



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

Thaís Luana Vidal de Negreiros da Silva

Raimundo Carlos Silvério Freire
Benedito Antonio Luciano
Orientadores

Campina Grande – PB
Outubro – 2016



Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Engenharia Elétrica e Informática
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL PARA RECUPERAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA

Thaís Luana Vidal de Negreiros da Silva

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Processamento da Informação

Raimundo Carlos Silvério Freire
Benedito Antonio Luciano
Orientadores

Campina Grande – PB
Outubro – 2016

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S586t Silva, Thaís Luana Vidal de Negreiros.
Transformador de corrente com núcleo toroidal para recuperação de energia eletromagnética / Tiago Marques Sampaio. – Campina Grande, 2016.
49 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Engenharia Elétrica e Informática, 2016.
"Orientação: Prof. Dr. Raimundo Carlos Silvério Freire, Prof. Dr. Benedito Antonio Luciano".

Referências.

1. Transformador de Corrente. 2. Recuperação de Energia. 3. Núcleo Toroidal. I. Freire, Raimundo Carlos Silvério. II. Luciano, Benedito Antonio. III. Título.

CDU 621.314(043)

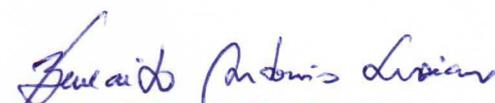
**"TRANSFORMADOR DE CORRENTE COM NÚCLEO TOROIDAL PARA
RECUPERAÇÃO DE ENERGIA ELETROMAGNÉTICA"**

THAÍS LUANA VIDAL DE NEGREIROS SILVA

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 17/10/2016



**RAIMUNDO CARLOS SILVÉRIO FREIRE, Dr., UFCG
Orientador(a)**



**BENEDITO ANTONIO LUCIANO, D.Sc., UFCG
Orientador(a)**



**GLAUCO FONTGALLAND, Dr., UFCG
Examinador(a)**



**EDMAR CANDEIA GURJAO, D.Sc., UFCG
Examinador(a)**

CAMPINA GRANDE - PB

Dedico este trabalho a Iara, Jane, Raylla, Netinho, Túlio, Cybelle, Arthur, Célia, Sérgio, André, Freire e Benedito. A vocês, família e amigos, pelo apoio e compreensão de sempre.

Agradecimentos

Agradeço à CAPES, pela concessão da minha bolsa de mestrado, sem a qual dificilmente eu teria descoberto a minha vocação pela carreira acadêmica.

Sou extremamente grata a Raimundo Carlos Silvério Freire e Benedito Antonio Luciano por me permitirem discordar e argumentar, aprender e apreender, crescer pessoal e profissionalmente.

Agradeço aos membros da banca, composta pelos professores Edmar Candeia Gurjão e Glauco Fontgalland, pela atenção empregada na revisão do trabalho, assim como pelas sugestões propostas.

Um agradecimento especial a David Meeker por ter disponibilizado gratuitamente a ferramenta computacional para cálculo de campos FEMM, assim como tutoriais e exemplos, que me permitiram avançar rapidamente nas simulações que realizei.

Agradeço também ao recurso humano empregado para o bom andamento do Programa da Pós Graduação do Departamento de Engenharia Elétrica da UFCG, que inclui Ângela, Pedro, Felipe e Edson Guedes, que sempre me guiaram na resolução das questões administrativas e burocráticas do programa.

Resumo

Neste trabalho são apresentados estudos analíticos e simulações computacionais sobre transformadores de corrente (TC) com núcleo toroidal de material magneticamente mole como recuperadores de energia eletromagnética. A fundamentação teórica parte das leis fundamentais do eletromagnetismo derivadas das equações de Maxwell. Na obtenção dos circuitos magnéticos equivalentes foram levados em conta as forças magnetomotrizes, relutâncias e os fluxos magnéticos. Como estudo de caso, foi utilizada uma simulação computacional baseada no método dos elementos finitos para a obtenção da distribuição de indução magnética dentro do núcleo toroidal. Tal como previsto pelas expressões analíticas, verificou-se que a indução magnética distribui-se de maneira não uniforme na direção radial do núcleo. Partindo dos circuitos magnéticos, circuitos elétricos equivalentes foram deduzidos, nos quais foram representadas as resistências e as reatâncias. Simulou-se o comportamento do TC como recuperador de energia e verificou-se que o rendimento do sistema de recuperação depende do material do núcleo, da carga acoplada ao secundário do TC, do coeficiente de acoplamento entre primário e secundário e da existência ou não de entreferro no núcleo magnético.

Palavras-chave: Transformador de Corrente, Recuperação de Energia, Núcleo toroidal.

Abstract

In this work an analytic and computational analysis of current transformers (CT) with soft magnetic material toroidal core used as energy harvester is presented. The theoretical approach is based on the fundamental laws of electromagnetism presented in Maxwell's equations. Magnetomotive forces, reluctance and magnetic flux were taken into account in order to obtain equivalent magnetic circuits. Using a 2D simulation tool based on finite element method, computational simulations were performed in order to obtain the distribution of magnetic induction in radial direction of the toroidal core. As predicted by the analytical expressions, the magnetic induction is distributed non-uniformly in the radial direction of the core. Based on the magnetic circuits, equivalent electrical circuits were deduced, in which the resistance and reactance were represented. Based on computational simulations, it was possible to conclude that the efficiency of the TC as energy harvester varies according to the core material, to the load at its secondary terminal, to the coupling coefficient between primary and secondary and to the existence of air gap in the magnetic core.

Keywords: Current transformer, Energy harvesting, Toroidal core.

Lista de símbolos

a	Espessura do núcleo magnético toroidal
A	Potencial vetor magnético
A_{ar}	Área da seção transversal na região do entreferro
A_{geom}	Área geométrica do núcleo magnético
A_{mag}	Área magnética do núcleo magnético
B	Intensidade de indução magnética
\mathbf{B}	Vetor indução magnética
B_{ar}	Intensidade de indução magnética no entreferro
B_s	Indução de saturação
B_1	Indução magnética devido à força magnetomotriz do primário
β	Ângulo que corresponde ao erro de fase no TC
d	Distância entre o raio externo do núcleo toroidal e um ponto P
e	Comprimento do entreferro
E	Intensidade de campo elétrico
\mathbf{E}	Vetor campo elétrico
ε_0	Permissividade elétrica do ar
\mathcal{F}_1	Força magnetomotriz
\mathcal{F}_2	Força contramagnetomotriz
ϕ	Fluxo magnético
ϕ_1	Fluxo magnético devido à força magnetomotriz
ϕ_2	Fluxo magnético devido à força contramagnetomotriz
h	Altura do núcleo magnético toroidal
H	Intensidade de campo magnético
\mathbf{H}	Vetor campo magnético
H_c	Força coerciva
i_1	Representação temporal da corrente elétrica no primário
i_2	Representação temporal da corrente elétrica no secundário
I_L	Corrente de linha
I_0	Corrente elétrica eficaz de magnetização
I_1	Corrente elétrica eficaz no primário
\hat{I}_1	Fasor da corrente elétrica no primário
I_2	Corrente elétrica eficaz no secundário
\hat{I}_2	Fasor da corrente elétrica no secundário
I_2'	Corrente elétrica eficaz no secundário refletida ao primário
\hat{I}_2'	Fasor da corrente elétrica no secundário refletida ao primário
J	Densidade de corrente elétrica
\mathbf{J}	Vetor densidade de corrente elétrica
k	Fator de correção referente à distribuição da tensão induzida nas lâminas do núcleo magnético
k_e	Fator de empilhamento do núcleo magnético laminado
k_{12}	Fator de acoplamento entre primário e secundário
l	Comprimento médio do caminho magnético no interior do toroidal
l_e	Comprimento médio efetivo do caminho magnético toroidal
L_1	Indutância do enrolamento primário
L_2	Indutância do enrolamento secundário
λ	Fluxo magnético concatenado
λ_1	Fluxo magnético concatenado devido à força magnetomotriz do primário

λ_{op}	Fluxo magnético concatenado referente ao ponto de operação escolhido na curva $\lambda \times i$
μ	Permeabilidade magnética
$ \mu $	Tensor permeabilidade magnética
μ_0	Permeabilidade magnética do ar
μ_r	Permeabilidade magnética relativa
μ_x	Permeabilidade magnética na direção x
μ_y	Permeabilidade magnética na direção y
μ_z	Permeabilidade magnética na direção z
n	Número de laminas do núcleo magnético
N_1	Número de enrolamentos no primário
N_2	Número de enrolamentos no secundário
η	Rendimento
∇	Operador nabla
p_{nucleo}	Potência ativa dissipada em cada lâmina do núcleo magnético
P_2	Potência elétrica dissipada no condutor do enrolamento secundário
r_1	Raio do condutor do primário
r_2	Raio do condutor do secundário
\mathcal{R}	Relutância do núcleo magnético
R	Resistência da trajetória de corrente elétrica parasita em cada lâmina do núcleo magnético toroidal
R'	Raio médio do núcleo magnético toroidal
\mathcal{R}_{ar}	Relutância do ar
R_m	Resistência elétrica do núcleo
R_p	Resistência do enrolamento primário
R_s	Resistência do enrolamento secundário refletida ao primário
R_1	Raio interno do núcleo magnético toroidal
R_{11}	Resistência do primário no circuito elétrico equivalente do TC
R_2	Raio externo do núcleo magnético toroidal
\mathcal{R}_{d1}	Relutância de dispersão do primário
\mathcal{R}_{d2}	Relutância de dispersão do secundário
R_{Th}	Resistência de Thevenin
S	Potência aparente
ρ	Resistividade elétrica do condutor do enrolamento secundário
σ	Condutividade elétrica
t	Tempo
υ	Relutividade
v	Tensão elétrica induzida nos terminais do enrolamento do secundário
v_{ind}	Tensão induzida ao longo da trajetória de corrente induzida em uma lâmina do núcleo magnético
V_L	Tensão de linha
V_1	Tensão elétrica no primário
Vol_{nucleo}	Volume do núcleo magnético
W	Energia no entreferro
W_1	Energia magnética no primário do TC
$W_{1_máx}$	Energia magnética máxima no primário do TC, considerando o TC sem entreferro
W_2	Energia magnética no secundário do TC
$W_{2_máx}$	Energia magnética máxima no primário do TC, considerando o TC sem

	entreferro
X_m	Reatância de magnetização do núcleo
X_p	Reatância de dispersão do primário
X_s	Reatância de dispersão do secundário refletida ao primário
X_{Th}	Reatância de Thevénin
X_{11}	Reatância do primário do TC no circuito elétrico equivalente
X_2	Reatância do secundário do TC no circuito elétrico equivalente
X_2'	Reatância do secundário refletida ao primário do TC no circuito elétrico equivalente
Z_c	Impedância da carga acoplada ao secundário do TC
Z_c	Impedância da carga acoplada ao secundário refletida ao primário do TC
Z_{Th}	Impedância de Thevénin

Lista de figuras

Fig. 1: Representação de um sistema de recuperação de energia [Fonte: adaptado de [1]].....	1
Fig. 2: Exemplo de um sistema de distribuição de energia [Fonte: elaboração própria]..	2
Fig. 3: Diagrama de blocos simplificado de uma <i>rectenna</i> [Fonte: elaboração própria]..	4
Fig. 4: Solenoide utilizado em [44] [Fonte: adaptado de [44]].	5
Fig. 5: Núcleo magnético toroidal com entreferro [Fonte: elaboração própria].	7
Fig. 6: Permeabilidade magnética e indução de saturação entre materiais magneticamente moles [Fonte: adaptado de [64]].....	8
Fig. 7: Diagrama fasorial representando as componentes do primário, secundário e de magnetização [Fonte: adaptado de [70]].	11
Fig. 8: Relação entre as correntes primária e de excitação [Fonte: adaptado de [70]]. ..	11
Fig. 9: Transformador de corrente (TC), em que i_1 é a corrente elétrica do primário e i_2 é a do secundário [Fonte: elaboração própria].	14
Fig. 10: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica, conforme mostrado na Fig. 9 [Fonte: elaboração própria].	16
Fig. 11: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica, conforme mostrado na Fig. 5 [Fonte: elaboração própria].	16
Fig. 12: Núcleo magnético toroidal sem entreferro [Fonte: elaboração própria].	18
Fig. 13: Circuito elétrico equivalente ao sistema eletromagnético do sensor de corrente representado na Fig. 9 [Fonte: elaboração própria].	22
Fig. 14: Comprimento de condutor em cada espira [Fonte: elaboração própria].	23
Fig. 15: Representação do entreferro criado devido à rugosidade do corte das faces do núcleo magnético [Fonte: elaboração própria].	26
Fig. 16: (a) Vista superior do núcleo toroidal, com destaque para a região em que ocorre dispersão (em azul). (b) Vista da seção transversal do núcleo toroidal, com destaque para a região em que ocorre dispersão (em azul).	27
Fig. 17: Estrutura laminada do núcleo magnético submetido a uma indução magnética B e composto por n lâminas [Fonte: elaboração própria].	28
Fig. 18: Dimensões do toroide simulado no FEMM [Fonte: elaboração própria].	32

Fig. 19: Curva de magnetização inicial da liga FINEMET excitada a 5 Hz [Fonte: [9]].	34
Fig. 20: Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$ do núcleo toroidal.	35
Fig. 21: Distribuição do módulo da indução magnética na direção radial do domínio de estudo: (a) I - interior do condutor primário; II - Região com ar entre o primário e o secundário; III - Núcleo magnético; IV - Região externa do TC composta por ar.....	35
Fig. 22: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga considerando materiais magnéticos diferentes.	37
Fig. 23: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga para valores diferentes do capacitor acoplado em paralelo com a carga, considerando um material magnético $\mu_r = 150.000$	39
Fig. 24: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função do coeficiente de acoplamento considerando o secundário sem carga ($R_2 = 0 \Omega$) e um material magnético com $\mu_r = 150.000$	39
Fig. 25: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga acoplada ao secundário do TC e núcleo composto por material magnético com $\mu_r = 150.000$ para coeficiente de acoplamento de 0,9 e 1,0.	40
Fig. 26: Rendimento em função do comprimento do entreferro (e) considerando o secundário sem carga ($R_2 = 0 \Omega$) e um material magnético com $\mu_r = 150.000$	41

Sumário

1	Introdução.....	1
1.1	Objetivos.....	2
1.1.1	Objetivo geral.....	2
1.1.2	Objetivos específicos.....	3
1.2	Contribuições.....	3
1.3	Estrutura do texto.....	3
2	Revisão Bibliográfica.....	4
2.1	Recuperação de energia eletromagnética.....	4
2.2	Materiais magneticamente moles.....	8
3	Fundamentação Teórica.....	10
3.1	Características gerais do Transformador de Corrente (TC).....	10
3.2	Modelo do TC com núcleo toroidal.....	12
3.2.1	Circuitos magnéticos equivalentes.....	15
3.2.2	Circuito elétrico equivalente.....	21
3.2.3	Consequências da inserção de entreferro no núcleo toroidal de um TC.....	24
3.3	Limitações do modelo apresentado.....	26
3.3.1	Relutâncias de dispersão.....	26
3.3.2	Fator de acoplamento.....	27
3.3.3	Perdas por corrente parasita.....	28
4	Metodologia.....	31
4.1	Distribuição do fluxo magnético no interior do núcleo.....	31
4.2	Energia recuperada no secundário do TC.....	33
5	Resultados e discussões.....	34
5.1	Simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos (MEF)..	34
5.2	Energia no secundário do TC.....	36
5.2.1	Características do sistema simulado.....	41
5.3	Energia recuperada para diferentes transformadores de distribuição de energia elétrica.....	41

6 Considerações finais 43

Referências 45

1 Introdução

Em um sistema de recuperação de energia (usualmente chamado em inglês de *power harvesting system* ou *energy harvesting system*), a energia recuperada pode ser utilizada para aumentar a autonomia energética de sistemas. O conceito de recuperação de energia está associado ao processo no qual se converte determinada forma de energia disponível no ambiente, como luminosa ou eletromagnética, por exemplo, em energia elétrica.

Sistemas recuperadores de energia devem ser capazes de recuperar, armazenar e gerenciar a energia convertida de modo a fornecê-la a uma carga. Assim, um dos componentes dos sistemas recuperadores é o dispositivo recuperador de energia. O esquema de um sistema de recuperação de energia é mostrado na Fig. 1. A energia convertida (ou recuperada) deve ser condicionada e armazenada para uso posterior.

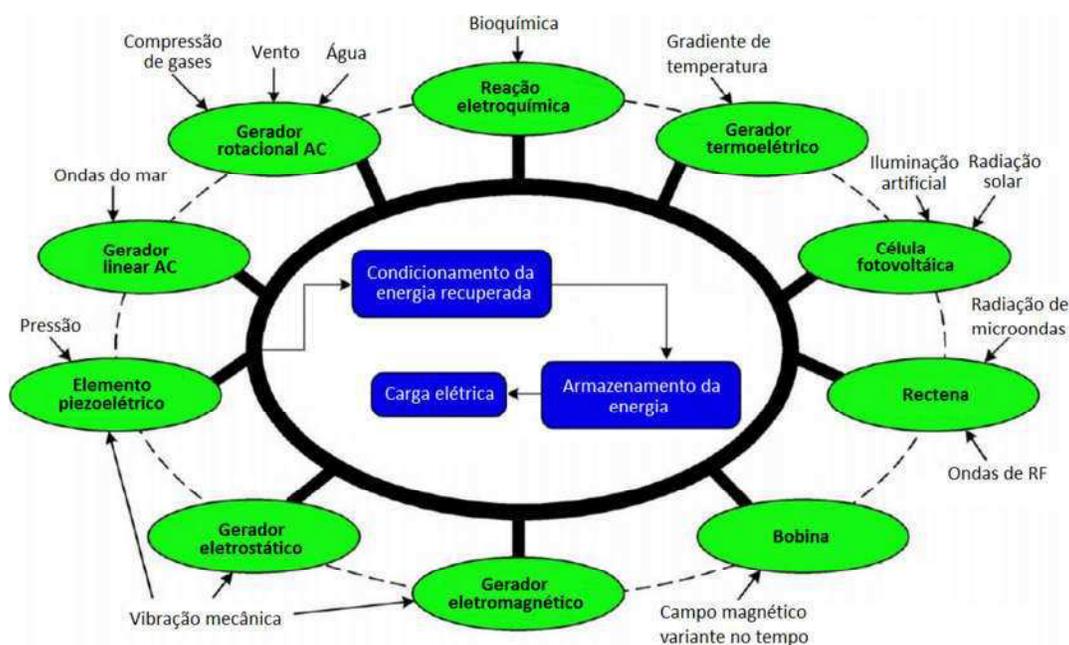


Fig. 1: Representação de um sistema de recuperação de energia [Fonte: adaptado de [1]].

Em um sistema de distribuição de energia, por exemplo, verifica-se a existência de fluxo magnético disperso no ar devido à circulação da corrente elétrica no condutor, como mostrado na Fig. 2. Nesse caso, é possível acoplar a essa linha um dispositivo que permita a conversão da energia magnética proveniente do fluxo magnético de dispersão

em energia elétrica. Para tanto, pode-se utilizar um transformador de corrente elétrica (TC) com núcleo magnético como elemento recuperador de energia.

Em termos práticos, verifica-se a dificuldade de instalar um recuperador de energia com núcleo magnético toroidal em uma linha energizada. Para instalá-lo, seria necessário desenergizar a linha, o que pode tornar o dispositivo com núcleo toroidal inconveniente. Uma maneira de superar essa dificuldade é utilizar um núcleo toroidal composto por partes móveis. Dessa forma, torna-se possível a instalação do elemento recuperador sem a necessidade de desenergizar a linha. O uso desse núcleo composto por partes móveis, entretanto, acarreta na criação de um entreferro na junção entre as partes móveis.

Nesse contexto, neste trabalho, objetivou-se o estudo analítico e computacional de recuperadores de energia eletromagnética com núcleo magnético toroidal sem e com entreferro.

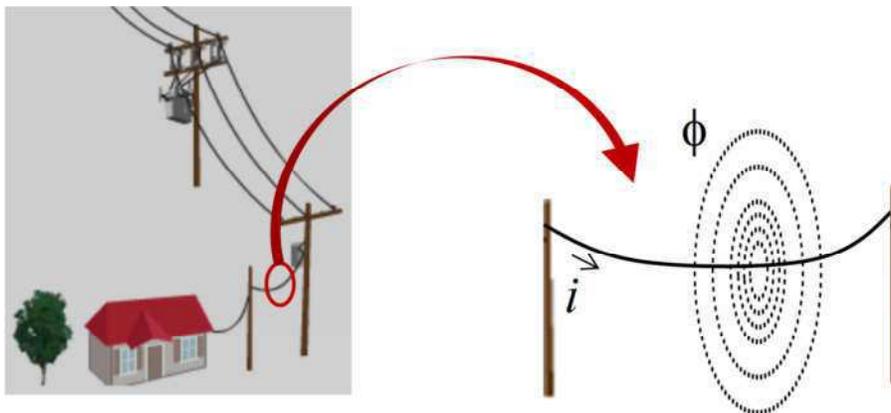


Fig. 2: Exemplo de um sistema de distribuição de energia [Fonte: elaboração própria].

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é a modelagem de um TC com núcleo toroidal sem e com entreferro, assim como a identificação de parâmetros que influenciam a quantidade de energia recuperada, quando o TC é utilizado como elemento recuperador de energia.

1.1.2 Objetivos específicos

- Modelar o TC com um núcleo toroidal sem e com entreferro em termos da energia recuperada no secundário do TC;
- Comparar o desempenho do TC como recuperador de energia em função de parâmetros que influenciam a energia recuperada no secundário do TC, tais como existência ou não de entreferro no núcleo, características do material magnético do núcleo, carga acoplada ao secundário do TC.

1.2 Contribuições

As principais contribuições deste trabalho são:

- Determinação do estado da arte sobre recuperação de energia eletromagnética;
- Modelagem analítica do TC sem e com entreferro;
- Determinação da distribuição da indução magnética no interior do núcleo magnético;
- Determinação da influência das características do núcleo magnético (material, existência ou não de entreferro) e da carga acoplada ao secundário do TC na energia recuperada.

1.3 Estrutura do texto

Esta dissertação está estruturada da seguinte maneira: no capítulo 2 é apresentada uma revisão bibliográfica sobre recuperação de energia eletromagnética e materiais magneticamente moles; no capítulo 3 apresenta-se a fundamentação teórica acerca da modelagem do TC com núcleo sem e com entreferro; a metodologia do trabalho é apresentada no capítulo 4; no capítulo 5 são apresentados resultados e discussões; por fim, nos capítulos 6 e 7 são apresentadas, respectivamente, as considerações finais e as referências utilizadas.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Recuperação de energia eletromagnética

Nos dias atuais, verifica-se a preocupação de tornar circuitos e sistemas energeticamente autônomos. Para tanto, um dos desafios é o projeto de circuitos de baixíssimo consumo, o qual vem sendo superado por meio dos avanços das tecnologias em microeletrônica.

Outro desafio diz respeito ao aumento da vida útil das baterias em circuitos de acesso remoto, por exemplo. Para tanto, pode-se fazer uso de elementos recuperadores de energia. Esses dispositivos são capazes de converter um tipo de energia disponível no ambiente para a forma elétrica. A energia elétrica produto da conversão pode ser utilizada para alimentar circuitos eletrônicos de iluminação predial [2] e redes de sensores sem fio (RSSF) [3], por exemplo.

Existem diversos trabalhos no contexto de recuperação de energia nas formas térmica [4]–[16], eólica [17]–[28], mecânica [9][14][29]–[39], luminosa [7][28][40]–[42] e eletromagnética [30][43]–[62]. Cada uma dessas fontes de energia apresenta desafios específicos a serem superados no contexto de recuperação de energia.

Especificamente em termos da energia eletromagnética, foco maior desta dissertação, ela pode ser recuperada por meio do acoplamento magnético em solenoides [43][44] ou transformadores [30][46]–[52][61][62], para aplicações em baixa frequência. No caso de aplicações em radiofrequência, pode-se utilizar *rectennas* [53]–[60], cujo diagrama de blocos simplificado é mostrado na Fig. 3. As *rectennas* são usualmente compostas por uma antena, filtros e um circuito de retificação.



Fig. 3: Diagrama de blocos simplificado de uma *rectenna* [Fonte: elaboração própria].

Ao se avaliar sistemas em radiofrequência, o casamento de impedâncias deve ser levado em consideração. Nos casos em que transformadores são utilizados, é importante

a garantia do acoplamento magnético sem prejudicar o sistema já existente. Nesta dissertação, trabalha-se com a recuperação de energia eletromagnética na frequência de 60 Hz.

Quando a recuperação de energia é feita utilizando transformadores, verifica-se em muitos trabalhos o uso de transformadores de corrente (TC) com núcleo toroidal [30][44][47]–[50][61][62], nos quais o TC é acoplado de maneira a envolver o condutor pelo qual circula a corrente elétrica que gera o campo magnético.

A geometria toroidal favorece a concatenação das linhas de fluxo magnético de maneira mais eficiente quando comparado ao transformador em formato de “E”, por exemplo. Isso ocorre porque as linhas de fluxo magnético são circulares em torno do condutor primário, tal como previsto pela Lei de Ampère, assim como o núcleo toroidal. Por esse motivo, este trabalho de dissertação é dedicado ao estudo das estruturas toroidais na recuperação de energia eletromagnética.

Uma desvantagem de recuperadores de energia com núcleo toroidal é a dificuldade de instalação em sistemas existentes e já energizados. No caso de uma linha de distribuição de energia, por exemplo, a instalação desse tipo de elemento requer a desenergização do sistema, o que pode não ser viável.

Uma das alternativas ao uso de recuperadores de energia eletromagnética na forma de TC são os solenoides [43][44]. Nesse caso, o elemento sensor com núcleo magnético cilíndrico é colocado nas proximidades do condutor pelo qual circula uma corrente elétrica, como mostrado na Fig. 4. Assim, não se faz necessária a desenergização do sistema.

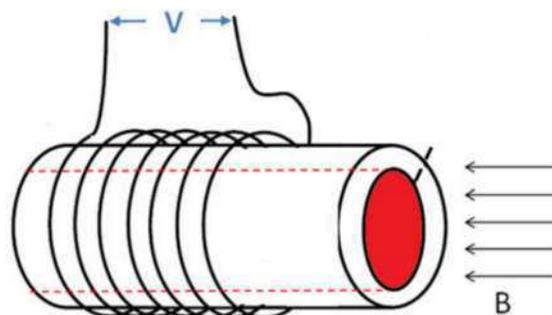


Fig. 4: Solenoide utilizado em [44] [Fonte: adaptado de [44]].

No caso das estruturas solenoidais, pelo fato de o elemento sensor ser disposto nas proximidades do condutor, verifica-se dispersão magnética elevada. Assim, fazem-

se necessários solenoides com comprimento e número de espiras elevados (algumas dezenas de milhares de enrolamentos [43]) a fim de se obter maior concatenação do fluxo em seu interior. Por isso, esse tipo de elemento é pesado, caro e não portátil.

Uma estrutura solenoidal modificada no formato de gravata borboleta para recuperação de energia é apresentado por [44]. Com esse tipo de estrutura, é possível obter recuperadores com dimensões menores do que aqueles que utilizam o solenoide convencional. Apesar disso, verifica-se que a energia recuperada com esse tipo de recuperador é menor do que aquela que utiliza núcleos toroidais.

Na Tab. 1 é apresentado um resumo das características dos recuperadores de energia eletromagnética com estruturas solenoidais e toroidais em termos de material constituinte do núcleo e potência recuperada por unidade de volume.

Tab. 1: Características dos principais recuperadores de energia eletromagnética com estruturas solenoidais e toroidais

	Material do núcleo	Potência recuperada por unidade de volume	Estrutura	Observações
[43]	Ferrita	1 800 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Solenoidal	Grande (0,5 m de comprimento e 40 000 enrolamentos)
[44]	Ferrita Mn-Zn	1,86 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Solenoidal	Grande (0,4 m de comprimento e 40 000 enrolamentos)
[48]	Ferrita	1 978 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Toroidal	Pequeno (3,6 cm de diâmetro e 0,5 cm de altura)
	Liga nanocristalina	7 828 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Toroidal	Pequeno (3,6 cm de diâmetro e 0,5 cm de altura)
[50]	Não informado	1 890 $\mu\text{W}/\text{cm}^3$	Toroidal	Foco: circuito de condicionamento da energia

Outra maneira de superar a limitação inerente à instalação do núcleo toroidal em sistemas já existentes e energizados é utilizar um núcleo com partes móveis, como mostrado na Fig. 5. Esse tipo de artifício é normalmente utilizado na medição de corrente com medidores do tipo “alicate”.

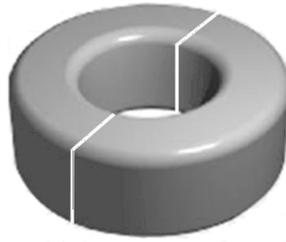


Fig. 5: Núcleo magnético toroidal com entreferro [Fonte: elaboração própria].

O uso desse núcleo com partes móveis possibilita a instalação sem a necessidade de desenergizar a linha aproveitando as vantagens de maior concatenação do fluxo magnético e, conseqüentemente, maior eficiência. A modelagem desse tipo de estrutura já vem sendo estudada há alguns anos [61]–[63].

A introdução de entreferros para tornar o núcleo magnético composto por partes móveis provoca um aumento na relutância do núcleo, dificultando a concatenação do fluxo magnético no entorno do conduto do primário. Por outro lado, verifica-se um aumento na linearidade das curvas de magnetização e histerese quando da inserção entreferros no núcleo.

A influência da inserção de entreferros nas junções entre as partes móveis do núcleo toroidal para recuperação de energia é um dos objetivos deste estudo, uma vez que essa análise não foi encontrada na bibliografia especializada consultada. Além disso, nos modelos propostos em alguns trabalhos, não são consideradas as reatâncias de magnetização [52], as resistências dos enrolamentos [49], nem as reatâncias de dispersão [30][49][52].

A fim de obter núcleos pequenos e de eficiência elevada, é importante que o material constituinte seja magneticamente mole, isto é, que apresente magnetização residual baixa. Outra característica desejável é possuir permeabilidade magnética elevada, para que pequenas variações de corrente no primário resultem grandes variações na saída. Além disso, pode-se acrescentar baixa força coerciva e resistividade elétrica elevadas como características adicionais do núcleo, a fim de reduzir as perdas por histerese e devido às correntes parasitas.

2.2 Materiais magneticamente moles

No contexto dos recuperadores de energia com núcleos toroidais, a permeabilidade magnética do material constituinte do núcleo, μ , é um parâmetro fundamental para o bom funcionamento do sistema. Para esse tipo de aplicação, deseja-se μ bastante elevado, visto que esta característica facilita o estabelecimento de uma tensão induzida, fruto da variação do fluxo magnético. Outras características desejadas são baixa força coerciva (H_c) e baixa perdas ativas (W/kg).

Dentre os materiais magneticamente moles, destacam-se as ligas nanocristalinas, as ligas amorfas, as ferrites moles e as ligas de aço silício. Os valores típicos de indução de saturação (B_s) e de permeabilidade magnética relativa (μ_e) desses materiais são apresentados na Fig. 6.

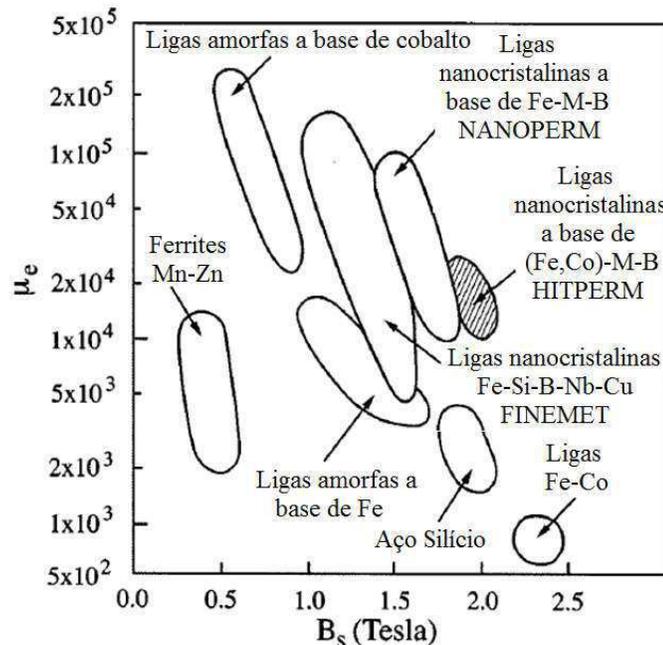


Fig. 6: Permeabilidade magnética e indução de saturação entre materiais magneticamente moles [Fonte: adaptado de [64]].

Dentre os materiais citados na Fig. 6, as ferritas Mn-Zn se destacam por apresentar os mais baixos valores de indução de saturação (B_s). Por serem materiais cerâmicos, apresentam alta resistividade, e por isso, são bastante empregados nas aplicações que operam na faixa dos kHz [65]. Já as ferritas Ni-Zn operam bem na faixa dos MHz.

As ligas amorfas à base de ferro possuem valores de B_s entre 0,9 e 1,7 T, além de serem bem aplicadas na faixa de frequências compreendida entre 50 Hz e 10 kHz. Já as ligas amorfas cuja base é o cobalto, B_s fica situado entre 0,5 e 0,8 T, podendo ser utilizado em sinais de 50 kHz a 200 kHz [65].

Os valores mais elevados de indução de saturação são encontrados nas ligas de Fe-Co. Estas ligas, porém, também possuem os menores valores de permeabilidade magnética.

Em frequências de até 100 kHz, destaca-se a liga nanocristalina $\text{Fe}_{76,9}\text{Cu}_{0,6}\text{Nb}_{2,5}\text{Si}_{11}\text{B}_9$ (FINEMET), que possui baixas perdas, magnetostricção desprezível e alto B_s , embora este ainda seja menor do que os valores obtidos com as ligas amorfas à base de ferro (nas baixas frequências). Entretanto, já foram desenvolvidas ligas nanocristalinas com indução de saturação magnética B_s superiores a 1,8 T, como a HITPERM[®] ($\text{Fe}_{44}\text{Co}_{44}\text{Zr}_7\text{B}_4\text{Cu}_1$) [66].

Como mostrado na Fig. 6, as ligas amorfas e as ligas nanocristalinas possuem as mais altas permeabilidades magnéticas (característica principal desejada para um sistema de recuperação de energia eletromagnética), bem como baixíssimas perdas por histerese. Por esses motivos, esses materiais têm sido empregados em núcleos toroidais utilizados em transformadores de corrente [67][68] e em diversas aplicações eletroeletrônicas, particularmente no contexto das redes inteligentes [69].

Em termos específicos de aplicações em recuperação de energia, as ligas nanocristalinas têm sido utilizadas como material constituinte de núcleos magnéticos de vários elementos recuperadores de energia eletromagnética [44][48][52]. Além disso, verificou-se que as ligas nanocristalinas apresentam melhor desempenho como material magnético constituinte de recuperador de energia com núcleo toroidal quando comparadas ao pó de ferro e ferritas [48]. Isso se deve ao fato delas apresentarem permeabilidade magnética elevada, sendo possível projetar recuperadores menores e mais eficientes.

3 Fundamentação Teórica

3.1 Características gerais do Transformador de Corrente (TC)

Transformadores de Corrente (TC) são usualmente empregados em sistemas elétricos de medição, controle e proteção.

O TC é composto por dois enrolamentos, chamados de primário, por onde a corrente que se deseja medir circula; e secundário, pelo qual circula uma corrente elétrica que está relacionada àquela do primário pela relação de espiras entre primário e secundário [70]. Ajustando adequadamente a relação de espiras, é possível obter no secundário uma corrente de amplitude menor do que a do primário, que normalmente se deseja medir. Dessa forma, medindo-se a corrente no secundário, e conhecendo a relação de espiras, pode-se determinar a corrente no primário.

Assim como ocorre na medição de grandeza com todos os sensores, existe um erro associado à medição de corrente elétrica utilizando o TC. Mais especificamente, esse erro pode ser referente à relação de transformação (erro de relação), à fase entre as correntes do primário e do secundário (erro de fase) ou à amostragem da corrente (erro de amostragem).

O erro de relação está associado à diferença entre as relações de transformação nominal e real do TC. A relação nominal diz respeito à relação entre as correntes primária e secundária para a qual o equipamento foi projetado. Já a relação real é referente à relação entre as correntes primária e secundária que se obtém realizando medidas em laboratório. A diferença entre relações nominal e real se deve à reatância de dispersão e à influência da não linearidade do material ferromagnético de que é constituído o núcleo magnético.

Em um TC ideal, a fase entre as correntes do primário e do secundário é exatamente 180° . Entretanto, em um TC real, esse ângulo não é 180° . Na Fig. 7, o ângulo β corresponde ao desvio pelo qual essas correntes deixam de estar defasadas de 180° entre si e é conhecido como ângulo de fase do TC. A existência desse ângulo acarreta em um erro associado à medição da corrente no secundário, que é conhecido como erro de fase. O erro de fase é influenciado pelo tipo de material magnético empregado na confecção do núcleo.

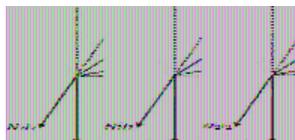


Fig. 7: Diagrama fasorial representando as componentes do primário, secundário e de magnetização [Fonte: adaptado de [70]].

Uma característica importante é quanto à relação entre a corrente que circula no primário do TC e a corrente nominal. Quanto menor a corrente no primário em relação à corrente nominal, maior é a razão entre a corrente de magnetização e a corrente do primário [70], como pode ser observado na Fig. 8. Como consequência, tem-se um aumento nos erros de relação e de fase.

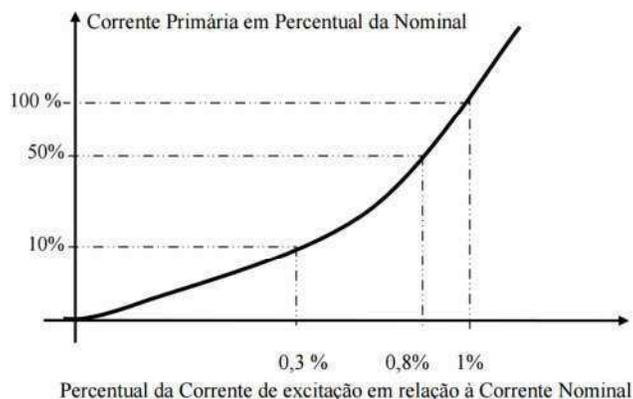


Fig. 8: Relação entre as correntes primária e de excitação [Fonte: adaptado de [70]].

Os erros de relação e de ângulo de fase devem ser levados em consideração quando se deseja determinar a classe de exatidão do TC. O erro de relação é o único que importa no caso do TC ser empregado para medições de corrente, sem fins de faturamento. Caso o TC seja empregado para medições de potência e energia, na qual o ângulo de fase é importante, a correção do ângulo de fase deverá ser feita se o desvio do ângulo tiver um efeito apreciável nas referidas medidas.

Os TC para medição são utilizados na medição de correntes ou energia em alta tensão e são caracterizados pela sua alta exatidão (classes: 0,3, 0,6 e 1,2) e baixa corrente de saturação (4 vezes a corrente nominal). Já os TC para proteção são utilizados para proteção de circuitos de alta tensão, são caracterizados pela baixa exatidão (classes: 2,5, 5 e 10) e elevada corrente de saturação (da ordem de 10 a 20 vezes a corrente nominal).

A minimização do erro de relação e de fase de um TC consiste na redução do valor da corrente de excitação. Um dos métodos utilizados para diminuir a corrente de excitação é manter a densidade de fluxo pequena, o que pode ser obtido pelo emprego de um núcleo de grande seção reta, ou com um grande número de espiras, ou por uma combinação dos dois [71]. Outro método utilizado é utilizar um núcleo magnético com alta permeabilidade magnética.

3.2 Modelo do TC com núcleo toroidal

A fundamentação teórica das aplicações eletromagnéticas passa por duas leis fundamentais (1) e (2), presentes nas equações de Maxwell.

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Ampère}) \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (\text{Lei de Faraday/Lenz}) \quad (2)$$

Nas expressões (1) e (2), \mathbf{E} representa o vetor campo elétrico; \mathbf{B} representa o vetor indução magnética (densidade de fluxo magnético); t é a variável tempo; \mathbf{J} é o vetor densidade de corrente elétrica; μ_0 é a permeabilidade magnética do ar e ϵ_0 é a permissividade elétrica do ar. Nessas expressões, todas as grandezas vetoriais apresentadas são variantes no tempo.

Em regime quase estático, isto é, quando o campo elétrico praticamente não varia no tempo, tem-se uma simplificação da Lei de Ampère, representada por (3). Nesse caso, considera-se o sistema em regime quase estático. Considerando o meio isotrópico, tem-se a relação constitutiva (4). Sendo o campo magnético \mathbf{H} originado pela corrente elétrica, pode-se reescrever a Lei de Ampère, obtendo-se a expressão (5).

A indução magnética pode ser determinada a partir da Lei da Conservação do Fluxo, expressa em (6).

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} \text{ (Lei de Ampère)} \quad (3)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \text{ (Relação constitutiva)} \quad (4)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \text{ (Lei de Ampère)} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \text{ (Lei da conservação do fluxo)} \quad (6)$$

Caso o meio não seja isotrópico, a anisotropia magnética precisa ser considerada, o que torna complexo o estudo de materiais magnéticos. Adicionalmente, há de ser levado em conta o fenômeno da saturação magnética, segundo o qual a permeabilidade μ não é constante, mas depende do próprio valor de \mathbf{H} existente no material magnético em questão.

O fenômeno da saturação magnética faz com que a relação geral de passagem entre \mathbf{B} e \mathbf{H} passa a ser representada pela expressão (7), na qual $\|\mu\|$ representa o tensor permeabilidade magnética. Em termos de coordenadas cartesianas, o tensor $\|\mu\|$ é uma matriz quadrada, como mostrado em (8) [72]. Dessa forma, a expressão geral $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ pode ser expressa sob forma de matriz apresentada em (9).

$$\mathbf{B} = \|\mu(\mathbf{H})\| \mathbf{H} \quad (7)$$

$$\|\mu\| = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \\ B_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_x & 0 & 0 \\ 0 & \mu_y & 0 \\ 0 & 0 & \mu_z \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \\ H_z \end{bmatrix} \quad (9)$$

Se o material é isotrópico, ou seja, se $\mu_x = \mu_y = \mu_z = \mu$, a expressão $\mathbf{B} = \|\mu(\mathbf{H})\| \mathbf{H}$ assume a forma da expressão constitutiva (4) e, no caso da propagação do campo

magnético pelo ar, o valor da permeabilidade magnética, μ_0 , é constante e igual a $4\pi 10^{-7}$ H/m.

Seja o modelo do TC mostrado na Fig. 9, em que i_1 e i_2 são, respectivamente, a corrente do primário e do secundário, ambas variando senoidalmente no tempo. Pela Lei de Ampère, apresentada na expressão (5), a corrente elétrica i_1 é responsável pela criação de um vetor indução magnética, \mathbf{B} . Direção e sentido desses vetores podem ser obtidos por meio da regra da mão direita. A corrente elétrica i_1 é representada na Lei de Ampère por meio da densidade de corrente \mathbf{J} . À indução magnética, \mathbf{B} , está associado um fluxo magnético, que atravessa a área da seção transversal do núcleo magnético, conhecida como área magnética, A_{mag} .

Devido à existência de um fluxo variante no tempo, verifica-se o aparecimento de uma tensão elétrica induzida, v , nos terminais do secundário. Sabendo que $\lambda = N\phi$, em que ϕ é o fluxo magnético devido a uma bobina, pode-se obter a tensão elétrica induzida tal como mostrado em (10).

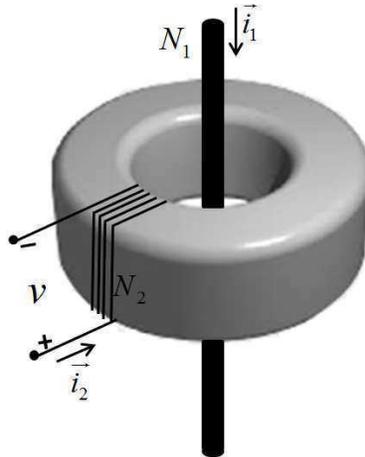


Fig. 9: Transformador de corrente (TC), em que i_1 é a corrente elétrica do primário e i_2 é a do secundário [Fonte: elaboração própria].

$$v = -\frac{d\lambda}{dt} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

No tocante ao acoplamento magnético, o recuperador de energia com núcleo toroidal apresenta muita semelhança com um transformador de corrente constituído de um enrolamento secundário enrolado em torno de um anel toroidal de material ferromagnético, com o primário constituído simplesmente de um condutor que passa no centro do anel. Nessa configuração, somente uma parcela do fluxo magnético oriundo

do primário fica confinada no núcleo ferromagnético.

3.2.1 Circuitos magnéticos equivalentes

O conceito de circuitos magnéticos pode ser estabelecido de maneira análoga ao utilizado em circuitos elétricos. Na Tab. 2 é apresentada, de forma resumida, a analogia de Hopkinson [73], que consiste em substituir elementos do circuito magnético por elementos de circuito elétrico.

Tab. 2: Analogia de Hopkinson

Elementos de circuitos magnéticos	Elementos de circuitos elétricos
Permeabilidade magnética (μ)	Condutividade elétrica (σ)
Intensidade de campo magnético (H)	Intensidade de campo elétrico (E)
Indução ou densidade de fluxo magnético (B)	Densidade de corrente elétrica (J)
Força magnetomotriz (\mathcal{F})	Força eletromotriz (V)
Relutância (\mathcal{R})	Resistência (R)
Fluxo magnético (λ)	Corrente elétrica (I)
$\mathcal{F} = \mathcal{R}\phi$	$V = R I$
$\Sigma \phi = 0$	$\Sigma I = 0$
$\Sigma \mathcal{F} - \Sigma(\mathcal{R}\phi) = 0$	$\Sigma V - \Sigma(R I) = 0$

Os circuitos magnéticos equivalentes referentes ao TC mostrado na Fig. 9, sem entreferro, e na Fig. 5, com entreferro, podem ser vistos na Fig. 10 e na Fig. 11, respectivamente. Nesses circuitos, \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 são, respectivamente, força magnetomotriz do primário e força contramagnetomotriz de efeito desmagnetizante (reação de armadura).

Usualmente, nos TC convencionais, o primário é composto por apenas um condutor (fio ou barra), logo, o número de enrolamentos no primário é 1. Além disso, os parâmetros do circuito magnético \mathcal{R}_{d1} , \mathcal{R}_{d2} , \mathcal{R}_{ar} e \mathcal{R} são, respectivamente, a relutância do primário, do secundário, do entreferro e do núcleo.

Considerando \mathcal{R}_{d1} e \mathcal{R}_{d2} muito maiores do que \mathcal{R} e \mathcal{R}_{ar} , praticamente todo o fluxo magnético passa pelo núcleo, no caso do núcleo sem entreferro, ou totalmente pelo conjunto núcleo/entreferro, no caso do núcleo com entreferro. Assim, tem-se que

as relutâncias equivalentes \mathcal{R}_{eq} do núcleo sem entreferro e com entreferro são dadas respectivamente por (11) e (12).

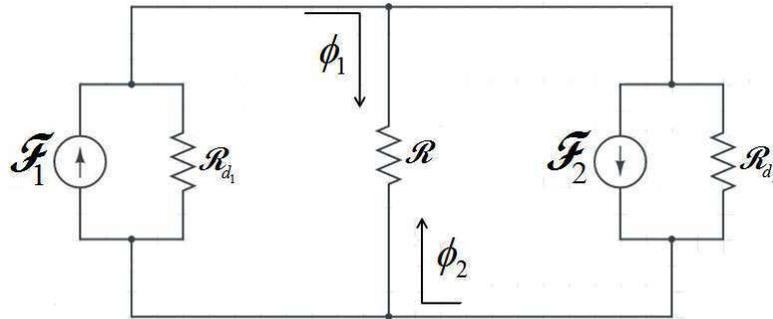


Fig. 10: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica, conforme mostrado na Fig. 9 [Fonte: elaboração própria].

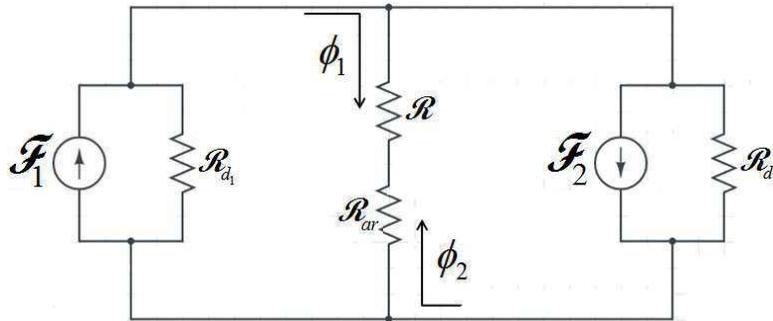


Fig. 11: Circuito magnético equivalente do sensor de corrente elétrica, conforme mostrado na Fig. 5 [Fonte: elaboração própria].

$$\mathcal{R}_{\text{eq}} = \frac{l}{\mu_0 \mu_r A_{\text{mag}}} \quad (11)$$

$$\mathcal{R}_{\text{eq}} = \frac{l-e}{\mu_0 \mu_r A_{\text{mag}}} + \frac{e}{\mu_0 A_{\text{ar}}} \quad (12)$$

Nas expressões (11) e (12), A_{mag} e A_{ar} são as áreas da seção atravessada perpendicularmente pelo campo magnético no material magnético e no entreferro; e é o comprimento do entreferro; l é o comprimento médio do caminho magnético; μ_0 e μ_r são, respectivamente, a permeabilidade magnética do ar e do meio magnético.

Para um núcleo toroidal, a área magnética é dada por (13). No caso de um núcleo toroidal com entreferro, devido ao efeito de frangeamento, isto é, do fluxo de dispersão na região de entreferro, A_{ar} pode ser dado como mostrado em (14) [74].

$$A_{\text{mag}} = ah \quad (13)$$

$$A_{\text{ar}} = (a + e)(h + e) \quad (14)$$

Define-se fator de frangeamento, F , como sendo a relação entre a área do entreferro (A_{ar}) considerando o fluxo de dispersão e a área magnética (A_{mag}) [74], como mostrado em (15).

$$F = \frac{A_{\text{ar}}}{A_{\text{mag}}} = \frac{(a + e)(h + e)}{ah} \quad (15)$$

As forças magnetomotrizes de magnetização e de desmagnetização, \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 , mostradas na Fig. 10 e na Fig. 11, dependem da corrente elétrica que as gerou e do número de enrolamentos da bobina pela qual essa corrente circula. \mathcal{F}_1 e \mathcal{F}_2 podem ser calculados conforme (16) e (17), respectivamente. Como o número de espiras do primário é 1, tem-se que $\mathcal{F}_1 = i_1$. Além disso, o fluxo magnético líquido no núcleo pode ser expresso como mostrado em (18). Como $\phi = BA_{\text{mag}}$, então, a indução magnética resultante no núcleo, B , pode ser expressa como mostrado em (19).

$$\mathcal{F}_1 = N_1 i_1 \quad (16)$$

$$\mathcal{F}_2 = N_2 i_2 \quad (17)$$

$$\phi = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2}{\mathcal{R}_{\text{eq}}} \quad (18)$$

$$B = \frac{\phi}{A_{\text{mag}}} = \frac{\mathcal{F}_1 - \mathcal{F}_2}{A_{\text{mag}} \mathcal{R}_{\text{eq}}} \quad (19)$$

Na Fig. 12, é apresentado um núcleo magnético toroidal sem entreferro com as dimensões R_1 , R_2 , h e l , representando, respectivamente, os raios interno e externo, a altura e comprimento médio do caminho magnético do núcleo.

Caso a espessura do núcleo seja muito pequena, isto é, se a diferença entre os raios externo e interno for mínima, o comprimento do caminho magnético médio, l ,

pode ser expresso como sendo $l = 2\pi R'$, em que R' é o raio médio, e a distribuição de campo magnético no interior no núcleo pode ser considerada uniforme.

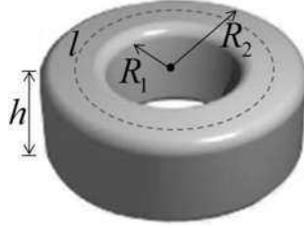


Fig. 12: Núcleo magnético toroidal sem entreferro [Fonte: elaboração própria].

Entretanto, se a condição simplificadora de considerar os raios interno e externo aproximadamente iguais não puder ser aplicada, a distribuição de campo magnético não pode ser considerada uniforme na direção radial ao longo do núcleo. Nesse caso, faz-se necessário obter o caminho magnético efetivo, l_e , que corresponde a um toroide hipotético com as mesmas propriedades magnéticas do núcleo não uniforme.

De acordo com [75], l_e pode ser determinado pela expressão (20). Feito isso, o caminho magnético efetivo pode ser utilizado para calcular o comportamento do núcleo não uniforme como se fosse um toroide ideal. É importante ressaltar que esse conceito é limitado às baixas densidades de fluxo, em que o material obedece às relações de Rayleigh ou Peterson [75]. Nessas relações, são verificados deslocamentos reversíveis dos domínios magnéticos quando no alinhamento na direção do campo aplicado [76].

$$l_e = \frac{2\pi \ln(R_2/R_1)}{1/R_1 - 1/R_2} \quad (20)$$

Tomando-se o limite de l_e quando $R_2 \rightarrow R_1 = R'$, tem-se que $\lim_{R_2 \rightarrow R_1} l_e = l$, como mostrado em (21). O resultado desse limite condiz com o esperado, uma vez que quando $R_2 \rightarrow R_1 = R'$ tem-se um núcleo com espessura pequena.

$$\lim_{R_2 \rightarrow R_1} l_e = \lim_{R_2 \rightarrow R_1 = R} \frac{2\pi \ln(R_2/R_1)}{1/R_1 - 1/R_2} = 2\pi \lim_{R_2 \rightarrow R_1} \frac{\ln(R_2/R_1)}{1/R_1 - 1/R_2} \Rightarrow \lim_{R_2 \rightarrow R_1} l_e = 2\pi R' \quad (21)$$

A fim de verificar a influência do comprimento efetivo do núcleo mostrado em (20) e a distribuição da indução magnética, escreve-se a indução magnética no núcleo tal como mostrado em (22), a qual é resultado da substituição (11), (16), (17), (18), e (20) em (19).

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r (N_1 i_1 - N_2 i_2)}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} - \frac{1}{R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right) \quad (22)$$

Nota-se que B é inversamente proporcional ao raio externo, R_2 . Assim, pode-se afirmar que B é não uniforme ao longo do núcleo na direção radial, sendo maior nas proximidades do raio interno, R_1 , e menor nas proximidades do raio externo, R_2 .

No caso de o secundário do sensor de corrente estar aberto, $i_2 = 0$ e, conseqüentemente, a indução magnética, B , no interior do núcleo magnético é dada pela expressão (23).

$$B = \frac{\mu_0 \mu_r i_1}{2\pi} \left(\frac{1}{R_1 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} - \frac{1}{R_2 \ln\left(\frac{R_2}{R_1}\right)} \right) \quad (23)$$

No caso de haver uma carga no secundário, ou mesmo um fio, fechando o circuito, haverá circulação de corrente no secundário e, portanto, $i_2 \neq 0$. Além de i_2 ser não nula, idealmente ela será tal que produzirá um fluxo magnético de mesma intensidade e sentido contrário ao gerado no primário.

Em sistemas reais, sabe-se que \mathcal{F}_1 não é exatamente igual a \mathcal{F}_2 . Isso ocorre devido à existência da reatância de magnetização no modelo do circuito elétrico que representa o TC, além de reatâncias de dispersão. Se não existisse o ramo de magnetização, a corrente de excitação seria nula e, conseqüentemente, não haveria erro de relação e de fase.

Usualmente, projeta-se o TC para operar com correntes de excitação baixas. Por isso, usualmente, opta-se por núcleos na forma toroidal sem entreferro, feitos com ligas de alta permeabilidade magnética e perdas reduzidas, projetados para operar sob densidades de fluxo da ordem de 0,1 T [70].

Para a aplicação do TC em um sistema recuperador de energia, é mais relevante a energia disponível no enrolamento do secundário para alimentar uma carga do que os erros de relação e de fase. Para o cálculo dessa energia, é necessário encontrar o fluxo magnético concatenado nos enrolamentos do secundário, λ_2 , dado por (24). O fluxo magnético, ϕ , pode ser calculado por meio da expressão (18).

$$\lambda_2 = N_2\phi = N_2 \frac{N_1 i_1 - N_2 i_2}{\mathcal{R}_{eq}} \Rightarrow \lambda_2 = \frac{N_1 N_2 i_1}{\mathcal{R}_{eq}} - \frac{N_2^2 i_2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (24)$$

Como se trata de um circuito com dois enrolamentos magneticamente acoplados, existe uma indutância mútua entre esses enrolamentos, M , dada por (25). Além disso, tem-se que a indutância do enrolamento secundário, L_2 , é dada conforme (26). Dessa forma, λ_2 pode ser visto como mostrado em (27).

$$M = \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (25)$$

$$L_2 = \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (26)$$

$$\lambda_2 = M i_1 - L_2 i_2 \quad (27)$$

Tomando como base a tensão induzida no secundário do TC, de acordo com a expressão (10), tem-se que utilizando-se o λ_2 de (27), obtém-se (28).

$$v_2 = M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \quad (28)$$

A potência disponível nos terminais do enrolamento secundário do TC é dada por (29). A partir da expressão da potência, calcula-se a energia disponível em L_2 por meio de (30), obtendo-se (31).

$$p_2 = i_2 v_2 = i_2 \left(M \frac{di_1}{dt} - L_2 \frac{di_2}{dt} \right) \Rightarrow p_2 = M i_2 \frac{di_1}{dt} - L_2 i_2 \frac{di_2}{dt} \quad (29)$$

$$W_2 = \int p_2 dt = \int \left(M i_2 \frac{di_1}{dt} - L_2 i_2 \frac{di_2}{dt} \right) dt = M \int \left(i_2 \frac{di_1}{dt} \right) dt - L_2 \int \left(i_2 \frac{di_2}{dt} \right) dt \Rightarrow W_2 = M \int i_2 di_1 - L_2 \int i_2 di_2 \quad (30)$$

$$W_2 = M i_1 i_2 - L_2 \frac{i_2^2}{2} \quad (31)$$

Dessa forma, verifica-se que a energia disponível no enrolamento secundário depende das correntes que circulam no primário e no secundário, i_1 e i_2 , respectivamente. Normalmente, tem-se algumas informações sobre a corrente no primário, como por exemplo, seu valor nominal, valor de pico e forma de onda (na maioria das vezes senoidal).

A corrente do secundário, entretanto, depende da carga conectada aos terminais do enrolamento secundário. Faz-se necessário, portanto, o conhecimento do comportamento de i_2 em função da carga, o que pode ser feito por meio da análise do circuito elétrico equivalente.

3.2.2 Circuito elétrico equivalente

Para um sistema eletromagnético como o composto pelo TC com núcleo toroidal, o circuito elétrico equivalente é um modelo simplificado do sistema real. A exatidão com que esse modelo se aproxima do sistema real é limitada pelas simplificações feitas na elaboração do circuito magnético equivalente.

A derivação de circuitos elétricos equivalentes a partir de circuitos magnéticos equivalentes pode ser feita por meio da técnica topológica proposta por [77]. De acordo com essa técnica, para cada malha independente no circuito magnético, há um nó independente no circuito elétrico. Para cada relutância derivada no circuito magnético, há uma indutância correspondente no circuito elétrico. Para cada fonte de força magnetomotriz no circuito magnético, há uma corrente correspondente na bobina do circuito elétrico, conforme mostrado na Tab. 2.

Na Fig. 13 é apresentado o circuito elétrico equivalente do TC com núcleo toroidal. No referido circuito, as resistências e reatâncias de dispersão dos enrolamentos primários e secundários são representadas por R_{11} , X_{11} , R'_2 e X'_2 , respectivamente. Esses dois últimos parâmetros estão refletidos ao primário do circuito elétrico. O ramo de magnetização está caracterizado pelos seus dois parâmetros, R_m o qual é responsável pelas perdas ôhmicas por correntes parasitas no núcleo e X_m , que representa a reatância

de magnetização do núcleo. Z_C' é a impedância do instrumento de medição refletida ao primário do circuito elétrico equivalente.

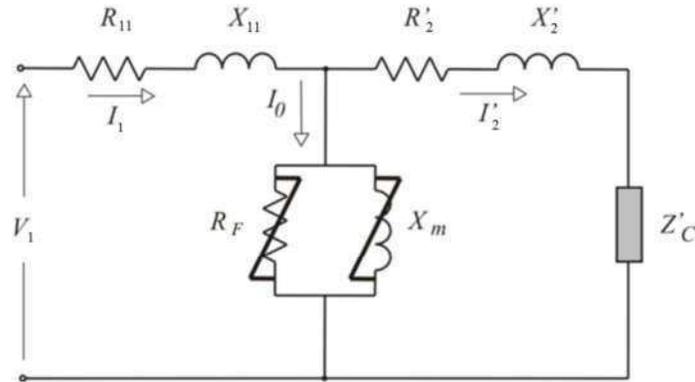


Fig. 13: Circuito elétrico equivalente ao sistema eletromagnético do sensor de corrente representado na Fig. 9 [Fonte: elaboração própria].

Considerando o núcleo magnético composto por um material magnético de altíssima resistividade, pode-se considerar que praticamente não existem perdas por correntes parasitas no núcleo. Assim, R_F é tão grande que a associação em paralelo com X_m é praticamente igual a X_m .

Por meio da análise do circuito elétrico mostrado na Fig. 13 e utilizando o conceito de divisor de corrente, obtém-se \hat{I}_2' , isto é, da corrente do secundário refletida ao primário do circuito, mostrada em (32).

$$\hat{I}_2' = \frac{jX_m}{R_2' + jX_2' + jX_m + R' + jX'} \hat{I}_1 \Rightarrow \hat{I}_2' = \frac{jX_m}{(R_2' + R') + j(X_2' + X_m + X')} \hat{I}_1 \quad (32)$$

Em (32), em que R' e X' são, respectivamente, a parte real e a imaginária da impedância de carga refletida ao primário, Z_c' . Além disso, X_2' e X_m podem ser calculados conforme as expressões (33) e (34), respectivamente.

$$X_2' = X_2 \frac{N_1^2}{N_2^2} = \omega L_2 \frac{N_1^2}{N_2^2} = \omega \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{eq}} \frac{N_1^2}{N_2^2} \Rightarrow X_2' = \omega \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (33)$$

$$X_m = \omega L_1 = \omega \frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (34)$$

Em relação à resistência do condutor do secundário refletida ao primário do circuito elétrico, pode-se calculá-la por meio da Segunda Lei de Ohm, na qual a resistência é diretamente proporcional à resistividade do material e ao comprimento do condutor, e inversamente proporcional à área da seção transversal do condutor. O comprimento total do condutor no secundário corresponde a N vezes o comprimento do fio em cada espira. Observando a Fig. 14, nota-se que o comprimento do condutor em cada espira, l_{fio} , pode ser dado, aproximadamente, pela expressão (35). Assim, conclui-se que a resistência total do condutor do secundário é dada por (36), em que r_2 é o raio do condutor do secundário.

$$l_{\text{fio}} = 2a + 2h + 4\pi r_2 \quad (35)$$

$$R'_2 = \frac{N_2^2}{N_1^2} R_2 = \frac{N_2^2}{N_1^2} N_2 \frac{\rho l_{\text{fio}}}{A_{\text{fio}}} \Rightarrow R'_2 = \frac{N_2^3}{N_1^2} \frac{\rho(2a + 2h + 4\pi r_2)}{\pi r_2^2} \quad (36)$$

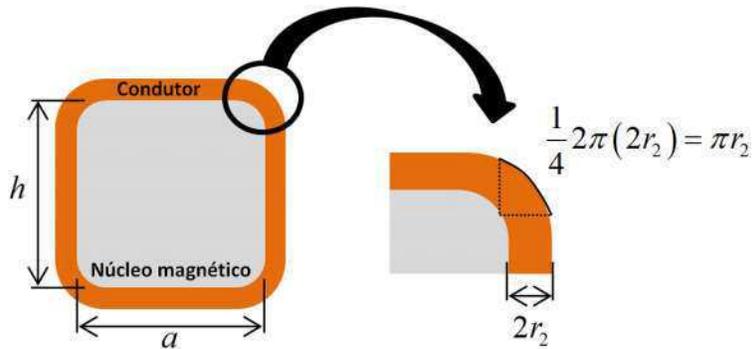


Fig. 14: Comprimento de condutor em cada espira [Fonte: elaboração própria].

Considerando a utilização do TC como elemento recuperador de energia, pode-se pensar na utilização do condutor de uma linha de distribuição de energia como sendo o seu primário. Por esse condutor primário, circula uma corrente elétrica normalmente elevada (podendo atingir centenas de ampères) que depende, por exemplo, das características do transformador de distribuição utilizado. Dessa forma, ao acoplar o TC ao sistema, a reação desmagnetizante do secundário praticamente não interfere na corrente do primário. Considerando o sistema operando na região linear da curva de magnetização do material magnético, pode-se calcular a energia magnética do enrolamento primário do TC como mostrado em (37).

$$W_1 = \frac{L_1 i_1^2}{2} \quad (37)$$

Sabendo que existe um acoplamento magnético entre os enrolamentos primário e secundário do TC por meio do núcleo eletromagnético toroidal e considerando o princípio da conservação da energia, tem-se que, idealmente, a energia máxima no secundário é W_1 . Nesse caso ideal, ter-se-ia acoplamento perfeito entre primário e secundário. Sabe-se, entretanto, que esse acoplamento é composto por uma parcela de fluxo dispersivo, representado no modelo do circuito elétrico equivalente pelas indutâncias de dispersão L_1 e L_2 . Assim, a energia no secundário do TC, W_2 , será sempre menor que W_1 .

Além disso, baseando-se na expressão (31), que representa o comportamento da energia no secundário do TC, verifica-se que a energia no secundário é tão maior quanto maior é a corrente que o circula, i_2 . Como a corrente i_2 depende da carga acoplada nos terminais do secundário do TC de maneira inversamente proporcional (ver expressão (32)), tem-se que a maior energia no secundário ocorre quando a carga é nula. Além disso, na medida em que a carga do secundário aumenta, a energia no secundário diminui. Por isso, é desejável que a impedância da carga, Z_c , seja pequena, como a de $0,5 \Omega$ usada em [61].

3.2.3 Consequências da inserção de entreferro no núcleo toroidal de um TC

Sabe-se que a inserção de um entreferro reduz o efeito de saturação, tornando o sistema mais linear do que aquele sem entreferro. Além disso, verifica-se que, na medida em que o comprimento do entreferro aumenta, a quantidade de energia nessa região diminui.

Esse comportamento pode ser verificado por meio da demonstração realizada nas expressões (38)-(44).

Considere-se a conservação do fluxo magnético no núcleo e na região do entreferro preenchida por ar. Daí, escreve-se (38), em que A_{ar} e A_{mag} são, respectivamente, a área da seção transversal do ar na região do entreferro e a área da seção transversal do núcleo magnético.

Sabendo que o fator de frangeamento, F , diz respeito à relação entre A_{ar} e A_{mag} , como mostrado em (14), tem-se (39). Pelo fato de o ar ser um meio linear, a energia

magnética no entreferro pode ser calculada tal como (40). Substituindo (39) em (40), obtém-se (41).

Tomando um ponto de operação na região linear da curva de magnetização do material magnético, calcula-se a energia no núcleo como mostrado em (42).

Realizando o quociente entre (41) e (42), como explicitado em (43), obtém-se (44). Assim, conclui-se que a energia no entreferro é μ_r / F vezes maior do que aquela no núcleo magnético.

É importante destacar que no caso de um núcleo magnético composto por partes móveis, sempre existirá um entreferro, mesmo que se tente manter as partes móveis fortemente unidas mecanicamente. Isso ocorre devido à rugosidade nas faces do núcleo na região do corte, que favorece a existência de um entreferro irregular, como pode ser observado na Fig. 15. Essa rugosidade é inerente ao corte efetuado, mesmo que, após o corte, seja realizado um processo de polimento.

$$\phi = \phi_{ar} \Rightarrow BA_{mag} = B_{ar}A_{ar} \Rightarrow \mu_0\mu_r HA_{mag} = \mu_0 H_{ar}A_{ar} \Rightarrow H_{ar} = \mu_r H \frac{A_{mag}}{A_{ar}} \quad (38)$$

$$H_{ar} = \frac{1}{F} \mu_r H \quad (39)$$

$$W_{ar} = \frac{1}{2} B_{ar} H_{ar} = \frac{1}{2} \mu_0 H_{ar}^2 \quad (40)$$

$$W_{ar} = \frac{1}{2F^2} \mu_0 \mu_r^2 H^2 \quad (41)$$

$$W = \frac{1}{2} BH = \frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H^2 \quad (42)$$

$$\frac{W_{ar}}{W} = \frac{\frac{1}{2F^2} \mu_0 \mu_r^2 H^2}{\frac{1}{2} \mu_0 \mu_r H^2} \quad (43)$$

$$W_{ar} = \frac{\mu_r}{F} W \quad (44)$$

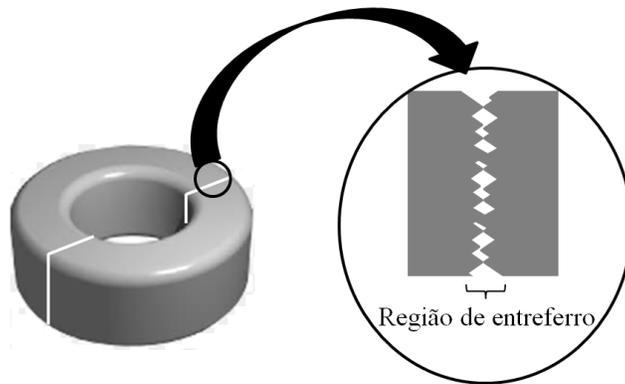


Fig. 15: Representação do entreferro criado devido à rugosidade do corte das faces do núcleo magnético [Fonte: elaboração própria].

Outra questão relevante é quanto ao aspecto prático da fabricação de um núcleo feito com partes móveis. No caso dos núcleos laminados, o corte das lâminas pode ser feito de forma convencional, por eletroerosão ou a *laser*.

Efetivamente, o corte das lâminas introduz tensões mecânicas, que precisam ser aliviadas mediante tratamento térmico, para que as propriedades magnéticas sejam preservadas.

3.3 Limitações do modelo apresentado

3.3.1 Relutâncias de dispersão

A determinação do fluxo de dispersão no TC depende do cálculo da relutância de dispersão, representada no circuito magnético equivalente como sendo \mathcal{R}_{d1} e \mathcal{R}_{d2} referentes, respectivamente, ao primário e ao secundário. Para esse cálculo, faz-se necessário o conhecimento da área da seção transversal pela qual o fluxo de dispersão atravessa o ar, A_{ar} . A determinação dessa área é analiticamente complicada, pois, apesar de a intensidade de campo magnético decair com a distância, apenas a uma distância $d = \infty$ ter-se-iam incluídas todas as linhas de fluxo magnético de dispersão, o que implicaria em $A_{ar} = \infty$, o que é inviável para a realização dos cálculos.

Devido a essa dificuldade, usualmente utilizam-se ferramentas computacionais baseadas no cálculo de campos para determinar o fluxo de dispersão. Uma alternativa ao uso de ferramentas computacionais é a delimitação de uma região no entorno do núcleo que compreenda uma parcela majoritária do fluxo de dispersão, como a mostrada na Fig. 14.

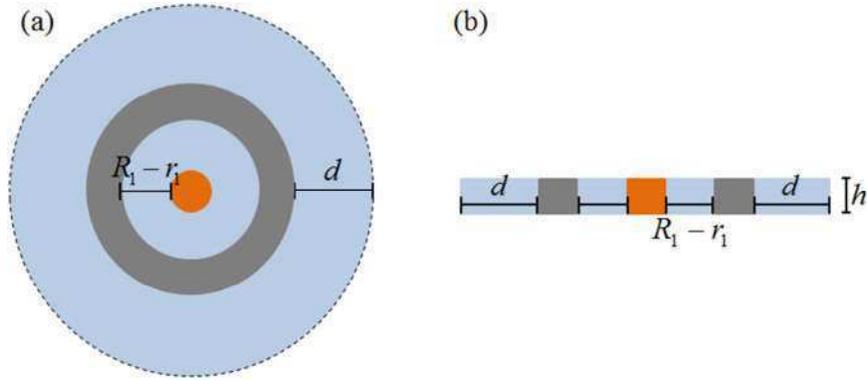


Fig. 16: (a) Vista superior do núcleo toroidal, com destaque para a região em que ocorre dispersão (em azul). (b) Vista da seção transversal do núcleo toroidal, com destaque para a região em que ocorre dispersão (em azul).

Nesse caso, utiliza-se a distância d para o cálculo da área da seção transversal de ar atravessada pelo fluxo de dispersão. É importante ressaltar que, por se tratar de um modelo, o fluxo de dispersão obtido se constitui numa aproximação do valor real e que essa aproximação será tão melhor quanto maior o valor adotado para d . Além disso, para cada d , deve-se calcular o comprimento médio do caminho magnético do fluxo de dispersão.

3.3.2 Fator de acoplamento

Além da dificuldade relacionada ao cálculo das relutâncias de dispersão, tem-se a dificuldade de estimar o fator de acoplamento entre primário e secundário, k_{12} . Esse parâmetro representa o quão acoplado está o primário ao secundário, podendo assumir valores entre zero, quando não há acoplamento, e um, quando o acoplamento é total.

No caso do modelo proposto, considerou-se $k_{12} = 1$, ou seja, que todo o fluxo gerado pelo primário atinge o secundário e que a dispersão é nula. Sabe-se, entretanto, que existe uma parcela importante de fluxo dispersivo no TC. Por isso, torna-se mais adequado o uso da expressão (45), ao invés de (25), uma vez que ela considera o fator de acoplamento.

$$M = k_{12} \sqrt{L_1 L_2} = k_{12} \sqrt{\frac{N_1^2}{\mathcal{R}_{eq}} \frac{N_2^2}{\mathcal{R}_{eq}}} = k_{12} \frac{N_1 N_2}{\mathcal{R}_{eq}} \quad (45)$$

A dificuldade no uso da expressão (45) é a estimativa do valor de k_{12} para o caso do TC em estudo.

3.3.3 Perdas por corrente parasita

Quando um material ferromagnético é submetido a um campo magnético variável no tempo, correntes de Foucault, ou correntes parasitas, são induzidas em seu interior. Essas correntes representam perdas por efeito Joule.

A redução dessas perdas por correntes parasitas pode ser obtida mediante a adição de material semiconductor ao material ferromagnético (silício ao ferro, por exemplo) e, ao invés de um núcleo maciço, utilizar um núcleo constituído por chapas, fitas ou lâminas justapostas de material magnético, como mostrado na Fig. 17.

Usualmente, essas lâminas ou chapas, antes empilhadas, são recobertas por uma camada muito fina de material isolante (verniz, por exemplo).

No caso de um núcleo laminado, verifica-se que a área magnética do núcleo, A_{mag} , não corresponde exatamente à área geométrica da seção transversal do núcleo, $A_{\text{geom}} = a \cdot h$. Isso ocorre devido à existência de camadas de material não magnético, como ar e verniz, entre as lâminas do núcleo. Por isso, define-se o fator de empilhamento, k_e , que representa a parcela do núcleo magnético composto efetivamente por material magnético e é dado por (46). Consequentemente, A_{mag} é dada por (47).

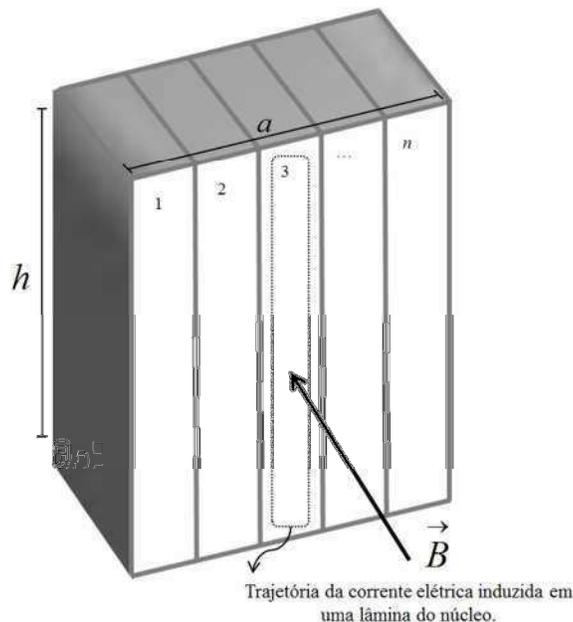


Fig. 17: Estrutura laminada do núcleo magnético submetido a uma indução magnética B e composto por n lâminas [Fonte: elaboração própria].

$$k_e = \frac{A_{mag}}{A_{geom}} \quad (46)$$

$$A_{mag} = k_e A_{geom} \quad (47)$$

Por questões de simplicidade, considerou-se o material do núcleo magnético como tendo resistividade elétrica elevada, possibilitando a consideração de que praticamente não existem perdas por correntes parasitas no núcleo. Assim, R_F é tão grande que a associação em paralelo com X_m é praticamente igual a X_m .

Para estimar as perdas por correntes parasitas, cujas trajetórias são mostradas na Fig. 17, faz-se necessário o cálculo da tensão induzida ao longo da trajetória da corrente induzida, bem como da resistência elétrica da trajetória.

Sabe-se que o fluxo magnético em cada laminação pode ser calculado como mostrado em (48), em que B é o módulo da indução magnética; n é o número de lâminas do núcleo; h e a são, respectivamente, altura e espessura do núcleo magnético.

$$\phi = \frac{BA_{mag}}{n} \quad (48)$$

Utilizando esse fluxo, calcula-se a tensão induzida ao longo da trajetória da corrente induzida, tal como apresentado em (49). A resistência elétrica da trajetória é dada por (50), tal como previsto por [77].

$$v_{ind} = \frac{d\phi}{dt} = \frac{A_{mag}}{n} \frac{dB}{dt} \quad (49)$$

$$R = k\rho \frac{2h}{al/2n} \quad (50)$$

Na expressão (50), l é o comprimento médio do caminho magnético e k é uma constante que considera o fato de as trajetórias no interior das laminações terem menor tensão induzida do que nas proximidades da superfície [77].

Considerando a expressão (47) e que $A_{geom} = a'h$, então, as perdas ativas em uma lâmina do núcleo para um B variante no tempo são dadas em watts por (51), assim como as perdas ativas em um núcleo com n lâminas são dadas por (52). A normalização das

perdas em um núcleo magnético em relação ao volume do núcleo é dada, portanto, por (53) em W/m^3 .

$$P = \frac{v_{ind}^2}{R} = \frac{la}{4k\rho hn} \frac{k_e^2 h^2 a^2}{n^2} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (51)$$

$$P_{nucleo} = \frac{a^2 k_e^2}{4k\rho n^2} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 (lah) \quad (52)$$

$$\frac{P_{nucleo}}{\text{Vol}_{nucleo}} = \frac{a^2 k_e^2}{4k\rho n^2} \left(\frac{dB}{dt} \right)^2 \quad (53)$$

4 Metodologia

No desenvolvimento do trabalho, fez-se inicialmente uma revisão bibliográfica sobre sistemas de recuperação de energia eletromagnética utilizando núcleos magnéticos. As vantagens da geometria toroidal em relação às demais utilizadas nesse tipo de aplicação propiciaram a escolha dessa geometria para o recuperador de energia em estudo.

Em seguida, foram realizados estudos teóricos e analíticos visando prover a fundamentação teórica necessária para o desenvolvimento da dissertação sobre o tema escolhido. Assim, foi possível obter um modelo baseado no circuito magnético equivalente de um TC para os casos sem e com entreferro, incluindo expressões para potência e energia no enrolamento do secundário em função das características do núcleo (dimensões, presença ou não de entreferro), da carga (impedância da carga) e da corrente no primário. Foram estudadas também as características de diferentes materiais magneticamente moles a fim de escolher o que melhor se adéqua para constituir o núcleo do recuperador de energia eletromagnética.

A partir do estudo analítico realizado sobre o TC com núcleo toroidal, realizaram-se simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos para obter a distribuição da indução magnética no interior do núcleo.

Além disso, foram realizadas simulações computacionais baseadas no modelo apresentado para a obtenção da influência da carga acoplada ao secundário do TC, do material, existência ou não de entreferro no núcleo e do fator acoplamento entre primário e secundário na energia recuperada pelo TC.

4.1 Distribuição do fluxo magnético no interior do núcleo

Um dos objetivos deste trabalho foi a obtenção da distribuição de indução magnética no interior do núcleo toroidal. Uma das maneiras de fazê-lo é utilizando ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos e das diferenças finitas para calcular a distribuição de campo magnético no interior do núcleo, como sugerido em alguns trabalhos [68][78].

O método dos elementos finitos (MEF) é um artifício utilizado para resolver problemas que envolvem equações diferenciais complexas. Para tal, particiona-se a geometria em numerosas e pequenas regiões (triângulos), nas quais a solução é

aproximada por funções simples de resolver. Em cada triângulo, a solução é aproximada pela interpolação linear dos valores em cada vértice do triângulo. Quanto maior o número de partições, mais exata é a solução.

Atualmente, existem várias ferramentas computacionais baseadas no método dos elementos finitos e no método das diferenças finitas, mediante as quais a determinação das induções magnéticas no interior do núcleo pode ser feita. Dentre essas, pode ser citado o módulo magnetostático para a análise de problemas bidimensionais desenvolvido por [79].

Como o TC com núcleo toroidal admite aximetria geométrica, a determinação bidimensional da indução pode ser efetuada usando componentes cilíndricas e a simulação pode ser feita tomando como domínio de estudo $\frac{1}{4}$ da região circular, conforme apresentada na Fig. 18, que contém a informação de dimensões do elemento simulado.

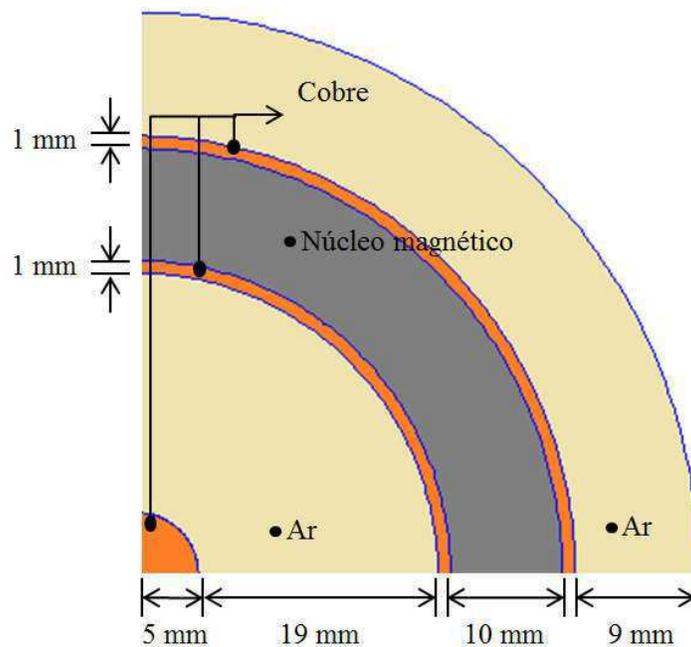


Fig. 18: Dimensões do toroide simulado no FEMM [Fonte: elaboração própria].

Na representação mostrada na Fig. 18 não foi considerado o fluxo de dispersão entre as espiras do enrolamento secundário, uma vez que admitiu-se uma camada de cobre com área correspondente à área ocupada por N_2 espiras com área πr_2^2 cada.

4.2 Energia recuperada no secundário do TC

Um dos interesses deste trabalho é o traçado da curva de energia no secundário do TC em função da impedância do secundário. Com esse tipo de curva, podem-se identificar pontos de máximo na curva da energia do secundário. Essa informação pode ser relevante na identificação das características da carga acoplada aos terminais do recuperador.

A energia no secundário do TC pode ser calculada como mostrado em (31). Para tanto, faz-se necessário o cálculo prévio da corrente no secundário, I_2 , que é função da carga acoplada no secundário. O cálculo dessas grandezas pode ser feito por meio das expressões mostradas na fundamentação teórica deste texto por meio do algoritmo a seguir:

- Definição das constantes: μ_0, μ_r, ρ ;
- Definição das características operacionais do sistema: f, I_1, Z_c ;
- Definição das características do núcleo magnético: R_1, R_2, h, a, e ;
- Definição das características do primário e do secundário: N_1, r_1, N_2, r_2 ;
- Cálculo das características magnéticas do sistema: $l, A_{\text{mag}}, \mathcal{R}$;
- Cálculo dos parâmetros do circuito equivalente: $R_{11}, L_{11}, X_{11}, Z_{11}, L_m, X_m, Z_m, R_2, X_2, Z_c$;
- Cálculo da corrente elétrica e energia no secundário: I_2, W_2 .

Por meio do exposto na fundamentação teórica apresentada nesta dissertação, verifica-se que a corrente no secundário é função das reatâncias do circuito elétrico equivalente. Essas, por sua vez, são função das características do núcleo magnético (material magnético e existência ou não do entreferro, por exemplo) e do acoplamento entre primário e secundário, que influenciam diretamente a relutância equivalente. A energia no secundário do TC varia, portanto, em função dessas características. Assim, utilizando os parâmetros apresentados anteriormente, a obtenção de curvas da energia em função delas é possível.

5 Resultados e discussões

5.1 Simulações computacionais baseadas no método dos elementos finitos (MEF)

Na simulação, a condição de fronteira de Dirichlet foi utilizada, segundo a qual o potencial vetor magnético, A , é nulo ao longo da fronteira. Para os enrolamentos, considerou-se Cobre com condutividade de 58 MS/m. Considerou-se, também, a corrente do primário igual a 400 A, 80 espiras no enrolamento do secundário e a corrente elétrica do secundário igual a 5 A para o TC em curto circuito no secundário. Adicionalmente, as densidades de corrente do primário e do secundário foram adotadas como sendo, respectivamente, 1 A/m^2 , $3,5 \text{ A/m}^2$.

Na definição do problema, por convenção, considerou-se que a corrente elétrica é negativa e flui na direção perpendicular ao plano de estudo. Assim, tomando como base essa convenção, a densidade de corrente elétrica J da bobina do enrolamento secundário foi considerada positiva no lado interno do núcleo (corrente saindo) e negativa (corrente entrando) na região externa do toroide.

Nessa simulação o material ferromagnético utilizado no núcleo foi a liga nanocristalina FINEMET ($\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$), cuja curva de magnetização inicial em regime quase estático, obtida experimentalmente, é apresentada na Fig. 19.

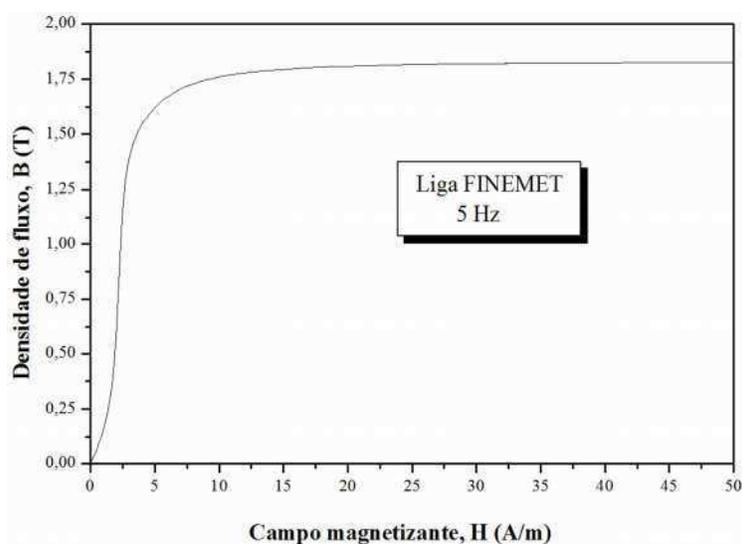


Fig. 19: Curva de magnetização inicial da liga FINEMET excitada a 5 Hz [Fonte: [9]].

O emprego da ferramenta computacional desenvolvida e disponibilizada por [7] permite a obtenção da distribuição de indução magnética, no interior do núcleo, conforme mostrado na Fig. 20.

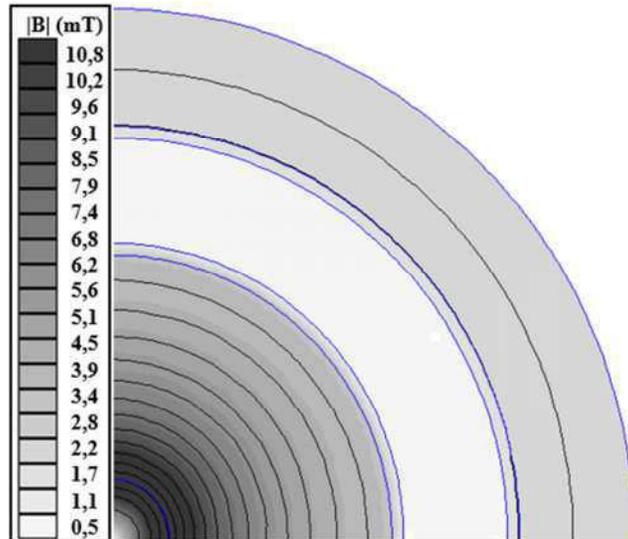


Fig. 20: Distribuição da indução magnética no interior de $\frac{1}{4}$ do núcleo toroidal.

Em termos quantitativos, pode-se observar a distribuição da indução magnética no gráfico da Fig. 21, no qual é apresentado o resultado de simulação computacional em todo o domínio de estudo.

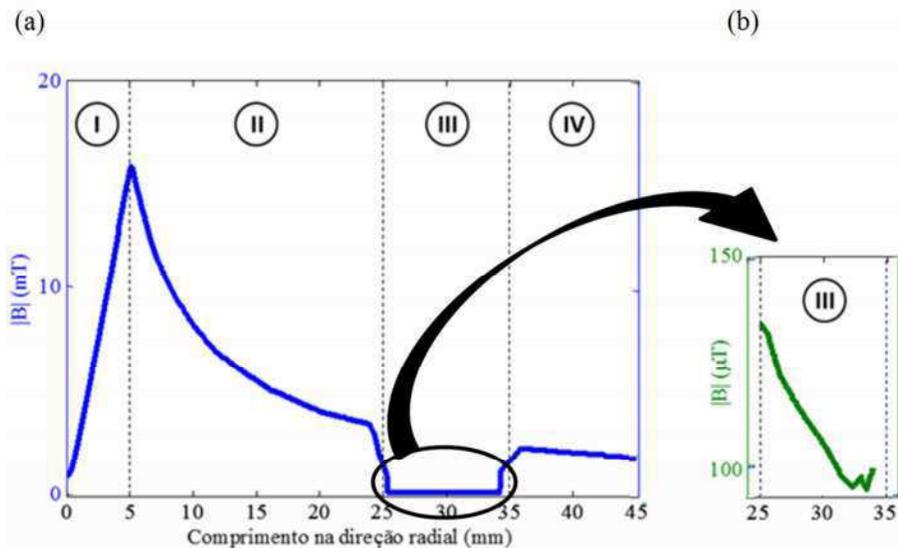


Fig. 21: Distribuição do módulo da indução magnética na direção radial do domínio de estudo: (a) I - interior do condutor primário; II - Região com ar entre o primário e o secundário; III - Núcleo magnético; IV - Região externa do TC composta por ar. (b) Ampliação da escala de indução na região III.

Na Fig. 21, o eixo das abscissas corresponde à direção radial do sistema composto pelo condutor primário, núcleo magnético e enrolamento secundário, sendo 0 mm o centro do condutor primário e 45 mm a fronteira na qual, para efeito de simulação, o potencial vetor magnético foi considerado nulo. Ainda na Fig. 21, as regiões I, II, III e IV correspondem à distribuição do módulo da indução magnética no condutor primário, no conjunto ar/parte interna do enrolamento secundário, no núcleo magnético, e no conjunto parte externa do enrolamento secundário/ar, respectivamente.

Na região I, observa-se que o módulo da indução magnética aumenta na direção radial. Esse comportamento é decorrente do fato do material que compõe o primário ser condutor. Assim, na medida em que se percorre o condutor primário, do centro ao seu raio externo, verifica-se maior acúmulo de cargas na região periférica do condutor, sendo notável o aumento da intensidade da indução magnética nessa direção.

Como hipótese simplificadora para a modelagem matemática do sistema eletromagnético em estudo, considerou-se a relutância do ar muito elevada, em comparação com o material ferromagnético do núcleo. Utilizando essa hipótese, praticamente não há fluxo magnético nas regiões compostas por ar. Observando as regiões II e IV da Fig. 21, verifica-se que $|\mathbf{B}|$ é da ordem de mT. Além disso, o comportamento de decaimento do módulo da indução magnética nas regiões II e IV está de acordo com a Lei de Ampère, segundo a qual a intensidade da indução magnética decai com o inverso da distância da força magnetomotriz resultante.

Na região III, verifica-se que a indução magnética no interior do núcleo é da ordem de μT . Esse valor de indução magnética corresponde ao fato de existir um efeito de reação do secundário com amplitude praticamente igual e sentido contrário à força exercida pelo primário.

Visando verificar quantitativamente a distribuição de indução no interior do núcleo, ampliou-se a escala de indução magnética na região III (curva em verde). Percorrendo o núcleo magnético na direção do raio interno para o raio externo, verifica-se que a intensidade da indução magnética diminui, tal como previsto na expressão (22).

5.2 Energia no secundário do TC

Para a obtenção da curva da energia no secundário do TC em função da carga, considerou-se, inicialmente uma carga puramente resistiva. Sabendo-se que a energia

máxima no secundário do TC é aquela do primário, normalizou-se a energia do secundário em relação à do primário, obtendo-se o rendimento.

Na Fig. 22 pode ser observado o rendimento do TC como recuperador de energia em função da carga para materiais magnéticos do núcleo diferentes. Nessa simulação, considerou-se o coeficiente de acoplamento máximo entre primário e secundário, isto é, $k_{12} = 1,0$. Nota-se que quanto maior a permeabilidade relativa do material magnético do núcleo, menor é a dependência do rendimento em função da carga. As ligas nanocristalinas são exemplos de materiais com permeabilidade magnética relativa muito elevada, da ordem de 150.000 na região linear da curva de magnetização.

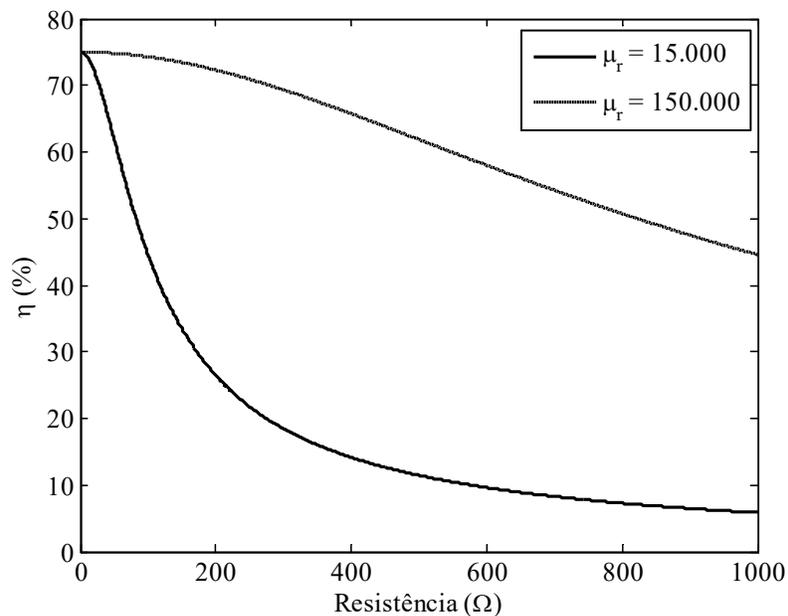


Fig. 22: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga considerando materiais magnéticos diferentes.

Além disso, nas curvas apresentadas na Fig. 22, verifica-se que o rendimento máximo foi de 75%, aproximadamente, para os dois valores de permeabilidade relativa simulados. Isso ocorre porque, o rendimento máximo depende de fatores como características do núcleo magnético (ramo magnetizante), frequência de operação, impedâncias mostradas no circuito elétrico equivalente (Fig. 13). Dessa forma, para o conjunto de entradas (corrente do primário, frequência de operação, dimensões do núcleo, etc), o maior rendimento é de cerca de 75%.

Nota-se que a máxima energia no secundário ocorre quando a carga é nula.

Além disso, variando-se a resistência da carga de 0Ω a $1 \text{ k}\Omega$, a variação de energia no secundário foi de 70% e 30% para o núcleo composto por material magnético com permeabilidade $\mu_r = 15.000$ e $\mu_r = 150.000$, respectivamente. Conclui-se, portanto, que quanto maior a permeabilidade magnética do material do núcleo, menor é a dependência da energia no secundário em função da carga.

Como usualmente se deseja que a energia recuperada seja pouco dependente da carga acoplada, sugere-se o uso de um material magnético com permeabilidade magnética muito elevada. Essa solução, entretanto, pode ser cara, uma vez que o custo de materiais magnéticos de permeabilidade alta ainda é elevado.

Uma alternativa ao uso de material com permeabilidade muito elevada é o uso de um capacitor acoplado em paralelo com a carga. Nesse caso, verifica-se que quanto maior o capacitor acoplado em paralelo com a resistência da carga, menor a dependência da energia no secundário em função da resistência. Esse comportamento pode ser observado nos gráficos da Fig. 23, feitos considerando $k_{12} = 1$.

Além disso, verifica-se que o ponto de máxima potência deixa de ser quando $R = 0 \Omega$, o que é esperado uma vez que a impedância vista dos terminais do secundário diz respeito à associação em paralelo entre a capacitância e a resistência. Assim, quando essa equivalência for mínima, tem-se o ponto de máxima energia no secundário.

Os gráficos mostrados nas Fig. 22 e na Fig. 23 correspondem ao comportamento da energia no secundário em função da resistência da carga acoplada ao secundário do TC considerando o coeficiente de acoplamento (k_{12}) unitário entre primário e secundário.

Como se sabe que o acoplamento entre primário e secundário no TC não é perfeito, fez-se um estudo acerca da relação entre a energia no secundário e no primário em função desse parâmetro, considerando o secundário sem carga e o material magnético do núcleo com permeabilidade relativa igual a 150.000. O resultado obtido pode ser observado no gráfico mostrado na Fig. 24.

Como esperado, na medida em que o coeficiente de acoplamento se aproxima de 1, representando o acoplamento perfeito entre primário e secundário, mais a energia recuperada no secundário se aproxima da energia do primário. Isso pode ser explicado pelo fato de que, quanto maior o coeficiente de acoplamento, maior a parcela de fluxo magnético do primário que atinge o secundário e, conseqüentemente, maior a energia disponível no secundário devido a esse acoplamento magnético.

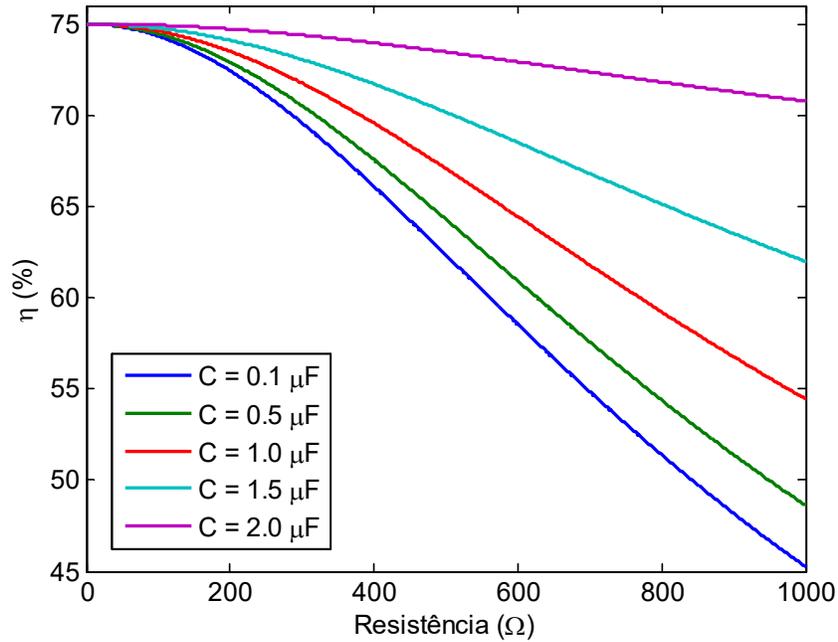


Fig. 23: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga para valores diferentes do capacitor acoplado em paralelo com a carga, considerando um material magnético $\mu_r = 150.000$.

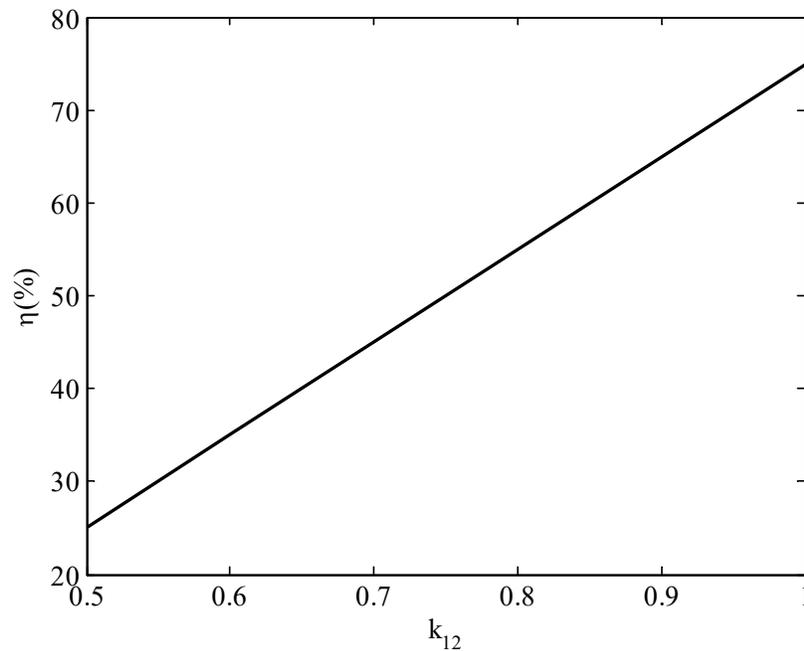


Fig. 24: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função do coeficiente de acoplamento considerando o secundário sem carga ($R_2 = 0 \Omega$) e um material magnético com $\mu_r = 150.000$.

Na Fig. 25 é possível observar o comportamento do rendimento em função da resistência da carga (considerando-se uma carga puramente resistiva) para coeficientes de acoplamento diferentes.

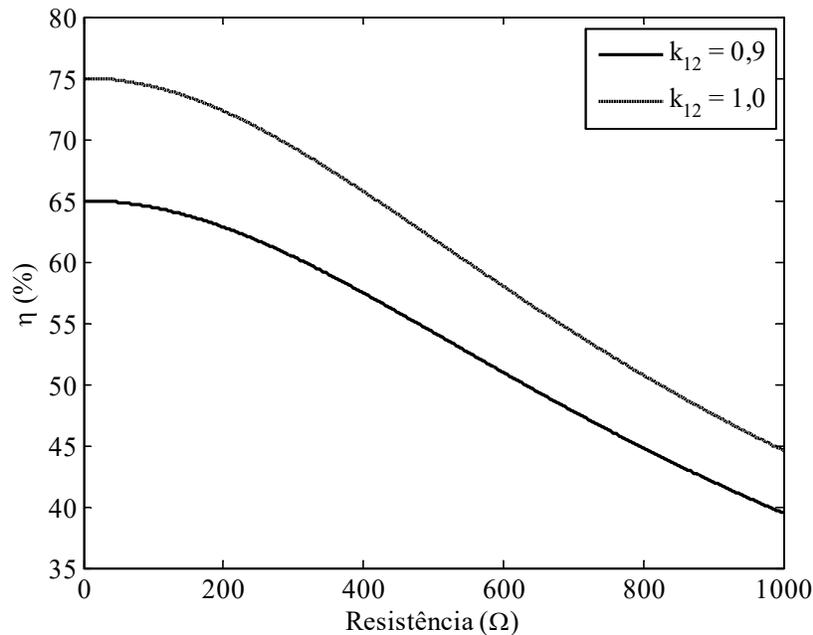


Fig. 25: Rendimento em termos da energia recuperada no TC em função da resistência da carga acoplada ao secundário do TC e núcleo composto por material magnético com $\mu_r = 150.000$ para coeficiente de acoplamento de 0,9 e 1,0.

Todas as simulações realizadas até então consideram o TC com núcleo toroidal sem entreferro. Entretanto, para ser utilizado como recuperador de energia, pode se fazer necessária a existência de um entreferro no núcleo a fim de viabilizar a instalação do recuperador em sistemas já existentes sem a necessidade de desenergização. Por isso, traçou-se o gráfico da energia recuperada no secundário do TC em função do comprimento do entreferro, que pode ser observado no gráfico da Fig. 26.

Por meio da análise do gráfico da Fig. 26, nota-se que na medida em que o comprimento do entreferro é aumentado, a energia recuperada no secundário diminui em relação àquela disponível no primário para o caso sem entreferro. Por isso, é importante considerar essa redução na eficiência da conversão no momento de projetar um núcleo com entreferro para a aplicação como recuperador de energia.

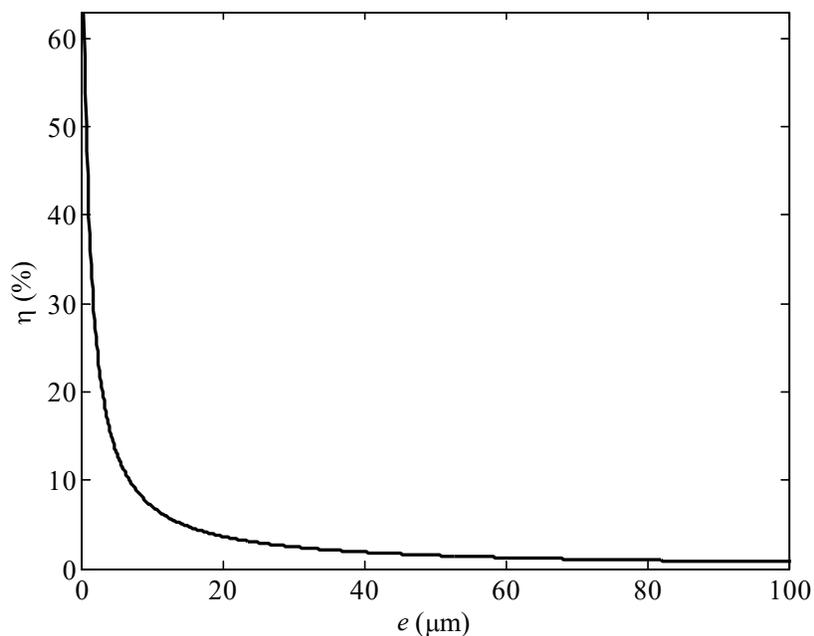


Fig. 26: Rendimento em função do comprimento do entreferro (e) considerando o secundário sem carga ($R_2 = 0 \Omega$) e um material magnético com $\mu_r = 150.000$.

5.2.1 Características do sistema simulado

Para as simulações descritas, foram utilizados os parâmetros descritos na Tab. 3.

Tab. 3: Parâmetros utilizados na simulação

μ_0	$4\pi 10^{-7}$ H/m
μ_r	150.000
ρ	$1,6 \cdot 10^{-8}$ Ωm
f	60 Hz
I_1	400 A
R_1	$2 \cdot 10^{-2}$ m
R_2	$3 \cdot 10^{-2}$ m
h	$1 \cdot 10^{-2}$ m
N_1	1
N_2	80
r_1	$1 \cdot 10^{-2}$ m
r_2	$0,1 \cdot 10^{-2}$ m

5.3 Energia recuperada para diferentes transformadores de distribuição de energia elétrica

Como se deseja recuperar a energia proveniente do fluxo magnético devido à circulação de corrente no condutor de uma linha de distribuição de energia elétrica, que

corresponde ao primário do TC recuperador, fez-se necessário o estudo da corrente de linha nominal para transformadores de distribuição típicos.

Para dado valor da potência aparente nominal, S , e de tensão de linha no secundário do transformador de distribuição, V_L , pode-se calcular a corrente de linha (igual à corrente de fase na ligação Δ -Y), I_L , por meio da expressão (54).

$$I_L = \frac{S}{\sqrt{3}V_L} \quad (54)$$

Tomando como base os valores de potência aparente de transformadores de distribuição apresentados na norma NBR 5440-1999 [80] e utilizando (54), construiu-se a Tab. 4. O cálculo da energia máxima no secundário, $W_{2_m\acute{a}x}$, foi realizado considerando o número de enrolamentos do secundário igual a 80.

Tab. 4: Transformadores de distribuição trifásicos com tensão máxima de 15 kV.

S (kVA)	V_L (V)	I_L (A)	$W_{2_m\acute{a}x}$ por unidade de tempo (J/s)
15	380	23	0,02
30	380	46	0,09
45	380	68	0,21
75	380	114	0,60
112,5	380	171	1,35
150	380	228	2,40
225	380	342	5,41
300	380	456	9,61

Tomando como base os valores de energia por unidade de tempo mostrado na Tab. 4, verifica-se que, dependendo do valor nominal do transformador no sistema de distribuição, é possível recuperar valores diferentes de energia no secundário do TC. Como consequência, diferentes cargas podem ser alimentadas.

6 Considerações finais

Como mostrado na revisão bibliográfica, existem diversos estudos utilizando recuperadores de energia eletromagnética. Em especial, alguns deles utilizam núcleos magnéticos com geometria toroidal sem entreferro.

No caso do uso de TC com núcleo toroidal como recuperador de energia eletromagnética em sistemas de distribuição, identificou-se como problemática a desenergização desses sistemas para a instalação do recuperador. Visando superar tal limitação, sugeriu-se o uso de um TC composto por partes móveis como recuperador de energia.

A utilização de um núcleo magnético com partes móveis implica na existência de entreferros na região de junção entre essas partes, mesmo que seja empregado esforço mecânico para uni-las. Por isso, a existência desses entreferros precisa ser lavada em conta no balanço de energia.

Neste trabalho foram apresentadas algumas considerações analíticas sobre recuperadores de energia com núcleo ferromagnético toroidal sem e com entreferro, cuja modelagem detalhada não foi encontrada na revisão bibliográfica. Além disso, foram apresentadas simulações computacionais para a determinação da indução magnética no interior do núcleo, bem como da energia recuperada no secundário do TC, considerando um núcleo sem e com entreferro.

Na fundamentação teórica, tomaram-se como base as leis fundamentais do eletromagnetismo presentes nas equações de Maxwell.

Na obtenção dos circuitos magnéticos equivalentes foram levados em conta as forças magnetomotrizes, relutâncias e os fluxos magnéticos.

O circuito elétrico equivalente foi obtido a partir do modelo do circuito magnético equivalente. No circuito elétrico, as reatâncias correspondem às indutâncias, que por sua vez, estão diretamente relacionadas com o quadrado do número de espiras e inversamente relacionadas com as relutâncias do circuito magnético.

A simulação computacional para a determinação da distribuição da indução magnética no interior do núcleo foi realizada no domínio da magnetostática. Nessa simulação foi utilizado um programa de cálculo de campo 2D baseado no método dos elementos finitos.

A liga nanocristalina FINEMET ($\text{Fe}_{73,5}\text{Si}_{13,5}\text{B}_9\text{Nb}_3\text{Cu}_1$) foi considerada como material constituinte no núcleo.

De acordo com os resultados obtidos na simulação computacional, verificou-se que os valores e a distribuição da indução magnética no interior do núcleo obtidos pelo cálculo de campo 2D são coerentes com a expressão apresentada na fundamentação analítica, especificamente no que diz respeito à sua distribuição não uniforme na direção radial.

Adicionalmente, estudou-se a influência de alguns parâmetros na energia recuperada no secundário do TC, tais como: carga acoplada ao secundário do TC, permeabilidade do material magnético e comprimento do entreferro.

Verificou-se que a energia no secundário do TC é inversamente proporcional à carga resistiva posta no secundário. Por isso, idealmente, para que se tenha a máxima energia no secundário, a carga deveria ser nula. Devido à impossibilidade de utilização de uma carga com resistência nula, os trabalhos que utilizam o TC para recuperação de energia eletromagnética fazem uso de cargas da ordem de $0,5 \Omega$.

Além disso, considerando uma carga composta por um elemento resistivo e outro capacitivo acoplados em paralelo ao secundário, verificou-se que quanto maior o valor do capacitor, menos sensível é o rendimento da recuperação em função da resistência de carga. Esse tipo de comportamento é particularmente interessante para um sistema de recuperação de energia, uma vez que usualmente se deseja que o rendimento varie pouco para variações na carga resistiva acoplada ao secundário do TC.

Verificou-se que outro fator que influencia o rendimento é o coeficiente de acoplamento magnético entre primário e secundário. Quanto maior o coeficiente de acoplamento, maior o rendimento. De fato, quanto maior do coeficiente de acoplamento, menor a dispersão do sistema e maior a quantidade de energia do primário que chegará ao secundário.

No que diz respeito à existência de entreferro no núcleo toroidal, para o caso de um TC composto por partes móveis, verificou-se que quanto maior o entreferro, menor a quantidade de energia recuperada. Além disso, a redução da eficiência com o aumento do entreferro possui característica exponencial. A existência de um entreferro na ordem de unidades de micrometro reduz em cerca de 10 vezes o rendimento, quando o recuperador composto por partes móveis é comparado ao caso do núcleo sem entreferro.

Referências

- [1] T. K. Tan, “Energy Harvesting Elective,” *NUS*. Singapore, p. 50, 2009.
- [2] K. V Naveen and S. S. Manjunath, “A reliable ultracapacitor based solar energy harvesting system for Wireless Sensor network enabled intelligent buildings,” *2nd Int. Conf. Intell. Agent Multi-Agent Syst.*, pp. 20–25, 2011.
- [3] D. M. Toma, J. del Rio, and A. Manuel-Lazaro, “Self-powered high-rate Wireless Sensor Network for Underground High Voltage Power Lines,” in *2012 IEEE International Instrumentation and Measurement Technology Conference Proceedings*, 2012, pp. 1881–1885.
- [4] M. Gueltig, B. Haefner, M. Ohtsuka, and M. Kohl, “Thermal energy harvesting based on ferromagnetic shape memory alloy microactuation,” in *17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems*, 2013, no. June, pp. 2803–2806.
- [5] M. Gueltig, M. Ohtsuka, H. Miki, T. Takagi, and M. Kohl, “Thermal Energy Harvesting By High Frequency Actuation of Magnetic,” in *Transducers*, 2015, pp. 718–721.
- [6] T. Huesgen and P. Woias, “A novel self-starting MEMS-heat engine for thermal energy harvesting,” *Proc. IEEE Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*, pp. 1179–1182, 2010.
- [7] V. Kotipalli, Z. Gong, Y. He, S. Yadav, S. Penmetsa, J. Wei, and L. Que, “Carbon nanotube film-based cantilever for light and thermal energy harvesting,” *Proc. IEEE Sensors*, pp. 1165–1168, 2010.
- [8] F. Lebahn and H. Ewald, “Using atmospheric temperature variations for thermal energy harvesting for wireless sensors,” *9th Int. Conf. Sens. Technol.*, pp. 133–137, Dec. 2015.
- [9] H. Maiwa, Y. Ishizone, and W. Sakamoto, “Thermal and vibrational energy harvesting using PZT- and BT-based ceramics,” *Proc. ISAF-ECAPD-PFM 2012*, pp. 1–4, Jul. 2012.
- [10] S. Monfray, O. Puscasu, G. Savelli, U. Soupremanien, E. Ollier, C. Guerin, L. G. Fréchette, E. Léveille, G. Mirshekari, C. Maitre, P. Coronel, K. Domanski, P. Grabiec, P. Ancey, D. Guyomar, V. Bottarel, G. Ricotti, F. Boeuf, F. Gaillard, and T. Skotnicki, “Innovative thermal energy harvesting for zero power electronics,” *IEEE Silicon Nanoelectron. Work. SNW 2012*, 2012.
- [11] Y. Pan, M. C. Rosamond, A. Mcdonald, T. Partridge, D. Cartwright, H. Edmund, D. Wood, and C. Balocco, “Summary for Policymakers,” in *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*, no. 1, Cambridge: Cambridge University Press, 2015, pp. 1–3.
- [12] S. K. T. Ravindran, P. Nilkund, M. Kroener, and P. Woias, “Thermal energy harvesting using an electrostatic generator,” *IEEE 26th Int. Conf. Micro Electro Mech. Syst.*, no. c, pp. 801–804, 2013.
- [13] Y. K. Tan and S. K. Panda, “Energy harvesting from hybrid indoor ambient light and thermal energy sources for enhanced performance of wireless sensor nodes,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 58, no. 9, pp. 4424–4435, 2011.
- [14] M. Wahbah, M. Alhawari, B. Mohammad, H. Saleh, and M. Ismail, “Characterization of human body-based thermal and vibration energy harvesting for wearable devices,” *IEEE J. Emerg. Sel. Top. Circuits Syst.*, vol. 4, no. 3, pp. 354–363, 2014.

- [15] G. Wu and X. B. Yu, "Thermal energy harvesting system to harvest thermal energy across pavement structure," *Int. J. Pavement Res. Technol.*, vol. 5, no. 5, pp. 311–316, 2012.
- [16] S. Yang, "Thermal energy harvesting for WSNs," *2010 IEEE Int. Conf. Syst. Man Cybern.*, pp. 3045–3052, 2010.
- [17] X. Meng, "Piezoelectric Wind Energy Harvesting Device with Resonant Cavity and Tuning Fork Reeds," *Symp. Piezoelectricity, Acoust. Waves, Device Appl.*, pp. 2019–222, 2015.
- [18] J. M. Miller, J. C. K. Yeung, Y. Q. Ma, and G. Sartorelli, "Ultracapacitors improve SWECS low wind speed energy recovery: Ultracapacitor and battery for low wind energy harvesting," *IEEE Power Electron. Mach. Wind Appl. PEMWA 2009*, 2009.
- [19] B. Sindhuja, "A proposal for implementation of wind energy harvesting system in trains," *Int. Conf. Control. Instrumentation, Energy Commun. CIEC 2014*, pp. 696–702, 2014.
- [20] M. A. Weimer, T. S. Paing, and R. A. Zane, "Remote area wind energy harvesting for low-power autonomous sensors," *PESC Rec. - IEEE Annu. Power Electron. Spec. Conf.*, 2006.
- [21] E. M. Elbeheiry and W. A. El-Askary, "An innovative multi-S rotor for harvesting wind energy," *PECon 2012 - 2012 IEEE Int. Conf. Power Energy*, no. December, pp. 638–643, 2012.
- [22] G. Acciani, F. Di Modugno, G. Gelao, E. Mininno, and P. Bari, "Shape Optimization of Cantilever Beam for Wind Energy Harvesting," *4th Int. Conf. Renew. Energy Res. Appl.*, vol. 5, pp. 1207–1212, 2015.
- [23] R. T. Aljadiri, L. Y. Taha, and P. Ivey, "Electrostatic Harvester for Wind Energy Harvesting and Wind Speed Remote Sensing," in *Proceeding of the IEEE 28th Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering*, 2015, pp. 412–417.
- [24] Y. K. Tan and S. K. Panda, "Self-autonomous wireless sensor nodes with wind energy harvesting for remote sensing of wind-driven wildfire spread," *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 60, no. 4, pp. 1367–1377, 2011.
- [25] R. K. Sathindran, R. R. Sekaran, B. Chandar, and B. S. A. G. Prasad, "Wind energy harvesting system powered wireless sensor networks for structural health monitoring," *2014 Int. Conf. Circuits, Power Comput. Technol. ICCPCT 2014*, pp. 523–526, 2014.
- [26] R. T. Abdulmunam, L. Y. Taha, and P. C. Ivey, "Wind Energy Harvesting using Electrostatic Converter for Wireless Sensor Networks," *Int. Conf. Optim. Electr. Electron. Equip.*, pp. 667–672, 2014.
- [27] Y. Wu, W. Liu, and Y. Zhu, "Design of a wind energy harvesting wireless sensor node," in *Third International Conference on Information Science and Technology (ICIST)*, 2013, pp. 1494–1497.
- [28] S. Krishnan, D. Ezhilarasi, G. Uma, and M. Umapathy, "Pyroelectric-based solar and wind energy harvesting system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, vol. 5, no. 1, pp. 73–81, 2014.
- [29] A. C. M. De Queiroz, "Electrostatic vibrational energy harvesting using a variation of Bennet's doubler," *Midwest Symp. Circuits Syst.*, pp. 404–407, 2010.
- [30] Z. Wang, J. Du, R. Wang, W. Huang, W. Hu, J. Wu, Y. Dong, and X. He, "An enhanced energy harvesting method based on resonant current transformer for high voltage AC cable monitoring equipment," *Conf. Proc. - IEEE Appl. Power*

- Electron. Conf. Expo. - APEC*, pp. 3455–3459, 2014.
- [31] T. O. and H. L. C. R. Saha, “Optimisation of electromagnetic vibrational energy harvesting device.,” *INTERMAG 2006*, p. 599, 2006.
- [32] S. G. Burrow and L. R. Clare, “A resonant generator with non-linear compliance for energy harvesting in high vibrational environments,” *Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. IEMDC 2007*, vol. 1, pp. 715–720, 2007.
- [33] S. Wang, W. Jiang, and M. Ieee, “Quantitative Investigation of Energy Conversion in Monolithic Cantilever-Based Piezoelectric Energy Harvester,” *2014 Int. Power Electron. Appl. Conf. Expo.*, no. 51207135, pp. 1071–1075, 2014.
- [34] Q. Li, V. Naing, J. A. Hoffer, D. J. Weber, A. D. Kuo, and J. M. Donelan, “Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method,” *Proc. - IEEE Int. Conf. Robot. Autom.*, pp. 3672–3677, 2008.
- [35] B. Ando, S. Baglio, A. R. Bulsara, V. Marletta, V. Ferrari, and M. Ferrari, “A low-cost snap-through-buckling inkjet-printed device for vibrational energy harvesting,” *IEEE Sens. J.*, vol. 15, no. 6, pp. 3209–3220, 2015.
- [36] M. A. Karami and D. J. Inman, “Parametric study of zigzag micro-structures for vibrational energy harvesting,” *PowerMEMS*, vol. 21, no. 1, pp. 145–160, 2009.
- [37] Y. Rao and D. P. Arnold, “An input-powered vibrational energy harvesting interface circuit with zero standby power,” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, no. 12, pp. 3524–3533, 2011.
- [38] N. Sato, K. Ono, T. Shimamura, K. Kuwabara, M. Ugajin, S. Mutoh, H. Morimura, H. Ishii, J. Kodate, and Y. Sato, “Energy harvesting by MEMS vibrational devices with electrets,” *TRANSDUCERS 2009 - 15th Int. Conf. Solid-State Sensors, Actuators Microsystems*, pp. 513–516, 2009.
- [39] A. Bertacchini, S. Scorcioni, D. Dondi, L. Larcher, P. Pavan, M. T. Todaro, A. Campa, G. Caretto, S. Petroni, A. Passaseo, and M. De Vittorio, “AlN-based MEMS devices for vibrational energy harvesting applications,” *Solid-State Device Res. Conf. (ESSDERC), 2011 Proc. Eur.*, pp. 119–122, 2011.
- [40] G. Moayeri Pour, M. K. Benyhesan, and W. D. Leon-salas, “Solar energy harvesting with light emitting diodes,” *IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, pp. 1981–1984, 2014.
- [41] A. S. Teran, S. Member, E. Moon, S. Member, W. Lim, S. Member, G. Kim, I. Lee, D. Blaauw, J. D. Phillips, and S. Member, “Energy Harvesting for GaAs Photovoltaics Under Low-Flux Indoor Lighting Conditions,” *IEEE Trans. Electron Devices*, vol. 63, no. 7, pp. 2820–2825, 2016.
- [42] K. A. Kim, S. Kim, and F. Bien, “Fluorescent light energy harvesting using a capacitive touch screen,” *Electron. Lett.*, vol. 51, no. 21, pp. 1695–1697, 2015.
- [43] N. M. Roscoe and M. D. Judd, “Harvesting energy from magnetic fields to power condition monitoring sensors,” *IEEE Sens. J.*, vol. 13, no. 6, pp. 2263–2270, 2013.
- [44] Y. Sheng, H. Yi, Z. Jiafeng, X. Qian, S. Chaoyun, and P. Thompson, “Magnetic Field Energy Harvesting Under Overhead Power Lines,” *Power Electron. IEEE Trans.*, vol. 30, no. 11, pp. 6191–6202, 2015.
- [45] T. O. de M. Júnior, Y. P. M. Rodriguez, E. C. de S. Melo, and C. P. de Souza, “Experimental Results on Magnetic Cores for Magnetic Induction-Based Energy Harvesting,” *19th IMEKO TC 4 Symp. 17th IWADC Work. Adv. Instrum. Sensors Interoperability*, pp. 625–630, 2013.
- [46] J. Ahola, T. Ahonen, V. Sarkimaki, a Kosonen, J. Tamminen, R. Tiainen, and T.
-

- Lindh, "Design considerations for current transformer based energy harvesting for electronics attached to electric motor," *Proc. Int. Symp. Power Electron. Electr. Drives, Autom. Motion SPEEDAM 2008*, pp. 901–905, 2008.
- [47] J. P. Amaro, F. J. T. E. Ferreira, R. Cortesao, and J. Landeck, "Energy harvesting for Zigbee compliant Wireless Sensor Network nodes," *IECON Proc. (Industrial Electron. Conf.)*, pp. 2583–2588, 2012.
- [48] M. dos Santos, D. Vieira, Y. Rodriguez, P. C, T. De Moraes, and R. Freire, "Energy harvesting from magnetic field induction considering different core materials," *Proc. 2014 IEEE Int. Instrum. Meas. Technol. Conf.*, pp. 942–944, 2014.
- [49] T. C. Huang, M. J. Du, Y. C. Kang, R. H. Peng, K. H. Chen, Y. H. Lin, T. Y. Tsai, C. C. Lee, L. Der Chen, and J. L. Chen, "120% Harvesting energy improvement by maximum power extracting control for high sustainability magnetic power monitoring and harvesting system," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 4, pp. 2262–2274, 2015.
- [50] T. Huang, M. Du, Y. Yang, Y. Lee, Y. Kang, R. Peng, and K. Chen, "Non-invasion Power Monitoring with 120 % Harvesting Energy Improvement by Maximum Power Extracting Control for High Sustainability Power Meter System," in *Custom Integrated Circuits Conference (CICC)*, 2012, pp. 1–4.
- [51] P. Li, Y. Wen, Z. Zhang, and S. Pan, "A High-Efficiency Management Circuit Using Multiwinding Upconversion Current Transformer for Power-Line Energy Harvesting," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 62, no. 10, pp. 6327–6335, 2015.
- [52] J. Moon and S. B. Leeb, "Analysis Model for Magnetic Energy Harvesters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 8, pp. 4302–4311, 2015.
- [53] C. H. K. Chin, Q. Xue, and C. H. Chan, "Design of a 5.8-GHz rectenna incorporating a new patch antenna," *IEEE Antennas Wirel. Propag. Lett.*, vol. 4, no. 1, pp. 175–178, 2005.
- [54] R. J. G. and R. B. Gworek, "Yagi-Uda receiving elements in microwave power transmission system rectennas," *J. Microw. Power*, vol. 14, no. 4, pp. 313–320, 1979.
- [55] J. A. Hagerty, N. D. López, B. Popović, and Z. Popović, "Broadband rectenna arrays for randomly polarized incident waves," *2000 30th Eur. Microw. Conf. EuMC 2000*, pp. 1–4, 2000.
- [56] H. Reinisch, S. Gruber, H. Unterassinger, M. Wiessflecker, G. Hofer, W. Pribyl, and G. Holweg, "An electro-magnetic energy harvesting system with 190 nW idle mode power consumption for a BAW based wireless sensor node," *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 46, no. 7, pp. 1728–1741, 2011.
- [57] B. Strassner and K. Chang, "5.8-GHz circularly polarized rectifying antenna for wireless microwave power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 8, pp. 1870–1876, 2002.
- [58] Y. H. Suh and K. Chang, "A high-efficiency dual-frequency rectenna for 2.45- and 5.8-GHz wireless power transmission," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 50, no. 7, pp. 1784–1789, 2002.
- [59] F. Y., F. M., K. N., K. S., I. M., O. N., K. N., and I. S., "A Dual Polarization Microwave Power Transmission System for Microwave Propelled Airship Experiment," in *Proceedings of ISAP'96*, 1996, pp. 393–396.
- [60] J. Zhang and Y. Huang, "Rectennas for Wireless Energy Harvesting," pp. 1–3, 2012.
- [61] W. Wang, X. Huang, L. Tan, J. Guo, and H. Liu, "Optimization Design of an

- Inductive Energy Harvesting Device for Wireless Power Supply System Overhead High-Voltage Power Lines,” *Energies*, vol. 9, no. 4, p. 242, 2016.
- [62] T. L. V. N. Silva, B. A. Luciano, and R. C. S. Freire, “Estudos Analítico e Computacional de Sensores de Corrente Elétrica com Núcleos Toroidais,” *Simpósio Brasileiro Sist. Elétricos*, pp. 1–6, 2016.
- [63] F. das C. F. Guerra and W. S. Mota, “Modelo de Transformador de Corrente com Entreferro,” *Induscon*, pp. 1–6, 2008.
- [64] M. A. Willard, D. E. Laughlin, M. E. McHenry, D. Thoma, K. Sickafus, J. O. Cross, and V. G. Harris, “Structure and magnetic properties of (Fe_{0.5}Co_{0.5})₈₈Zr₇B₄Cu₁ nanocrystalline alloys,” *J. Appl. Phys.*, vol. 84, no. 12, p. 6773, 1998.
- [65] B. Luciano, “Materiais magnéticos: fundamentos, caracterização e aplicações eletroeletrônicas - Material complementar para a disciplina da pós graduação em Engenharia Elétrica da UFCG intitulada "Aplicações de novos materiais magnéticos na eletroeletrônica". Campina Grande, p. 158, 2015.
- [66] A. Makino, H. Men, T. Kubota, K. Yubuta, and A. Inoue, “New excellent soft magnetic FeSiBCu nanocrystallized alloys with high Bs of 1.9 T from nanohetero-amorphous phase,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 45, no. 10, pp. 4302–4305, 2009.
- [67] J. Salach, L. Hasse, R. Szewczyk, J. Smulko, A. Bieńkowski, P. Frydrych, and A. Kolano-Burian, “Low current transformer utilizing co-based amorphous alloys,” *IEEE Trans. Magn.*, vol. 48, no. 4, pp. 1493–1496, 2012.
- [68] B. A. Luciano, T. de C. Batista, R. C. S. Freire, F. das C. F. Guerra, and W. B. de Castro, “Current transformers with nanocrystalline alloy toroidal core: analytical, computational and experimental studies,” *Mater. Res.*, vol. 15, no. 5, pp. 805–808, 2012.
- [69] B. A. Luciano, “Aplicações Eletroeletrônicas de Ligas Amorfas e Ligas Nanocristalinas no Contexto das Redes Inteligentes,” in *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica CIDEL 2014*, 2014, pp. 1–6.
- [70] S. de M. Filho, *Medição de Energia Elétrica*, 3rd ed. Guanabara Dois S.A., 1983.
- [71] T. de C. Batista, “Dissertação de Mestrado: Transformador de Corrente com Núcleo de Liga Nanocristalina para Medição,” UFCG, 2010.
- [72] J. P. A. Bastos, *Eletromagnetismo para engenharia: estática e quase-estática*. Florianópolis: Editora da UFSC, 2004.
- [73] B. Saint-Jean, *Électrotechnique et machines électriques*. Montréal, 1976.
- [74] J. W. McLean, “Inductor design using amorphous metal C-cores,” *IEEE Circuits Devices Mag.*, vol. 12, no. 5, pp. 26–30, 1996.
- [75] E. C. Snelling, *Soft Ferrites: properties and applications*, 2nd ed. London, 1969.
- [76] F. das C. F. Guerra, *Modelos de Transformador de Corrente para Estudos em Baixas Freqüências*. Campina Grande, 2007.
- [77] G. R. Slemon, *Equipamentos magnetelétricos: transdutores, transformadores e máquinas*, 1st ed. São Paulo: LTC, 1974.
- [78] B. A. Luciano, J. M. C. Albuquerque, W. B. Castro, and E. R. M. Afonso, “Nanocrystalline Material in Toroidal Cores for Current Transformer : Analytical Study and Computational Simulations 2 . Analytical Study and Some Design Considerations,” *Mater. Res.*, vol. 8, no. 4, pp. 395–400, 2005.
- [79] D. Meeker, “Finite Element Method Magnetic (FEMM) user’s manual - version 4.2,” 2015.
- [80] ABNT, “NBR-5440,” pp. 1–28, 1999.
-

