B_{i-FP})_R$  componente radial recalculada da densidade de fluxo magnético proveniente das correntes de armadura e  $(B_{i-FP})_T$  componente tangencial recalculada da

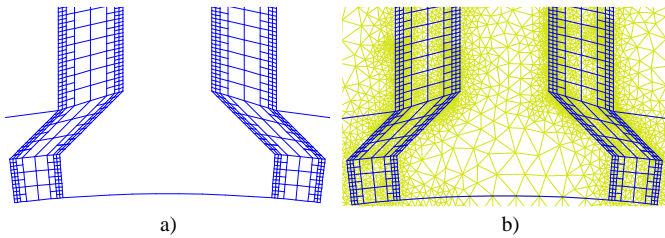


Fig. 2. Discretização variável – a) sem malha; b) com malha (FEM).

TABELA II. LIMITES DAS VARIÁVEIS DE OTIMIZAÇÃO.

Parâmetro	Mínimo	Máximo
$tw$ (mm)	2,040	5,000
$tsw$ (mm)	1,000	3,300
$Dex$ (mm)	103,4	116,6

densidade de fluxo magnético proveniente das correntes de armadura.

## IV. METODOLOGIA DE OTIMIZAÇÃO

Considerando a formulação das características do problema, metodologia de avaliação e os parâmetros de otimização apresentados anteriormente, inicia-se a aplicação do processo de otimização definido como [20], [21]:

$$x^* = \arg \min_x f(x) \leftrightarrow x^* = \arg \min_x f(x) \quad (2)$$

$$\text{Sujeito } a: \begin{cases} g_i(x) \leq 0, & i=1, \dots, p \\ h_i(x) = 0, & i=1, \dots, p \end{cases} \quad (3)$$

onde  $x$  é definido como sendo os parâmetros de otimização apresentados na TABELA II,  $f(x)$  como sendo a variação do torque eletromagnético e  $g(x)$  e  $h(x)$  como sendo as restrições de desigualdade e igualdade das variações do torque eletromagnético. Assim sendo, (2) e (3) correspondem respectivamente a:

$$\min f(x) = \Delta T_{el}(\%) \quad (4)$$

$$\text{Sujeito } a: g(x): \left| \Delta T_{el}(\%) \right| \leq 2,5\% \quad (5)$$

onde

$$\Delta T_{el}(\%) = \frac{T_{LOAD} - T_{AVG}}{T_{AVG}} \cdot 100 \quad (6)$$

onde  $T_{LOAD}$  corresponde ao torque eletromagnético instantâneo da SM-PMSM quando submetida à carga nominal e o  $T_{AVG}$  correspondente ao torque médio da SM-PMSM quando submetida à carga nominal.

Ao fim do processo de otimização a ondulação percentual do torque eletromagnético é calculada como:

$$T_{ripple}(\%) = \frac{T_{max} - T_{min}}{T_{AVG}} \cdot 100 \quad (7)$$

onde  $T_{max}$  é o torque máximo,  $T_{min}$  é o torque mínimo e  $T_{AVG}$  é o torque médio.

Apesar da restrição para a variação do torque eletromagnético ser definida como menor igual à 2,5%, como exibida em (5), ao final do processo de otimização espera-se alcançar uma ondulação percentual do torque eletromagnético ( $T_{ripple}$ ) inferior ou igual à 5%, tendo em vista que a restrição proposta permite uma variação para mais e para menos com relação ao torque médio ( $T_{AVG}$ ).

A fim de estabelecer uma metodologia de otimização para a SM-PMSM, aliada ao método de avaliação Back-EMF MST, este estudo aplicou e comparou 2 metodologias de otimização ao processo de otimização topológica. As etapas de aplicação do processo de otimização topológica são ilustradas na Fig. 3.

### A. Algoritmo Genético Compacto (CGA)

O método CGA [22], [23], proposto por [12], é uma estratégia evolutiva que reproduz o comportamento do GA, codificada apenas por um vetor probabilidade, permitindo uma avaliação individual de cada parâmetro de otimização.

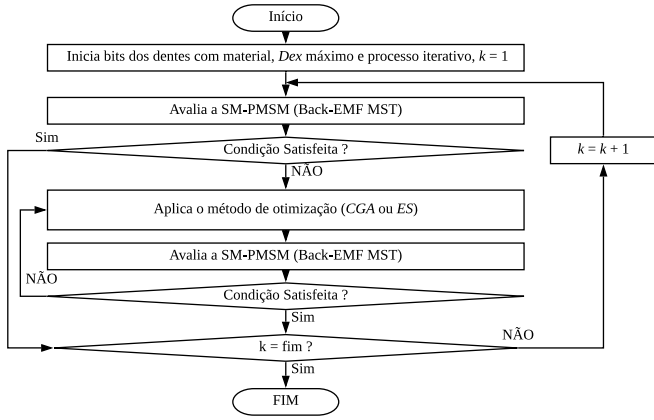


Fig. 3. Etapas do processo de otimização topológica.

Adicionalmente, no método CGA a geração de novos candidatos e sentido de busca são realizados por meio do vetor probabilidade, substituindo os operadores recombinação e mutação, aplicados ao método GA. O vetor probabilidade do método CGA é definido como:

$$p = [p_1 \ p_2 \ p_3 \ \dots \ p_n] \quad (8)$$

onde  $n$  representa as variáveis de otimização, e todos os elementos de  $p$  são inicialmente definidos com probabilidade 0,5 ( $p = [0,5 \ 0,5 \ 0,5 \ \dots \ 0,5]$ ).

Em seguida é estabelecida uma população composta por 2 candidatos a solução ótima, como:

$$Z^a = [z_1^a \ z_2^a \ z_3^a \ \dots \ z_n^a] \quad (9)$$

onde o subscrito  $a$  indica o candidato avaliado, caracterizado pelos parâmetros de otimização  $z$ .

A cada etapa do processo de otimização 2 candidatos são gerados a partir do vetor  $p$ , competindo entre si e substituindo os anteriores. O vetor  $p$  é então atualizado a partir do candidato com melhor desempenho:

$$p(i) = \begin{cases} p(i) + 1/\alpha, & z^{\text{vencedor}}(i) = 1 \text{ e } z^{\text{vencedor}}(i) \neq z^{\text{perdedor}}(i) \\ p(i) - 1/\alpha, & z^{\text{vencedor}}(i) = 0 \text{ e } z^{\text{vencedor}}(i) \neq z^{\text{perdedor}}(i) \\ p(i), & z^{\text{vencedor}}(i) = z^{\text{perdedor}}(i) \end{cases} \quad (10)$$

onde  $1/\alpha$  é o percentual incrementado ao vetor  $p$ , dada a condição do candidato com melhor desempenho, sendo  $\alpha$  o tamanho da população simulada e  $0 < i \leq n$ . Assim, à medida que o processo iterativo evolui, o vetor  $p$  tende a convergir para uma solução explícita, finalizando quando todos os valores do vetor  $p$  são iguais a 1 ou a 0, ou mesmo quando o número de iterações for satisfeito [24].

### B. Estratégias de Evolução (ES)

O método ES apresenta uma estrutura de solução ótima especificada pelos parâmetros de otimização e seus respectivos parâmetros auto-adaptação. Essa auto-adaptação permite uma adequação pontual de cada parâmetro de otimização candidata

à função objetivo. Assim sendo, a solução candidata é definida como [13]-[16], [21]:

$$X^a = [x_1^a \ x_2^a \ x_3^a \ \dots \ x_n^a \mid \sigma_1^a \ \sigma_2^a \ \sigma_3^a \ \dots \ \sigma_n^a] \quad (11)$$

onde o subscrito  $a$  indica o candidato avaliado, caracterizado pelos parâmetros de otimização  $x$  e seus respectivos parâmetros de auto-adaptação  $\sigma$ .

A partir dos desempenhos obtidos da população composta por  $\mu$  candidatos, as soluções são então combinadas em pares por meio da recombinação intermediária local, definida como [14]:

$$X' = \alpha X^a + (1 - \alpha) X^b \quad (12)$$

onde  $X'$  são candidatos descendentes de  $\lambda$  descendentes da população total,  $\alpha$  sendo um parâmetro aleatório uniformemente distribuído ( $0 \leq \alpha \leq 1$ ) gerado para cada recombinação e os subscritos  $a$  e  $b$  definindo os candidatos selecionados para o processo. A mutação dos parâmetros de auto-adaptação e dos parâmetros de otimização são definidos como [21]:

$$\sigma_i^{t+1} = \sigma_i^t e^{(\tau' N(0,1) + \tau N_i(0,1))} \quad (13)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + \sigma_i^{t+1} N_i(0,1) \quad (14)$$

onde

$$\tau' \propto (2n)^{-1/2} \quad (15)$$

e

$$\tau \propto (4n)^{-1/4} \quad (16)$$

onde  $i = 1, \dots, n$  parâmetros de otimização,  $N(0,1)$  como sendo uma distribuição Normal com média zero e desvio padrão unitário [15], [16], [25], [26],  $\tau'$  como sendo o agente global responsável por proporcionar uma modificação completa na mutabilidade de seus parâmetros e  $\tau$  como sendo o agente local responsável por proporcionar alterações individuais nos tamanhos de passos dos parâmetros [26], [27].

Ao final da avaliação de todos os candidatos ( $\mu + \lambda$ ), são selecionados  $\mu$  candidatos para a formulação da nova população.

## V. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Como mencionado, o objetivo do processo de otimização aplicado a este estudo é a otimização do torque eletromagnético, empregando às metodologias propostas, o processo de otimização topológica. Antes do processo de otimização, a SM-PMSM apresentava uma ondulação do toque eletromagnético de 6,49% e um volume de 275,33 cm<sup>3</sup>. Com o processo de otimização, espera-se que o torque eletromagnético apresente uma ondulação inferior à 5% com relação ao torque médio da SM-PMSM operando em carga nominal (10A).

No início de cada processo de otimização a SM-PMSM assume as dimensões máximas para cada parâmetro de otimização, modificando os bits dos dentes (assumindo 1 para

bit com material e 0 para bit sem material) tal como redimensionando o diâmetro externo do estator (*Dex*), conforme adequação ao objetivo do processo de otimização.

Para comparar o desempenho das metodologias abordadas neste estudo, foram avaliadas as ondulações no torque eletromagnético, o volume final da SM-PMSM e o tempo consumido no processo de otimização. Como as avaliações das PMSM demandam um esforço computacional significativo, é importante a seleção da metodologia que atinja um modelo ótimo em um tempo de processamento reduzido, bem como um modelo com maior eficiência e um menor volume estrutural.

Os resultados apresentados neste estudo foram obtidos mediante a simulação 2D FEM de  $\frac{1}{6}$  do período elétrico, utilizando uma CPU Intel Core™ i7-4510U, 2,60 GHz, 8,00 GB de RAM, sem computação paralela. Para garantir uma melhor amostragem do comportamento do método proposto, foram realizados 10 processos de otimização topológica para a SM-PMSM, exibindo a melhor solução para cada metodologia de otimização (*CGA e ES*).

### A. Método CGA

Com a redução do diâmetro externo do estator de 116,6mm para 103,4mm, bem como a nova estrutura dos dentes, a máquina reduziu seu volume para 170,07 cm<sup>3</sup> e obteve uma ondulação do torque eletromagnético de 4,26%, correspondendo em uma redução de 34,33%. O tempo de processamento para a obtenção do modelo ótimo foi de aproximadamente 47 minutos. Neste método o dente 1 assume 0 para quase todos os bits, eliminando o material de cada bit 0 da estrutura do dente. Ao contrário do dente 1, o dente 2 assume 1 para todos os bits de sua estrutura e mantém todo o material. A Fig. 6 e a TABELA III apresentam o comportamento do torque eletromagnético inicial e otimizado da SM-PMSM.

### B. Método ES

Seguindo um comportamento similar ao obtido no método CGA, o método ES obteve uma redução no diâmetro externo do estator de 116,6mm para 103,4mm reduzindo seu volume para 174,24 cm<sup>3</sup>, mantendo mais bits na estrutura do dente 1. Novamente todos os bits do dente 2 assumiram parâmetro 1, mantendo todo material da estrutura. A ondulação do torque eletromagnético para o modelo ótimo obtido se manteve em torno de 4,06% reduzindo em 37,44% comparado ao modelo inicial da SM-PMSM, exibidos na Fig. 6. O tempo de processamento para a obtenção do modelo ótimo foi de aproximadamente 76 minutos. A TABELA III apresenta o comportamento do torque eletromagnético inicial e otimizado da SM-PMSM para o método ES.

### C. Comparação dos Métodos Aplicados

Apresentado os resultados dos métodos, observou-se que para ambos, o objetivo em reduzir as ondulações do torque eletromagnético foi satisfeito apresentando uma eficiência significativamente superior à restrição proposta.

Embora ambos os métodos tenham satisfeito o objetivo do projeto referente à otimização do torque eletromagnético, o método ES se destaca por apresentar uma redução

consideravelmente melhor do que para o modelo ótimo obtido por meio do método CGA. Entretanto, o volume para o modelo da SM-PMSM obtido por meio do método ES superou o mesmo obtido pelo método CGA, dada as características estruturais do dente 1, visto que o dente 2 foi semelhante em ambos os métodos, bem como o diâmetro externo do estator, viabilizando economicamente o método CGA.

A Fig. 4, a Fig. 5 e a Fig. 6 ilustram as estruturas dos dentes obtido pelos métodos de otimização (CGA e ES) e o comparativo da ondulação do torque eletromagnético, com relação ao comportamento antes da aplicação do processo de otimização à SM-PMSM. Na TABELA IV são apresentados os parâmetros mensurados para a comparação dos métodos.

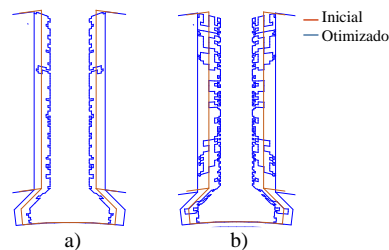


Fig. 4. Comparativo Da Estrutura Do Dente 1. a) CGA; b) ES.

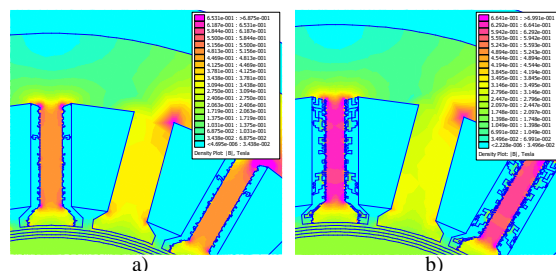


Fig. 5. Densidade de Fluxo Magnético no Estator. a) CGA; b) ES.

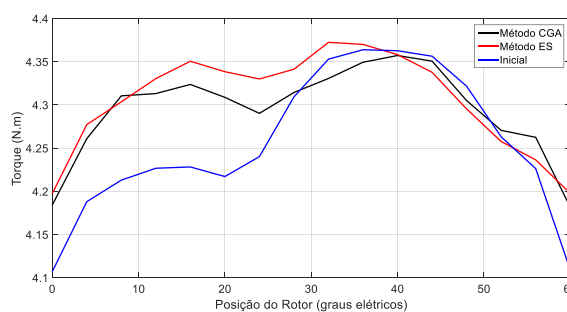


Fig. 6. Comparativo Do Torque Eletromagnético: Inicial x CGA x ES.

TABELA III. COMPARATIVO DO TORQUE ELETROMAGNÉTICO: INICIAL X CGA X ES.

	Max	Min	AVG	RMS
Inicial (N.m)	4,372	4,096	4,260	4,261
Otimizado CGA (N.m)	4,359	4,176	4,294	4,295
Otimizado ES (N.m)	4,372	4,197	4,309	4,309

TABELA IV. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS.

	Ondulação do Torque (%)	Percentual de Redução (%)	Tempo de Otimização	Volume (cm <sup>3</sup> )
Inicial	6,49	-	-	275,33
CGA	4,26	34,33	47 min	170,07
ES	4,06	37,44	76 min	174,24

## VI. CONCLUSÃO

Este estudo desenvolveu um método de otimização topológica para elaboração e correção de projetos de máquinas síncronas com ímãs permanentes, em que, associando a metodologia de otimização (CGA, ES) junto ao método de avaliações Back-EMF MST, possibilitou uma redução considerável no número de avaliações para se alcançar o objetivo do projeto.

A otimização do projeto de uma SM-PMSM apresenta uma grande precisão e robustez quanto aos efeitos eletromagnéticos, dado a importância do torque eletromagnético e as parcelas que a compõe, os quais relacionam tanto os efeitos provenientes dos ímãs permanentes, quanto aos efeitos provenientes das correntes de armadura.

A metodologia desenvolvida proporcionou em seus processos de otimização uma redução de 37,44% na ondulação presente no torque eletromagnético, obtida pelo método ES e uma redução de 38,23% em seu volume inicial obtida pelo método CGA, bem como uma redução no tempo de processamento de otimização da SM-PMSM, viabilizando economicamente e tecnicamente a aplicação da metodologia proposta aos processos de otimização comerciais.

Ambas as metodologias de otimização (CGA e ES) apresentaram resultados satisfatórios, atendendo todos os objetivos e às restrições proposta pelo projeto. O método CGA apresentou uma característica de melhor viabilidade econômica, haja visto que a redução no volume foi significativamente melhor, assim como o tempo de otimização da SM-PMSM. Por outro lado, o método ES obteve a menor ondulação do torque eletromagnético, viabilizando tecnicamente o projeto.

O método de otimização topológica proposto pode ser aplicado à otimização de diferentes topologias de máquinas elétricas. Como ampliação deste estudo e trabalhos futuros, sugere-se a aplicação de diferentes metodologias de otimização e a inclusão de novos parâmetros de projeto da PMSM ao processo de otimização.

## REFERÊNCIAS

- [1] D. Miyagi, S. Nakazaki, and N. Takahashi, "Optimization of Electromagnetic and Magnetic Shielding Using ON/OFF Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 46, August 2010.
- [2] D. Miyagi, S. Shimose, N. Takahashi, and T. Yamada, "Optimization of Rotor of Actual IPM Motor Using ON/OFF Method," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, May 2011.
- [3] J. B. Kim, K. Y. Hwang, and B. I. Kwon, "Optimization of Two-Phase In-Wheel IPMSM for Wide Speed Range by Using the Kriging Model Based on Latin Hypercube Sampling," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, May 2011.
- [4] Y. Duan and D. M. Ionel, "A Review of Recent Developments in Electrical Machine Design Optimization Methods with a Permanent Magnet Synchronous Motor Benchmark Study," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 49, May-June 2013.
- [5] K. Yamazaki and H. Ishigami, "Rotor-Shape Optimization of Interior-Permanent-Magnet Motors to Reduce Harmonic Iron Losses," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 57, January 2010.
- [6] J. Kwack, S. Min and Hong, J.P., "Optimal design of stator and rotor of interior permanent magnet motor with reduced torque ripple for wide speed range operation," *IEEE Conference on Electromagnetic Field Computation*, May 2010.
- [7] T. Sato, K. Watanabe and H. Igarashi, "Multimaterial Topology Optimization of Electric Machines Based on Normalized Gaussian Network," *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 51, no. 3, pp. 1-4, March 2015.
- [8] P. Gangl and U. Langer, "Topology Optimization of Electric Machines based on Topological Sensitivity Analysis," *Computing and Visualization in Science*, November 2016.
- [9] H. A. Eschenauer, V. V. Kobelev, and A. Schumacher, "Bubble method for topology and shape optimization of structures," *Structural Optimization*, pp. 42-51, 1994.
- [10] A. A. Novotny and J. Sokołowski. *Topological Derivatives in Shape Optimization*. Springer, 2013.
- [11] L. H. R. Jesus, G. T. Paula and L. C. Brito, "On-load Back-EMF Optimization Based on the Back-EMF MST Method and Parametric Optimization," *Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications*, vol. 18(3), pp. 358-376, Sept 2019.
- [12] G. R. Harik, F. G. Lobo and D. E. Goldberg, "The Compact Genetic Algorithm," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), pp. 287-297, 1999.
- [13] L. H. R. Jesus and L. C. Brito, "Interactive Evolution Strategies for Minimizing Single-Objective Functions," *IEEE Latin America Trans.*, vol. 15, May 2017.
- [14] C. Magele, *Evolution Strategies and Optimization*, IGTE Graz University of Technology, Austria, 2001.
- [15] T. Bäck and H. P. Schwefel, "An overview of evolutionary algorithms for parameter optimization," *Evolutionary computation*, pp. 1-23, 1993.
- [16] T. Bäck and H. P. Schwefel, "Evolutionary computation: An overview," *IEEE International Conference on Evolutionary computation*, pp. 20-29, 1996.
- [17] G. T. Paula, J. R. B. A. Monteiro, B. P. Alvarenga, T. E. P. Almeida, W. C. A. Pereira, and M. P. Santana, "On-Load Back EMF of PMSM Using Maxwell Stress Tensor," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 54, July 2018.
- [18] G. T. Paula, *Assessment of Surface Mounted Magnet Synchronous Machine's On-Load Back-EMF*, Ph.D. thesis, Univ. São Paulo, São Carlos, 2016.
- [19] Emotor, *Electric Motor Winding Calculator*, Available: <https://www.emotor.com/windings/>, Copyright © 2018.
- [20] I. Rechenberg, *Cybernetic solution path of an experimental problem*, Royal Aircraft Establishment, United Kingdom, 1965.
- [21] H. P. Schwefel, *Numerical Optimization of Computer Models*, John Wiley & Sons, United Kingdom, 1981.
- [22] D. Beasley, D. R. Bull and R. R. Martin, "An Overview of Genetic Algorithms: Part 1, Fundamentals," *University Computing*, 15(2), pp. 58-69, 1993.
- [23] M. Mitchel, "An Introduction to Genetic Algorithms," The MIT Press, Cambridge, Massachusetts - London, England, 1998.
- [24] G. R. Harik, "Linkage Learning via Probabilistic Modeling in The ECGA," *Urbana*, 51(61), pp. 801-817, 1999.
- [25] H. P. Schwefel, *Evolution and Optimum Seeking*, John Wiley & Sons, New York, 1995.
- [26] T. Bäck, H. P. Schwefel and G. Rudolph, "Evolutionary Programming and Evolution Strategies: Similarities and Differences," In *Proceedings of the Second Annual Conference on Evolutionary Programming*, 1993.
- [27] T. Bäck, "Evolutionary Algorithms in Theory and Practice," Oxford University Press, New York, 1996.