Análise Computacional da Eficiência de um Indutor Supercondutor em um Conversor do Tipo *Boost* ⋆

Rafhael de Souza Lima * **Gabriel dos Santos** ** **Bárbara Maria Oliveira Santos** *** **Flávio Goulart dos Reis Martins** **** **Felipe Sass** †

* *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense (e-mail: rafhaelsouzalima@gmail.com)*
** *Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (e-mail: gabriel.santos@eng.uerj.br)*
*** *Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio de Janeiro (e-mail: barbara.santos@eng.uerj.br)*
**** *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense (e-mail: flaviogdrm@id.uff.br).*
† *Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal Fluminense (e-mail: felipesass@id.uff.br).*

Abstract: This paper presents a computational analysis of a boost converter using a superconductor coil and compares it with the same converter using a copper coil, for different operation temperatures. The converter's voltage gain and efficiency are analysed and compaired for different scenarios. Circuit simulations are performed using the Simulink by Matlab software and Finite Element Method (MEF) simulations are performed using the Comsol software with the J-A formulation. It is realized that the greater voltage gain and efficiency are obtained using the superconductor coil. Furthermore, it is noticed that an efficiency improvement is reached when cables, connections and semiconductors switches resistances are reduced, however, this strategy may increase the AC losses in the superconductor.

Resumo: Este trabalho apresenta uma análise computacional de um conversor do tipo *Boost* que utiliza uma bobina supercondutora e compara os resultados com o mesmo conversor utilizando uma bobina de cobre comum, em diferentes temperaturas de operação. O ganho de tensão e a eficiência dos conversores são analisados para diferentes cenários. São realizadas simulações de circuito usando o *software* Simulink do Matlab e simulações pelo Método dos Elementos Finitos (MEF) utilizando o *software* Comsol com a formulação J-A. Percebe-se que o conversor usando bobina supercondutora apresenta o maior ganho de tensão e a melhor eficiência. Além disso, percebe-se que há uma melhora da eficiência quando se diminui as resistências dos cabos, conexões e das chaves semicondutoras, no entanto essa estratégia pode acarretar em um aumento das perdas em CA do supercondutor.

Keywords: Boost Converter; Superconductor Coil; J-A Formulation; Finite Element Method; Cryogenical Boost Converter; Efficiency Analysis.

Palavras-chaves: Conversor Boost; Bobina Supercondutora; Formulação J-A; Método dos Elementos Finitos; Conversor Boost Criogênico; Análise de Eficiência.

1. INTRODUÇÃO

Fontes renováveis de energia têm ganhado destaque globalmente como uma alternativa sustentável e ecologicamente amigável para auxiliar a transição energética. No entanto, para conectar essas fontes à rede de distribuição de energia elétrica, há a necessidade do uso de tecnologias de eletrônica de potência para ajustar a tensão elétrica gerada (Carrasco, 2006). Células fotovoltaicas possuem uma relação não linear entre potência e tensão, dessa forma é comum o uso de conversores CC-CC, e.g. o conversor *Boost* (Figura 1), para elevar e controlar a tensão. Além disso, técnicas como os algoritmos de rastreamento do ponto de máxima potência (*maximum power point trackers*, MPPTs) podem ser aplicadas para maximizar a potência produzida (I. Azeem and Uddin, 2018; Başoğlu and Çakır, 2016).

Teoricamente, o ganho de tensão de um conversor *Boost* é ilimitado quando o ciclo de trabalho se aproxima da unidade. Contudo, na prática, por conta das perdas resistivas do próprio conversor, a eficiência e o ganho de tensão são reduzidos a partir de determinado valor de ciclo de trabalho (Erickson and Maksimovic, 2001).

⋆ Os autores reconhecem o suporte financeiro realizado pela CAPES.

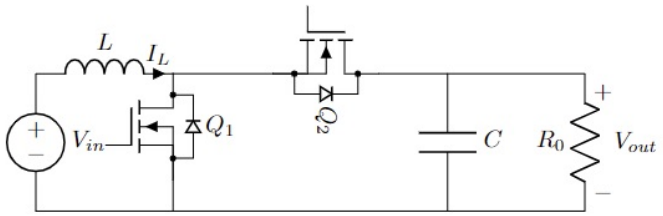

Figura 1. Topologia do conversor *boost*.

O ganho de tensão de um conversor *Boost* é inversamente proporcional a sua resistência equivalente, o qual a resistência do indutor representa a maior parte. Uma forma de reduzir a resistência do indutor é por meio do uso de uma bobina supercondutora. As fitas supercondutoras de segunda geração apresentam o estado supercondutor abaixo da temperatura de 77K, temperatura do nitrogênio líquido ($LN2$), o que permite sistemas criogênicos mais simples e acessíveis (T. Yang and Xin, 2024). Ademais, alguns estudos mostraram que a alocação das chaves semicondutoras na mesma temperatura que o indutor supercondutor reduz drasticamente a sua resistência de condução (Gallice et al., 2022; Chen et al., 2016; Garcia et al., 2024). Dessa forma, para o conversor aqui estudado, foi utilizado outro MOSFET (Q_2) ao invés de um diodo, pois sua resistência de condução é notoriamente reduzida em temperatura criogênica (Chen et al., 2016; Garcia et al., 2024).

À medida que a resistência do indutor é reduzida, outras perdas se tornam mais significativas: a resistência de condução dos semicondutores, perdas no núcleo ferromagnético, perdas de chaveamento, resistência dos cabos e conexões e perdas de corrente alternada na fita supercondutora. Apesar do fato de um supercondutor não possuir resistência em corrente contínua, há perdas em corrente alternada que não podem ser negligenciadas, uma vez que elas podem causar problemas para a estabilidade criogênica e redução da eficiência do conversor (Grilli et al., 2014)

Para prever seu comportamento e projetar a bobina supercondutora, uma simulação baseada no método dos elementos finitos (MEF) pode ser realizada. A literatura têm apresentado diversas formulações para a simulação de supercondutores, das quais a formulação H e T-A são as mais populares (Shen et al., 2020; Shen, 2019; Zhang et al., 2016). Recentemente, foi proposta a formulação J-A, a qual possui como grande vantagem a sua facilidade de implementação, além de apresentar resultados coerentes com os obtidos nas demais formulações (dos Santos et al., 2023; Wang et al., 2023).

Ao se conduzir simulações computacionais para o conversor *boost*, é mandatório que se considere que a corrente passando pelo indutor (I_L na Figura 1) seja um sinal não-senoidal cuja forma depende de muitos parâmetros do conversor. Portanto, uma forma possível de se obter a corrente do indutor é o acoplamento da simulação por elementos finitos com a corrente obtida em uma simulação de circuitos.

Nesse contexto, esse artigo visa avaliar o desempenho do indutor supercondutor em um conversor *Boost* utilizando simulações pelo MEF. Os parâmetros usados para as simulações são similares a um experimento realizado em

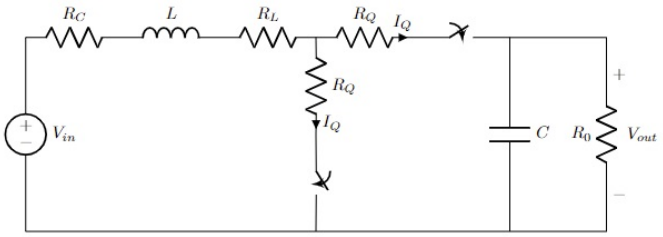

Figura 2. Topologia do conversor *boost* analisado neste trabalho.

(Garcia et al., 2024), no qual foi construído e testado um conversor *Boost* criogênico com um indutor composto de uma bobina do tipo *racetrack* panqueca dupla de fita 2G ao redor de um núcleo de ferrite.

Esse trabalho é dividido em 5 seções, sendo a primeira para explicar suas motivações e objetivos. A seção 2 explica a metodologia usada para a simulação e obtenção dos resultados. Seção 3 lida com os procedimentos de simulação e apresenta os parâmetros utilizados. Seção 4 mostra os resultados e uma breve discussão sobre eles. Por fim, a seção 5 apresenta a conclusão com propostas de trabalhos futuros.

2. METODOLOGIA

2.1 Conversor Boost

O objetivo principal de um conversor CC-CC do tipo *boost* é elevar a tensão de saída para níveis maiores que a tensão de entrada. Dessa forma, o ganho de tensão é um dos seus mais importantes parâmetros. Equação (1) mostra o ganho estático de tensão (G) de um conversor boost ideal operando em regime permanente e modo de condução contínua (Erickson and Maksimovic, 2001). Analisando a equação (1), para um conversor ideal, observa-se que o ganho G tende ao infinito quando D tende para 1. Por outro lado, em conversores reais, existe um valor de D em que G é máximo.

$$G = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1-D}, \tag{1}$$

Na realidade, ao se considerar o real comportamento dos componentes eletrônicos e suas perdas, quando o valor de D aumenta, a eficiência do conversor diminui rapidamente, limitando o ganho de tensão. Um circuito equivalente simplificado de um conversor boost não-ideal é mostrado na Figura 2, onde é considerada a resistência do indutor (R_L), a resistência de condução dos MOSFETs (R_Q) e uma resistência associada aos cabos e conexões do conversor (R_C). Os MOSFETs são representados como chaves ideais.

A literatura usualmente aproxima o valor de G considerando apenas a influência da resistência do indutor (Erickson and Maksimovic, 2001), no entanto, se o valor de R_L diminui, outras contribuições na limitação do ganho de tensão se tornam mais significantes (Garcia et al., 2024). Equação (2) aproxima o ganho estático de tensão (G) de um conversor não ideal considerando sua resistência equivalente (R_{EQ}) (Garcia et al., 2024).

$$G = \frac{1}{1-D} \cdot \frac{1}{1+\frac{R_{EQ}}{R_0(1-D)^2}}, \tag{2}$$

Independente de qual MOSFET está conduzindo, a resistência equivalente do circuito é composta da resistência do indutor em série com a resistência de condução do MOSFET. Além disso, pode-se considerar uma resistência associada à resistência dos cabos e conexões (R_C) do conversor de forma que pode-se escrever R_{EQ} como na equação (3). De acordo com (Garcia et al., 2024), a resistência (R_C) está na ordem da unidade de miliohms.

$$R_{EQ} = R_L + R_Q + R_C, \tag{3}$$

Para se obter qual o valor de ciclo de trabalho que maximiza o ganho do conversor, pode-se derivar a expressão dada na Equação 2 em termos de D e então igualá-la a zero, obtendo-se a equação (4),

$$\frac{R_0((D-1)^2R_0 - R_{EQ})}{((D-1)^2R_0 + R_{EQ})^2} = 0, \tag{4}$$

onde R_0 consiste da resistência da carga. Resolvendo a equação (4) para D, obtêm-se uma expressão que maximiza o ganho de tensão G (Equação (5)).

$$D = 1 - \sqrt{\frac{R_{EQ}}{R_0}}, \tag{5}$$

Ainda de acordo com (Garcia et al., 2024), a eficiência η do conversor tem uma relação direta com o ganho de tensão, de forma que para um determinado valor de ciclo de trabalho, quanto maior o ganho, maior será a eficiência, como representado na equação (6).

$$\eta = (1-D)G, \tag{6}$$

2.2 Formulação J-A com aproximação fita-lâmina

Essa formulação utiliza a densidade de corrente $\boldsymbol{J}$ e o vetor potencial magnético $\boldsymbol{A}$ como variáveis de estado. A formulação J é utilizada apenas no domínio supercondutor e a formulação A é aplicada em todos os domínios (dos Santos et al., 2023; Wang et al., 2023). Considerando que a única fonte de energia é a corrente imposta, com a lei de Ohm e assumindo a Lei da Potência (*Power Law*) para supercondutores (Grilli et al., 2014), a densidade de corrente é computada no domínio supercondutor de acordo com a equação (7),

$$\frac{E_C}{J_C}\left|\frac{\boldsymbol{J}}{J_C}\right|^{n-1}\boldsymbol{J} = -\frac{\partial \boldsymbol{A}}{\partial t}, \tag{7}$$

onde E_C é o campo elétrico crítico definido como $1\mu V/cm$, n é o expoente da Lei da potência definido como 25 nesse trabalho e J_C denota a densidade de corrente crítica que depende do material supercondutor utilizado.

Com J calculado na formulação J, este é imposto na formulação **A** apresentada pela equação (8),

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu}\nabla \times \boldsymbol{A}) = \boldsymbol{J}, \tag{8}$$

onde μ é a permeabilidade magnética. Em um caso em 2 dimensões, considerando o plano cartesiano infinito perpendicular ao eixo z, as equações (7) e (8) se tornam,

$$\frac{E_C}{J_C}\left|\frac{J_z}{J_C}\right|^{n-1} J_z = -\frac{\partial A_z}{\partial t}, \tag{9}$$

$$\nabla \times (\frac{1}{\mu}\nabla \times A_z) = J_z, \tag{10}$$

onde J_z e A_z são as componentes de densidade de corrente e do vetor potencial magnético na direção z. Restrições integrais são usadas para impor a corrente total no domínio supercondutor, como na equação (11)

$$\int\int J_z dS - I_{app} = 0, \tag{11}$$

onde I_{app} é a corrente aplicada. Para a fita 2G, devido as suas diferentes proporções geométricas, tais como a largura muito maior que a sua espessura, pode-se usar a aproximação fita-lâmina (Sugita and Ohsaki, 2023). Nesse caso, a aplicação de corrente é direta: a corrente calculada nas linhas supercondutoras na formulação J atua como uma densidade superficial externa de corrente na formulação **A**, como apresentado na equação (12),

$$J_z\hat{z} = \boldsymbol{K}d, \tag{12}$$

onde d é a espessura da camada supercondutora, $\boldsymbol{K}$ é a densidade superficial de corrente no domínio supercondutor e $\hat{z}$ é o vetor unitário na direção z. Para impor a densidade de corrente na formulação A, ainda considerando a aproximação fita-lâmina, uma condição de fronteira é usada, como na equação (13).

$$\boldsymbol{n} \times (\boldsymbol{H}_1 - \boldsymbol{H}_2) = \boldsymbol{K}d, \tag{13}$$

com os vetores $\boldsymbol{H}_1$ e $\boldsymbol{H}_2$ sendo as intensidades de campo magnético tangenciais à lâmina de corrente (superfície supercondutora), sendo $\boldsymbol{H}_1$ e $\boldsymbol{H}_2$ os campos magnéticos dos meios 1 e 2, respectivamente. E $\boldsymbol{n}$ é o vetor unitário normal à superfície da fita 2G.

3. PROCEDIMENTOS DE SIMULAÇÃO

3.1 Modelo da simulação por elementos finitos

O reator simulado nesse artigo é composto de uma bobina de fita supercondutora 2G com geometria de panqueca dupla do tipo *racetrack* e um núcleo ferromagnético do tipo EE de ferrite. A simulação pelo MEF foi executada no programa comercial COMSOL 6.0.

A seção reta da geometria é apresentada na Figura 3 (a). Considerando a simetria horizontal e vertical, o modelo pode ser reduzido a um quarto do seu tamanho original, como apresentado na Figura 3 (b).

Dimensões consideradas no modelo são similares às usadas em (Garcia et al., 2024) e são apresentadas na Tabela 1.

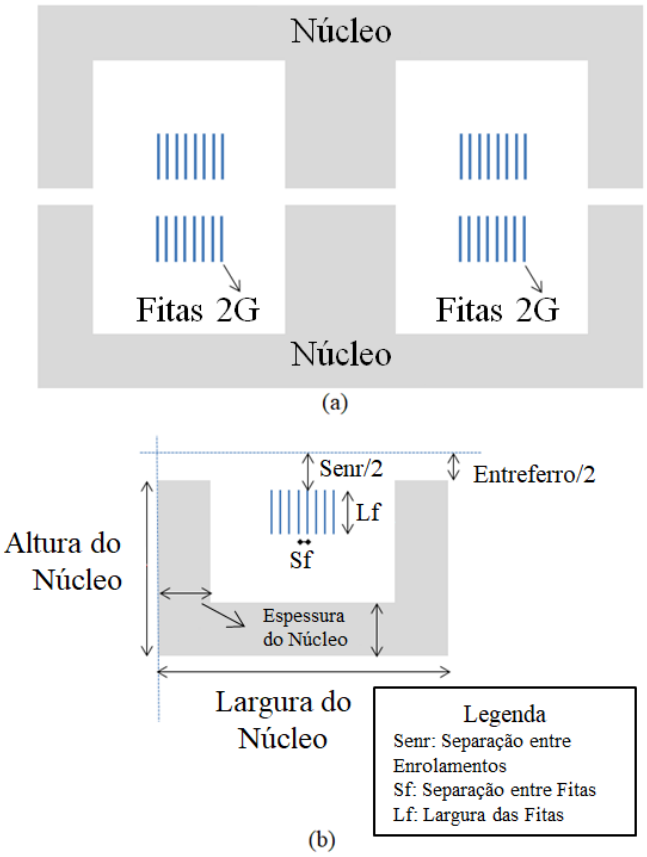

Figura 3. (a) Seção reta do indutor supercondutor. (b) Simulação reduzida a um quarto do tamanho original.

O núcleo de ferrite é produzido pela Thornton, modelo NC-100/57/25 e as fitas 2G supercondutoras são fabricadas pela Superpower, modelo SCS4050-i. O entreferro na vertical entre os núcleos de ferrite é ocasionado pela imperfeição no contato entre as superfícies.

Tabela 1. Parâmetros dos Materiais e Geometria.

Parâmetro	Valor
Altura do núcleo	5,71 cm
Largura do núcleo	10,16 cm
Espessura do núcleo	2,54 cm
Profundidade do núcleo	2,54 cm
Número de Núcleos de Ferrite na direção z	8
Largura da fita	4,00 cm
Espessura da Camada Supercondutora	1,00 μm
Entreferro	0,50 mm
Separação entre Enrolamentos	1,00 mm
Separação entre fitas	0,2 mm
Comprimento de Fita (Bobina completa)	11,6 m
Corrente Crítica (Autocampo)	100 A

3.2 Modelo da simulação de circuito

Para obter a corrente do indutor, uma simulação de circuito foi realizada. A topologia do circuito é apresentada na Figura 2. Para o modelo de circuito, a resistência do indutor usando fita supercondutora foi inicialmente desconsiderada. Os parâmetros utilizados na simulação de circuito estão apresentados na Tabela 2. A simulação

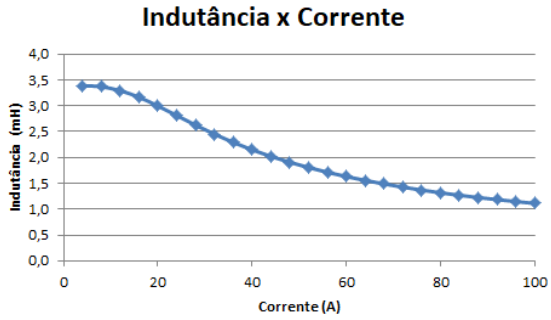

Figura 4. Indutância como função da corrente no indutor.

de circuitos foi realizada usando o *software* Simulink do Matlab.

Tabela 2. Parâmetros do Circuito.

Parâmetro	Valor
Fonte de Tensão - V_{in}	1,00 V
Resistência de Condução MOSFET @77K	5,492 mΩ
Resistência de Condução MOSFET @300K	18,245 mΩ
Resistência do Indutor de Cobre @77K	3,4305 mΩ
Resistência do Indutor de Cobre @300K	25,561 mΩ
Frequência de Chaveamento	3920 Hz
Capacitância do Capacitor	33 mF
Resistência da Carga	10 Ω

O indutor é representado por uma indutância não linear cujo valor foi calculado em uma simulação em MEF estacionária preliminar para uma corrente aplicada variando de 2,5 A até 100 A em intervalos de 2,5 A. Independente do uso de bobina de cobre ou supercondutora, o valor da indutância do indutor permanece o mesmo, uma vez que essa depende apenas da corrente, do número de espiras (que é o mesmo em ambas bobinas) e do caminho percorrido pelo fluxo magnético e seu meio. A curva de indutância com relação à corrente aplicada está apresentada na Figura 4.

São analisados 3 conversores *Boost* considerando bobinas e chaves semicondutoras em temperaturas de operação diferentes: 1) Bobina de cobre e chaves em temperatura ambiente ($300K$); 2) Bobina de cobre e chaves em temperatura criogênica ($77K$); 3) Bobina supercondutora e chaves em temparatura criogênica ($77K$).

As simulações contam com 4 cenários diferentes que são aplicados aos 3 conversores analisados. Os ciclos de trabalho foram calculados a partir da equação 5. No cenário 1, o ciclo de trabalho utilizado é aquele que resulta no ganho máximo para o conversor de bobina de cobre em temperatura ambiente. No cenário 2, o ciclo de trabalho é aquele que resulta no ganho máximo para o conversor de bobina de cobre em temperatura criogênica. Os cenários 3 e 4 utilizam os mesmos ciclos de trabalho dos cenários 1 e 2, respectivamente, mas nestes é considerado uma redução nas resistências dos cabos e conexões e da chave semicondutora ao se utilizar MOSFETs em paralelo.

A corrente no indutor obtida durante o regime permanente na simulação de circuito foi replicada na simulação em MEF para analisar o comportamento da bobina supercondutora e calcular suas perdas em CA e resistência equivalente.

3.3 Cálculo da Eficiência

A eficiência do conversor *Boost* pode ser analisada calculando a relação entre a potência de saída sobre a potência de entrada. A potência de entrada pode ser calculada através da tensão da fonte de tensão e da corrente do indutor durante o regime permanente, obtendo-se um valor médio a partir da equação (14).

$$P_{in} = \frac{\int_T V_{in} I_L dt}{T}, \tag{14}$$

A potência de saída pode ser obtida através da simulação de circuitos, a partir da tensão e corrente sobre a carga durante o regime permanente, obtendo-se um valor médio a partir da equação (15).

$$P_{out} = \frac{\int_T V_{out} I_{out} dt}{T}, \tag{15}$$

Para se calcular as perdas associadas a bobina supercondutora, o seguinte processo iterativo foi realizado: Inicialmente, é considerada uma resistência nula para o indutor e então realizada a simulação de circuitos. A partir desta, uma forma de onda para a corrente no indutor é obtida e então aplicada na simulação por MEF. Então, a partir da potência dissipada no supercondutor (Q), uma resistência equivalente do supercondutor é calculada (R_{SC}). Essa resistência é utilizada na simulação de circuitos como sendo a resistência do indutor. O processo se repete até que a diferença percentual entre as resistências equivalentes do indutor supercondutor calculadas na iteração atual e na anterior seja menor que $1,00\%$, de acordo com a equação (16).

$$\%Erro = \frac{|R_{SC}^{[n]} - R_{SC}^{[n-1]}|}{R_{SC}^{[n]}} \times 100\%. \tag{16}$$

A potência dissipada Q é calculada apenas no domínio supercondutor Ω na simulação por MEF, como na equação (17).

$$Q = \int \int_{\Omega} E_z J_z d\Omega \times T_l, \tag{17}$$

em que E_z é a componente z do campo elétrico, J_z é a componente z da densidade de corrente e T_l é o comprimento total da fita usada na bobina. Para se obter a resistência equivalente em CA do supercondutor, utiliza-se a potência dissipada (Q) e a lei de Ohm, como descrita na equação (18).

$$R_{SC} = \frac{\int_T Q/I_L^2 dt}{T}. \tag{18}$$

Como esperado, a resistência do supercondutor varia no tempo, portanto a equação (18) calcula o seu valor médio.

4. RESULTADOS

Para os cenários 1 e 2, foram considerados uma resistência de cabos e conexões de $R_C = 5,0m\Omega$. Para o cenário 1, foi consirado um ciclo de trabalho de 0,93, pois este de acordo com a equação 5 é o que retorna o melhor ganho para o indutor de bobina de cobre em temperatura ambiente. Para o cenário 2, foi considerado um ciclo de trabalho de 0,963, pois este retorna o melhor ganho para o indutor de bobina de cobre em temperatura criogênica. Os resultados da simulação para a eficiência e ganho de tensão dos conversores *Boost* analisados para os cenários 1 e 2 estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Resultados da Simulação.

Cenário 1	D	η	G
Cobre - 300K	0.93	0.501	7.157
Cobre - 77K	0.93	0.779	11.124
Supercondutor - 77K	0.93	0.821	11.732
Cenário 2	D	η	G
Cobre - 300K	0.963	0.219	5.92
Cobre - 77K	0.963	0.496	13.399
Supercondutor - 77K	0.963	0.566	15.3

Nos cenários 3 e 4, foi considerada uma resistência de cabos e conexões reduzida de $R_C = 2,5m\Omega$. Além disso, foi considerado o uso de 2 chaves semicondutoras em paralelo, o que reduz a resistência R_Q à metade. Os ciclos de trabalho foram os mesmos que foram calculados para os cenários 1 e 2. Os resultados da simulação para a eficiência e ganho de tensão dos conversores *boost* analisados para os cenários 3 e 4 estão apresentados na tabela 4.

Tabela 4. Resultados da Simulação (2).

Cenário 3	D	η	G
Cobre - 300K	0.93	0.569	8.122
Cobre - 77K	0.93	0.849	12.136
Supercondutor - 77K	0.93	0.894	12.779
Cenário 4	D	η	G
Cobre - 300K	0.963	0.269	7.273
Cobre - 77K	0.963	0.612	16.541
Supercondutor - 77K	0.963	0.643	17.385

Pode-se perceber que as melhores eficiências e melhores ganhos de tensão são obtidos quando se usa a bobina supercondutora. Sendo que o melhor ganho de tensão é obtido para a bobina supercondutora no cenário 4 e a melhor eficiência é obtida para a bobina supercondutora no cenário 3. Também é mostrado que uma redução das resistências dos cabos e conectores e da resistência das chaves semicondutoras colocando-as em paralelo, aumenta o ganho de tensão e da eficiência em todos os conversores nos cenários 3 e 4.

Após o processo iterativo realizado para o conversor de bobina supercondutora explicado na subseção 3.3 deste trabalho, foi possível obter uma resistência associada as perdas de CA do supercondutor. Dessa forma, foi possível a construção da tabela 5, que apresenta a resistência do indutor para os diversos conversores e cenários aqui analisados.

De acordo com a tabela 5, percebe-se que há um aumento da resistência do indutor supercondutor quando a resistência dos cabos e conexões é diminuída e quando se utiliza duas chaves em paralelo. No cenário 3 para o supercondutor, a resistência é cerca de 3 vezes maior que no cenário 1. Já no cenário 4 para o supercondutor, a resistência é cerca de 30% maior do que no cenário 2.

Tabela 5. Resistência do Indutor.

Conversor e Cenário	R_L (Ω)
Cobre - 300K	0.025561
Cobre - 77K	0.003431
Supercondutor - 77K - Cenário 1	0.00017323
Supercondutor - 77K - Cenário 2	0.0018070
Supercondutor - 77K - Cenário 3	0.00053086
Supercondutor - 77K - Cenário 4	0.0023544

Esse resultado pode ser explicado pelo fato de que nos cenários 3 e 4, há um aumento da oscilação de corrente no indutor quando comparados com os cenários 1 e 2, respectivamente. Um aumento da oscilação da corrente no indutor aumenta as perdas em CA do supercondutor e, por isso, tem-se um aumento da resistência equivalente do supercondutor.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma análise computacional para se obter a eficiência e o ganho de tensão de um conversor *boost* considerando 3 condições de operação diferentes, além de 4 cenários distintos. Para se obter os resultados foram utilizadas a simulação de circuitos e também o MEF.

Percebe-se que a utilização de uma bobina supercondutora é eficiente tanto para se obter um maior ganho de tensão quanto para obter uma melhor eficiência quando comparada com uma bobina de cobre.

Também é avaliado que uma diminuição da resistência dos cabos e conectores e da resistência das chaves semicondutoras ao se utilizar duas chaves em paralelo como uma estratégia para melhorar a eficiência do conversor, atinge o seu objetivo e, de fato, resulta em uma melhora da eficiência conforme pode-se comparar os resultados das tabela 3 e 4. Trabalhos experimentais estão sendo realizados para verificar esse resultado.

No entanto, essa estratégia também aumenta as perdas em CA no supercondutor e, portanto, a sua resistência equivalente em CA, conforme visto na tabela 5. O que pode limitar a melhora da eficiência resultante da estratégia da redução da resistência dos demais componentes do conversor.

Para trabalhos futuros, os autores deixam destacados que pode-se ainda avaliar um ponto de operação ótimo para a bobina supercondutora, uma vez que foram utilizados o ponto de melhor ganho para as bobinas de cobre. Como esse valor depende da resistência do indutor e essa resistência não é um valor facilmente obtido para a bobina supercondutora, este ponto pode ser obtido ao se realizar simulações para diversos ciclos de trabalho até se encontrar um que seja ótimo.

Ainda, pode-se realizar uma simulação de circuitos e pelo MEF onde ambas estejam acopladas para cada passo de tempo simulado. Por fim, é sugerido que seja encontrado um valor ótimo para a resistência dos demais componentes do conversor que melhore a eficiência levando em consideração as perdas em CA do supercondutor.

REFERÊNCIAS

Başoğlu, M.E. and Çakır, B. (2016). Comparisons of mppt performances of isolated and non-isolated dc–dc converters by using a new approach. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 60, 1100–1113.

Carrasco, J.M. (2006). Power-electronic systems for the grid integration of renewable energy sources: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 53, 1002–1016.

Chen, X.Y., Jin, J.X., Tang, M.G., Feng, J., Luo, H.Y., Li, L.Y., Xu, Q., and Zou, H.L. (2016). An efficient boost chopper integrated with cryogenic mosfets and hts inductor. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 26, 1–6.

dos Santos, G., Santos, B.M.O., Sass, F., Martins, F.G.R., Sotelo, G.G., and Junior, R.A. (2023). J-a formulation: A finite element methodology for simulating superconducting devices. *Superconductivity*, 6.

Erickson, R.W. and Maksimovic, D. (2001). *Fundamentals of Power Electronics 2nd ed.* Norwell.

Gallice, N., Santoro, D., Cova, P., Delmonte, N., Lazzaroni, M., Sala, P., and Zani, A. (2022). Development of a cryogenic dc-dc boost converter: devices characterization and first prototype measurements. *2022 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference (I2MTC)*, 1–6.

Garcia, D.F., Sotelo, G.G., Ferreira, A.C., and Sass, F. (2024). Application of 2g coil to increase the voltage gain of boost converters. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 34, 1–5.

Grilli, F., Pardo, E., Senvall, A., Nguyen, D.N., Yuan, W., and Gömöry, F. (2014). Computation of losses in hts under the action of varying magnetic fields and currents. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 24, 78–110.

I. Azeem, M.M.A.B. and Uddin, M.H. (2018). A strategy to evaluate mppt techniques. *Asian Conference on Energy, Power and Transportation Electrification (ACEPT)*, 1–4.

Shen, B. (2019). Investigation on power dissipation in the saturated iron-core superconducting fault current limiter. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 29, 1–5.

Shen, B., Grilli, F., and Coombs, T. (2020). Overview of h-formulation: A versatile tool for modeling electromagnetics in high-temperature superconductor applications. *IEEE Access*, 8, 100403–100414.

Sugita, S. and Ohsaki, H. (2023). Fem analysis of current limiting characteristics of a superconducting thin film current limiting device by the current vector potential method. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 13, 2020–2023.

T. Yang, W.L. and Xin, Y. (2024). Comparative study of current carrying capacity between 1g and 2g hts tape samples at different temperatures and magnetic fields. *Physica Scripta*, 99.

Wang, S., Yong, H., and Zhou, Y. (2023). Numerical calculations of high temperature superconductors with the j-a formulation. *Superconductor Science and Technology*, 36.

Zhang, H., Zhang, M., , and Yuan, W. (2016). An efficient 3d finite element method model based on the t–a formulation for superconducting coated conductors. *Superconductor Science and Technology*, 30.