



Cruzeiro do Sul Virtual
Educação a Distância

Transformadores de potência – Um olhar no núcleo “macio” sob uma perspectiva fluida

ALUNO: Daniel Campos Ramos

ORIENTAÇÃO: Prof. Me. Henrique Guilherme Montes Silva

TUTORIA: Júlio César Paes de Almeida

Engenharia Elétrica

Graduação | 2022

Olá a todos que assistem a esta apresentação de trabalho de conclusão de curso, sejam bem vindos.

Eu me chamo Daniel Campos Ramos e, sob a orientação do Professor Mestre Henrique Guilherme Montes Silva e a tutoria do professor Júlio Cesar Paes de Almeida, desenvolvi uma pesquisa intitulada:

Transformadores de potência – Um olhar no núcleo “macio” sob uma perspectiva fluida.

Nesta jornada pelo conhecimento, busquei responder a quanto tempo foi desenvolvido e se seria possível melhorar o design atual dos transformadores, aumentando a sua eficiência e utilizando métodos modernos de construção.

Tópicos a serem abordados

- Povos antigos e o magnetismo;
- Michael Faraday e o primeiro degrau;
- James Clerk Maxwell;
- Oliver Heaviside;
- Transformador de Gaulard-Gibbs ;
- William Stanley;
- Em outros locais;
- Transformadores atuais;
- Princípio de funcionamento;
- Novos trabalhos em núcleo “macio”;
- Galio e Galistânio;
- Conceito artístico do novo design;



(Fonte [1])

A pesquisa descritiva buscou compreender se seria plausível a concepção de um novo conceito para o núcleo magnético dos transformadores de potência. Visando uma maior eficiência, a utilização de metal líquido e limalhas de materiais magnéticos na composição de um novo tipo de ferro fluido para preencher este núcleo deve ser explorada.

No decorrer da pesquisa, outras questões secundárias surgiram:

Existiria a possibilidade de aprimoramento no atual projeto tendo em mente os avanços nos métodos construtivos visando aplicações do mundo real?

Seria possível usar a impressão 3D na produção destes núcleos?

O que os testes em um protótipo, com base no estudo dos elementos individuais que o compõem, podem revelar, uma vez que ele ainda não foi desenvolvido?

O formato geométrico dos materiais magnéticos empregados, e do próprio núcleo, poderiam influenciar as características magnéticas de forma positiva na aplicação em transformadores?

Com base nestes questionamentos, foram desenvolvidas algumas hipóteses:

O uso do metal líquido potencializa o desenvolvimento de novos tipos de transformadores, diminuindo os efeitos negativos e aumentando a sua eficiência;

O formato geométrico do núcleo é a causa de algumas perdas, existem outras fontes de inspiração para fundamentar o formato;

Aperfeiçoando o formato geométrico das limalhas de materiais magnéticos constituintes dos metais líquidos, melhora-se o resultado final de seu desempenho geral;

A impressão 3D em “multi-material” entrega um transformador já pronto para uso ou de fácil montagem;

A fácil variação de estado dos metais líquidos facilita a montagem prática de um transformador experimental;

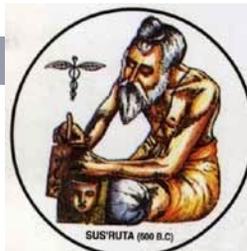
A metodologia e desenvolvimento envolveu uma pesquisa histórica em materiais didáticos, artigos e nas pesquisas científicas mais contemporâneas sobre os avanços na área específica que puderam ser encontradas disponíveis na internet em português e inglês.

Na foto, com a legenda fonte 1, o metal gálio em forma natural sólida, e vou me referir às próximas imagens apenas por este número, ignorando a palavra fonte;

Povos antigos



(Fonte [3])



(Fonte [4])



(Fonte [2])



(Fonte [5])

Os antigos povos gregos e chineses já conheciam as pedras naturalmente magnéticas e as chamavam de "magnetitas."

Estes pedaços de minerais ricos em ferro, e portanto com propriedades herdadas do metal, podem ter sido magnetizados por efeito indutivo de raios.

Os chineses descobriram primeiro que poderiam tornar uma agulha magnética ao friccionar esta contra a magnetita, e que a agulha, a partir de então, apontaria de norte a sul.

Nas ilustrações: Magnes o pastor em p&b na 2 e colorida na 3, Sus'Ruta, o cientista indiano na 4;
Na foto 5 uma bússula rudimentar chinesa;

Michael Faraday

on 29th August 1831

Michael Faraday is credited for the discovery of the electromagnetic induction

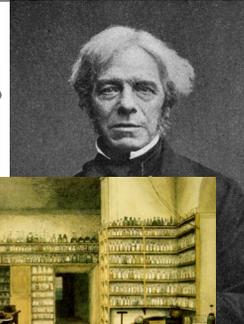


(Fonte: [7])



(Fonte: [6])

(Fonte: [8])



(Fonte: [9])



A descoberta e o estudo científico desenvolvido em 1831 por Michael Faraday, ou simplesmente Faraday, sobre o fenômeno da indução magnética, foi o primeiro dos grandes marcos na busca pela compreensão e exploração da natureza como um todo.

Dito de forma simples, Faraday descobriu que um campo magnético variável em um circuito, induz uma força eletromotriz em outro circuito; e a magnitude da força eletromotriz é igual à taxa na qual o fluxo deste campo magnético muda.

Nas ilustrações: Pintura a óleo sobre tela de Faraday em 7 e uma foto dele em P&B em 8, o primeiro dispositivo de indução eletromagnética desenvolvido por ele em 6 e óleo sobre tela de Faraday em seu laboratório em 9;

Escadaria do conhecimento em energia



(Fonte: [10])

Faraday abriu as portas para a escadaria do conhecimento em energia, feita de degraus representando algumas das mais importantes descobertas científicas na área.

Vamos agora navegar por mais alguns destes grandes passos em direção ao desenvolvimento dos transformadores ao ponto em que conhecemos hoje.

Na fotomontagem 10 uma escadaria saindo de um porão com um raio caindo ao fundo sob um céu azul escuro;

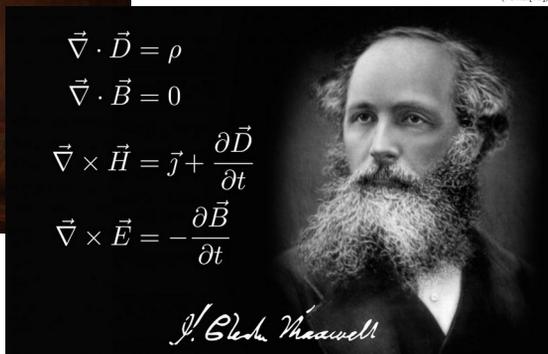
James Clerk Maxwell



(Fonte[11])

$$\begin{aligned}\vec{\nabla} \cdot \vec{D} &= \rho \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{B} &= 0 \\ \vec{\nabla} \times \vec{H} &= \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \\ \vec{\nabla} \times \vec{E} &= -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}\end{aligned}$$

(Fonte[12])



Hoje, nós as conhecemos como as “equações de Maxwell”, porém o próprio James Clerk Maxwell nunca as conheceu nesta forma simplificada que usamos nos dias atuais. Falaremos sobre isso mais adiante.

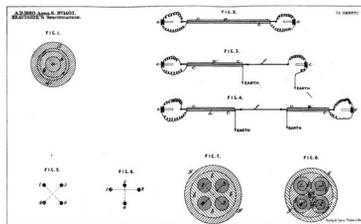
As afirmações dessas quatro equações descrevem matematicamente o fenômeno eletromagnético e são, respectivamente: o campo elétrico diverge da carga elétrica, não há polos magnéticos isolados, campos elétricos são produzidos por campos magnéticos variáveis e campos magnéticos circulantes são produzidos por campos elétricos variáveis e por correntes elétricas.

Nessas expressões, a letra grega rho representa a densidade de carga, J representa a densidade de corrente, E o campo elétrico e B o campo magnético. D e H são grandezas de campo que são proporcionais a E e B, respectivamente.

Na esquerda óleo sobre tela de James Clerk Maxwell em 11 e as equações de Maxwell, sua assinatura e retrato p&b na direita em 12;

Oliver Heaviside

$$\mathcal{L}_t [f(t)](s) \equiv \int_0^{\infty} f(t) e^{-st} dt,$$



(Fonte [13])



(Fonte [14])

Entre outras coisas, como os cabos coaxiais e alguns tipos de isolantes, ele simplesmente desenvolveu o conceito de “operadores”, que pôde então ser utilizado para reduzir equações diferenciais extremamente complicadas a equações algébricas simples, uma técnica que todo engenheiro electricista hoje conhece como a “Teoria da Transformada de Laplace”.

Muitos problemas matemáticos são resolvidos usando estas transformações. A ideia geral é transformar um problema complexo em outro problema mais fácil de resolver.

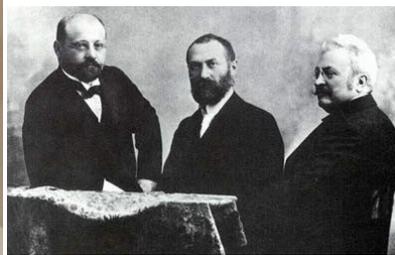
Em 1873, Maxwell publicou um conjunto de 20 equações que contava com 20 variáveis diferentes. Este conjunto era de difícil entendimento, o que tornou a teoria de Maxwell lenta para ser aceita.

Em 1884, no entanto, ao desenvolver a “transformada de Laplace”, que como todas elas, transforma um sinal em outro de acordo com um conjunto fixo de regras ou equações, o não tão conhecido Oliver Heaviside foi quem, não só foi capaz de compreendê-las, bem como também simplificou-as às 4 equações algébricas mais simples com variáveis em comum que conhecemos hoje como as equações de Maxwell.

A técnica matemática foi batizada em homenagem ao grande matemático francês Pierre Simon De Laplace, que viveu entre 1749 e 1827.

Nas ilustrações: A formulação da teoria da transformada de Laplace, em 13 o diagrama da patente de nº mil 407 de um cabo coaxial, por Heaviside e Oliver Heaviside colorizado em 14;

Enquanto isso no mundo...



(Fonte: [16])

(Fonte: [15])

Os cientistas do Império Austro-Húngaro, me perdoem adiantadamente a pronúncia errática, Ottó Bláthy, Miksa Déri e Károly Zipernowsky, que chamaremos apenas pelas iniciais de seus sobrenomes ZBD, foram os primeiros a projetar e usar um transformador em sistemas comerciais experimentais em 1878.

Foi apenas mais tarde que Lucien Gaulard, Sebastian Ferranti e posteriormente William Stanley aperfeiçoaram o design do equipamento.

Nas fotos: O primeiro transformador ZBD experimental de 1885 em 15 e os 3 inventores austro-húngaros dele em 16;

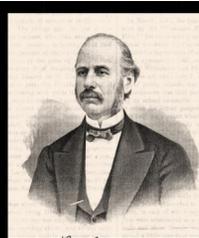
Lucien Gaulard e John Dixon



(Fonte [17])



Lucien Gaulard



John Dixon Gibbs

(Fonte [18])

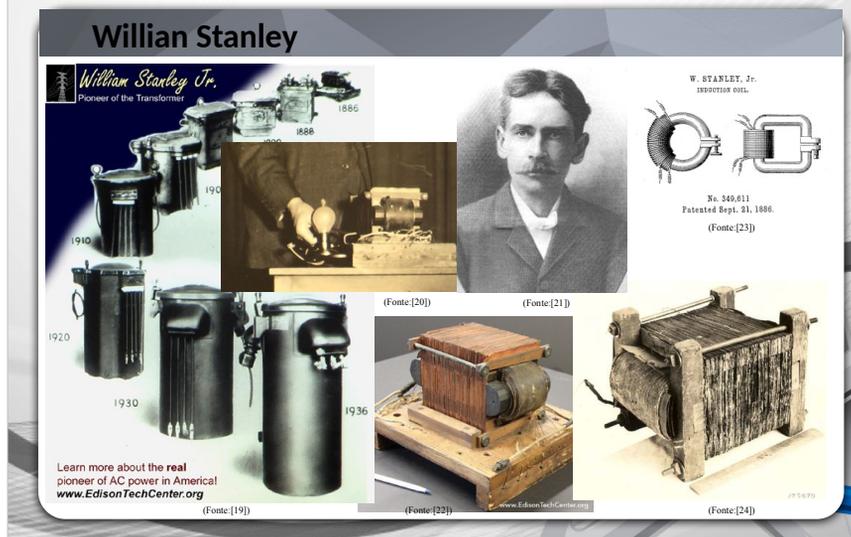
Foi apenas no final do século 19 que os transformadores passaram a desempenhar um papel crucial nos sistemas de distribuição de corrente alternada, ou "C.A.", sistemas estes que substituíram em um curto espaço de tempo a corrente direta, ou C.D., durante o século 20.

O primeiro transformador elétrico comercial prático, conhecido hoje como Gaulard-Gibbs, era composto por uma base e tampo de mogno, com quatro hastes de aço, envolvendo uma pilha de discos de cobre, estes separados por papel encerado usado como isolante.

Cada disco tinha uma etiqueta de metal alternadamente pintada de preto ou vermelho. As etiquetas pretas e vermelhas eram conectadas entre si, formando dois circuitos elétricos distintos.

No centro, existia um núcleo deslizante central de ferro que terminava em um grande botão niquelado.

Na foto 17 o transformador Gaulard-Gibbs descrito e na ilustração p&b 18 Lucien Gaulard e John Dixon Gibbs;



As propriedades da indução foram descobertas por Faraday na década de 1830, mas não foi até 1886, quando William Stanley, trabalhando para a Westinghouse, construiu o primeiro transformador comercialmente viável e confiável.

Seu rememorável trabalho foi construído sobre os fundamentos de alguns projetos rudimentares da Ganz Company na Hungria, como o transformador ZBD de 1878, e os transformadores Gaulard-Gibbs, da Inglaterra, e era constituído por laminações de aço enfileiradas, formando o núcleo magnético e envolvendo a bobina.

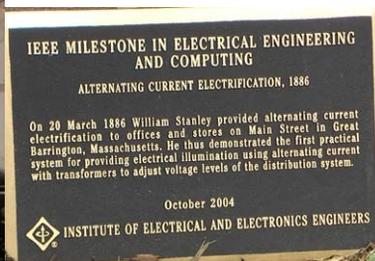
Nas ilustrações e fotos:

- *Em 19 a evolução dos transformadores de Stanley;
- *Em 20 uma demonstração do primeiro transformador Stanley com uma lâmpada em funcionamento;
- *Em 21 Willian Stanley;
- *Em 22 e 24 os transformadores de 1885 e 1886, respectivamente;
- *Em 23 Parte do diagrama da patente nº 349 mil 611 de um dispositivo de indução de 1886, por Stanley;

Reconhecimento à Stanley



(Fonte:[25])



(Fonte:[26])

A Medalha Edison é concedida pelo Instituto de Engenheiros Eletricistas e Eletrônicos, ou IEEE, abre aspas "por uma carreira de realizações meritórias em ciência elétrica, engenharia elétrica ou artes elétricas." fecha aspas.

É a mais antiga e prestigiosa medalha neste campo da engenharia nos Estados Unidos.

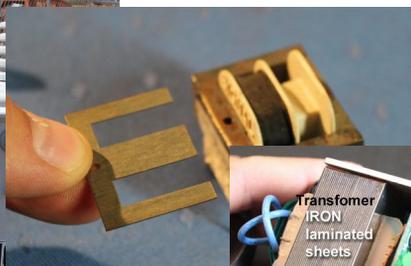
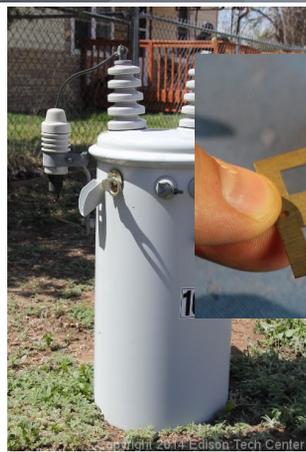
Nomeada em homenagem ao inventor e empresário Thomas Edison, a medalha foi criada em 11 de fevereiro de 1904 por um grupo de amigos de Edison.

Quatro anos após a sua criação, o American Institute of Electrical Engineers, ou AIEE, entrou em acordo com o grupo para conceder a medalha como seu mais distinto prêmio.

A quarta medalha Edison foi concedida em 1912 a Stanley em reconhecimento pelo seu trabalho.

Nas fotos: Em 25 a sala de transformadores Stanley refrigerados a ar de 1895 e em 26 uma placa comemorativa da medalha Edison de Stanley;

Atualmente...



As iterações iniciais de um transformador iniciaram a ser utilizadas de forma comercial na Austro-Hungria entre 1878 e 1880, e na Inglaterra de 1882 em diante.

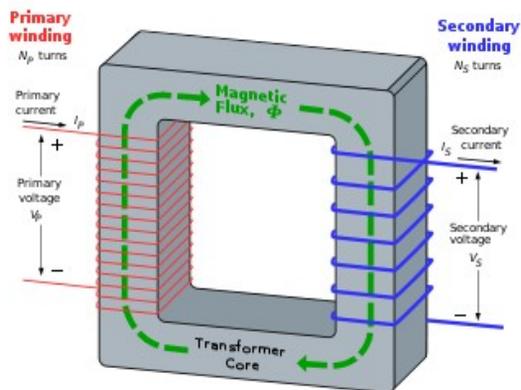
Lucien Gaulard empregou seu sistema de C.A. para a revolucionária exposição elétrica de Lanzo a Turim em 1884, no norte da Itália.

O primeiro sistema de energia de C.A. que usou o “transformador moderno” foi instalado em Great Barrington, Massachusetts, apenas 8 anos após a introdução destes equipamentos no mercado europeu, em 1886.

Estes desenvolvimentos se deram a mais de um século, e o primeiro transformador comercial rudimentar (ZBD) já tem mais de 140 anos.

Nas fotos: Em 27 um transformador de distribuição moderno a óleo, a laminação metálica em E que compõe um transformador moderno em 28 e em 29 um transformador doméstico típico com o núcleo laminado montado;

Antigo princípio básico atual



(Fonte:[30])

A estrutura de um transformador de potência atual é montada com o metal laminado em chapas finas e cortado com formas geométricas de cantos vivos.

Estas chapas são afixadas juntas em um tipo de carcaça formando o núcleo magnético.

As bobinas do transformador são então enroladas no núcleo magnético empregando condutores, para produzir os transformadores.

Na ilustração 30 o diagrama de funcionamento básico de um transformador;

Gálio e Galistânio

(Fonte [31])



(Fonte [32])



(Fonte [33])

Abundância (mg/kg)	19	Numero Atômico	31	Ponto de Fusão(°C)	420
Estado de oxidação	+2 +3			Ponto de Ebulição(°C)	907
Massa Atômica	69,723 (1)			Densidade(g/cm ³)	7,13
Configuração Eletrônica	[Ar]3d ¹⁰ 4s ¹			Símbolo	GA

(Fonte [34])



Com os estudos mais recentes a que se teve acesso, pois a maioria se encontra blindada por detrás de uma taxa proibitiva para o escopo desta pesquisa, pôde-se verificar que o momento magnético fluante presente nos metais fluidos pode ser um grande aliado na luta contra os efeitos indesejados produzidos pelo fenômeno da indução magneto-elétrica em transformadores.

Além de se encontrarem em forma líquida a temperatura ambiente, possuem altíssimo ponto de fusão e um ponto de solidificação razoável.

Sem toxicidade extrema ao meio ambiente e mais fáceis de conter, tem o potencial de eliminar a necessidade do uso de qualquer tipo de óleo para refrigeração, minimizando ou eliminando assim, possíveis desastres ambientais em caso de falhas catastróficas.

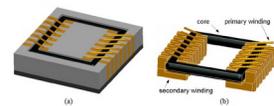
O uso em conjunto com limalhas de elementos magnéticos, conforme os estudos similares comprovaram, poderá levar à amplificação controlada de quaisquer características que se desejar obter destes transformadores sem alterar a carcaça do núcleo.

O estudo de variados formatos geométricos tem o potencial de levar ao aperfeiçoamento ainda maior destas características, tanto do núcleo quanto das limalhas, que poderão trabalhar suspensas em óleo ou em novas ligas metálico-fluídicas a serem desenvolvidas.

Nas fotos e ilustrações: Na foto 31 o metal gálio em transição de sólido para líquido e em estado líquido na mão, na 32 sendo derramada em um vasilhame de metal, na ilustração 33 a descrição atômica do gálio e suas propriedades e na foto 34 cristais da liga galistânio em estado sólido;

Estudos atuais

Figure 6. The schematic diagram of solenoid type transformer: (a) the whole structure, (b) the perspective diagram.



(Fonte: [35])



Figure 3. Inductor (a) filled with colored water to verify fluidic isolation and (b) after final fill with liquid metal and ferrofluid

(Fonte: [38])



Figure 5. Ferrofluid inductor strain testing

(Fonte: [37])

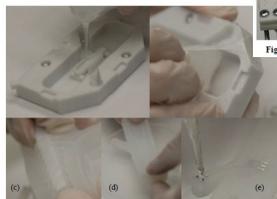


Figure 1. Fabrication process: (a) pour silicone elastomer into mold, (b) cure completely and remove, (c) pull out base defining ferrofluid core (d) seal top and bottom to partially cured silicone and (e) fill with liquid metal and ferrofluid

(Fonte: [36])

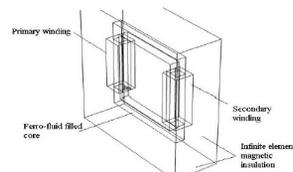


Figure 2. The 3D design of the transformer.

(Fonte: [39])

A pesquisa nos artigos mais atuais respondem, ainda que superficialmente, a questão inicial e demonstra que as inovações são viáveis e versáteis.

A utilização de ferro fluido e outros tipos de núcleo “macios” sólidos em escala maior também se mostrou muito eficaz.

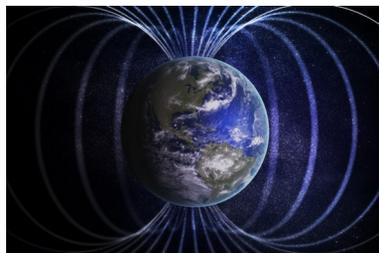
Os métodos de cálculos da perda atuais também carecem de revisão, pois preveem uma perda muito maior do que a observada nos testes práticos, estes novos métodos de cálculo podem e devem ser utilizados a favor do desenvolvimento de novos desenhos e formas fazendo uso de uma melhor precisão no modelo matemático.

Com isso, a pesquisa resultou em algumas descobertas:

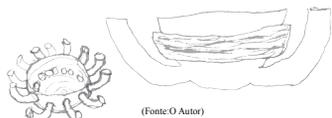
- Com o estudo histórico ficou claro o curto espaço de tempo e a rapidez com que os avanços sobre o eletromagnetismo em geral ocorreram;
- A história mostra também que não se compreendia muito os fenômenos no início, mas o que pareciam ser forças da natureza distintas, na verdade são a mesma força;
- As descrições matemáticas dos fenômenos se mostraram cruciais para o início da engenharia dos dispositivos;
- As descobertas levaram a rápida adoção do transformador como o sistema vascular da energia em C.A.;
- A preocupação com a causa dos efeitos negativos somados surgiu logo, visando a eficiência e a facilidade de fabricação;
- O desenho foi aperfeiçoado aos limites das técnicas construtivas disponíveis à época, visando menor desperdício e maior eficiência tanto construtiva quanto de funcionamento;
- Todo o processo entre o surgimento e a consagração do atual design ocorreu em menos de 10 anos, no final de 1800, permitindo o desenvolvimento e adoção do sistema C.A. como o melhor para distribuição e comercialização em larga escala de energia elétrica;
- Os métodos de cálculo para as perdas deve ser aperfeiçoado visando uma melhor predição na engenharia de dispositivos;
- Estão acessíveis, ou sequer existem, poucas pesquisas sobre as propriedades magnéticas do ferro fluido, menos ainda sobre o gálio e praticamente nenhuma sobre ligas metálicas líquidas;
- O uso de óleo como meio é uma preocupação ambiental (no caso do ferro fluido a base de óleo);
- Os resultados para núcleos "macios" sempre se mostram melhores quando a frequência testada é mais alta;
- Nenhum artigo científico sobre o formato geométrico e a influência dele no comportamento magnético dos materiais envolvidos ou do núcleo foi encontrada;

Nas fotos e ilustrações: Em 35 ilustração de um micro transformador, em 38 um transformador maleável, em 36 o molde de fabricação deste transformador, em 37 fotos dos testes de maleabilidade deste transformador maleável e em 39 o diagrama da simulação computadorizada do transformador de ferro fluido a base de óleo;

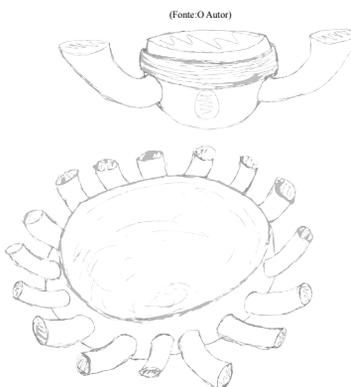
Conceito artístico - Transformador abóbora "Pumpkin"



(Fonte [40])



(Fonte: O Autor)



(Fonte: O Autor)

(Fonte: O Autor)

Conclusão - O que foi descoberto?

- Os objetivos foram parcialmente atingidos, tendo em vista que as pesquisas dos componentes vislumbrados apresentaram resultados promissores, porém, há a necessidade de trabalhos e estudos futuros para determinar a sua viabilidade e melhores configurações;
- Conforme este estudo apontou, a proposta de desenvolvimento de novos tipos de transformadores com núcleo fluido, que hoje está em seus estágios iniciais, se mostrou atual e promissora;
- A utilização de ferro fluido e as variantes apresentadas é, sem sombra de dúvidas, funcional, porém faltaram recursos financeiros e de tempo hábil para desenvolver os protótipos e efetivar os testes e medições neste estudo;
- As diversas configurações de núcleo fluido devem, também, ser exploradas, como o uso de gálio, galistânio, ligas metálicas e ferro fluídos à base destes como alternativa ao óleo como meio;
- Todos os formatos geométricos devem ser investigados para selecionar os que mais são interessantes neste tipo de aplicação;

Uma reflexão sobre a natureza foi o ponto de partida para conceitualizar um novo formato de transformador, denominado "pumpkin", em inglês, ou abóbora em português.

Inspirado pelas propriedades líquidas do núcleo e o formato do campo magnético gerado por ele no planeta terra, surgiu a ideia de um núcleo magnético de formato não usual, tendo o potencial de desempenho superior ao atual.

Ao se observar o formato do campo magnético terrestre, notam-se várias linhas de campo semi-toroidais entrando e saindo da massa planetária em determinados pontos e ângulos, que devem ser estudados e testados na fabricação prática deste protótipo de núcleo.

A modelagem e impressão em 3D dos hemisférios, selos e encaixes, aliadas ao método de montagem em ambiente resfriado ao ponto de solidificar o preenchimento de metal líquido destes hemisférios do núcleo, são os procedimentos idealizados pelo autor para trazer o protótipo ao mundo real.

Nas ilustrações: Em 40 uma ilustração do campo magnético da terra, no canto superior direito e ao centro embaixo, conceitos artísticos desenvolvidos pelo autor do enrolamento da bobina no hemisfério do núcleo e abaixo nos cantos conceitos artísticos de um hemisfério do núcleo do transformador "pumpkin";

"Se nós soubéssemos o que estamos fazendo, isso não se chamaria pesquisa." - Albert Einstein.

Obrigado!



Cruzeiro do Sul Virtual
Educação a Distância

"Informação é poder. Mas como todo poder, existem aqueles que querem mantê-lo para eles mesmos." - Aaron Swartz*.

*O MENINO da Internet: A História de Aaron Swartz. Direção: Brian Knappenberger. Roteiro: Brian Knappenberger. Estados Unidos da América. FilmBuff, Participant, Luminant Media (in association with), Unjustus Films (in association with), 2014. Disponível em: <<https://archive.org/details/TheInternetOwnBoyTheStoryOfAaronSwartz/>>. Acesso em: 1/10/2022.

Obrigado pela sua atenção e paciência em me acompanhar na apresentação desta pesquisa.

A seguir virão as referências de todas as imagens utilizadas nesta apresentação.



Referências 1/3

- [1] LAVINSKY, Rob. [Sem título] 2022. 1 fotografia. iRocks.com. Disponível em: <https://www.gemrockauctions.com/learn/a-z-of-gemstones/magnetite>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [2] APEX MAGNETS (ed.). [Sem título] 18 ago. 2016. 1 ilustração p&b. Disponível em: <https://www.apexmagnets.com/news-how-tos/the-legend-of-magnets-the-shepherd/>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [3] BIANCHETTI, Stefano (ed.). Electrical phenomena: magnetism was discovered in Antiquity. The Greek shepherd Magnes could not detach his iron stick from the ground. He found that this phenomenon came from the attraction of a stone called magnetic oxide or magnetic oxide. Private collection: Anonymous illustration from 1925. 2022. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.bridgemanimages.com/en/anonymous/electrical-phenomena-magnetism-was-discovered-in-antiquity-the-greek-shepherd-magnes-could-not-detach-his-iron-stick-from-the-ground-he-found-that-this-phenomenon-came-from-the-attraction-of-a-stone-called-magnetic-oxide-or-magnetic-oxide-private-collection-anonymous-illustration-from-1925>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [4] MAISONET, Josephine (ed.). [Sem título] 2022. 1 fotografia. Disponível em: http://www.faziao.pro.br/linha_tempo.htm. Acesso em: 30 out. 2022.
- [5] ELEMENTS OF ELECTRICAL ENGINEERING BLOG (ed.). [Sem título] 26 out. 2014. 1 ilustração. Disponível em: <http://elementsofelectricalengineering.blogspot.com/2014/10/historical-background-of-magnetism-and.html>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [6] THE BUTROUS FOUNDATION. [Sem título] 2022. 1 ilustração.
- [7] SILVA, Ruan Bitencourt (ed.). [Sem título] 4 out. 2020. 1 fotografia colorizada. Disponível em: <https://universonalista.org/as-doze-mentes-mais-brilhantes-da-historia-da-quimica/>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [8] WATKINS, John. Photograph of Michael Faraday. 1 jan. 1922. 1 fotografia p&b. Disponível em: <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=2525521>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [9] MOORE, Harriet. Michael Faraday in his laboratory at the Royal Institution, in the 1800s. 22 set. 2016. 1 Pintura aquarela em tela. Disponível em: <https://earthsky.org/human-world/today-in-science-michael-faraday/>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [10] PXFUEL. Bolt, lightning, staircase, rise, stairs, gradually, high, stone stairway, railing, go up. 2022. 1 fotomontagem. Disponível em: <https://www.pxfuel.com/en/free-photo-ojqaq>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [11] CAMPBELL, Reginald Henry. James Clerk Maxwell (1831–1879). FRSE. The Royal Society of Edinburgh, 1 jan. 1991. 1 Pintura a óleo em tela. Disponível em: <https://artuk.org/discover/artworks/james-clerk-maxwell-18311879-frse-186215>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [12] AGUILAR, Esteban (ed.). [Sem título] 16 set. 2020. 1 fotografia com as equações de Maxwell. Disponível em: <https://energiainteligenteuff.com.br/biografia/maxwell-o-cientista-que-revolucionou-os-estudos-sobre-eletromagnetismo/>. Acesso em: 30 out. 2022.



Referências 2/3

- [13] WAVEFORM BLOG (ed.). [Sem título] 6 abr. 2016. 1 diagrama de patente. Disponível em: <https://www.waveform.com/blogs/main/146807175-oliver-heaviside-and-the-coaxial-cable>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [14] TODAY IN SCIENCE HISTORY. Oliver Heaviside. 1 jan. 2022. 1 fotografia colorizada. Disponível em: https://todayinsci.com/H/Heaviside_Oliver/HeavisideOliver-Quotations.htm. Acesso em: 30 out. 2022.
- [15] EDISON TECH CENTER. [Sem título]. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [16] EDISON TECH CENTER. Ottó Bláthy, Miksa Déri, Károly Zipernowsky created the "Z.B.D Transformer". 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [17] EDISON TECH CENTER. [Sem Título]. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [18] SMART ENERGY INTERNATIONAL. The History of the Meter: Part 2. 28 jun. 2006. 2 fotografias juntas. Disponível em: <https://www.smart-energy.com/features-analysis/the-history-of-the-electricity-meter/>. Acesso em: 30 out. 2022.
- [19] EDISON TECH CENTER. The progression and advancement of the transformer over the years. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [20] EDISON TECH CENTER. E.W. Rice Jr (2nd president of General Electric) powers a lightbulb using William Stanley's original 1885 transformer. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [21] EDISON TECH CENTER. William Stanley (USA). 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [22] EDISON TECH CENTER. William Stanley's First Transformer built in 1885. Single phase AC power. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [23] JR., W. Stanley. Induction Coil. Titular: William Stanley Jr. 349.611. Depósito: 23 out. 1885. Concessão: 21 set. 1886. Disponível em: <<https://patents.google.com/patent/US349611>>. Acesso em: 13 out. 2022.
- [24] EDISON TECH CENTER. Stanley's first transformer which was used in the electrification of Great Barrington, Massachusetts in 1886. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [25] EDISON TECH CENTER. 1895 Air cooled transformers built by William Stanley for a three phase AC power station. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [26] EDISON TECH CENTER. Stanley IEEE Milestone plank. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.



Referências 3/3

- [27] EDISON TECH CENTER. Large transformer used for residential power service. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [28] EDISON TECH CENTER. The modern E-core transformer is based on Stanley's design. Iron plates stamped in an E shape can be inserted from both sides of the winding. 2014. 1 fotografia. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/Transformers.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [29] EDISON TECH CENTER. Typical Wall Transformer. 2003. 1 fotografia ilustrada. Disponível em: <https://edisontechcenter.org/iron.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [30] BHATTACHARYA, Debjoy (ed.). Construction of transformer. 7 nov. 2012. 1 ilustração. Disponível em: <https://pt.slideshare.net/debjoybubai/construction-of-transformer>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [31] ETSY (ed.). 99.99% Purity 10g Gallium metal Element 31. Low Melting Point Metal Educational DIY Toy Magic Refined In Your Hand Magic 29.79c. 2022. 2 fotografias juntas. Disponível em: <https://www.etsy.com/listing/985914918/9999-purity-10g-gallium-metal-element-31>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [32] ALIBABA (ed.). Gallium 67, gallium puro, preço do gallium por gramas. 2022. 1 fotografia. Disponível em: <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/Gallium-67-Pure-Gallium-Price-Of-60618257129.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [33] BLOG FAMILIA BORO (ed.). Gálio. Segundo semestre de 2016. 1 ilustração. Disponível em: <http://familiaboro.blogspot.com/2017/02/galio-indio-e-talio.html>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [34] SCIENCECOMPANY. Gallium, 99.99%, 50g. 2022. 1 fotografia. Disponível em: <https://www.sciencecompany.com/Assets/ProductImages/nc13960Bn-lg.jpg>. Acesso em: 29 out. 2022.
- [35] TSAI, Tsung-Han; KUO, Long-Sheng; CHEN, Ping-Hei; LEE, Da-sheng; YANG, Chin-Ting. Applications of Ferro-Nanofluid on a Micro-Transformer. *Sensors*, [S. 1], ano 2010, v. 10, n. 9, 31 ago. 2010. Chemical Sensors, p. 8161-8172. DOI 10.3390/s100908161. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1424-8220/10/9/8161>. Acesso em: 20 out. 2022.
- [36][37][38] LAZARUS, N.; MEYER, C. D. Ferrofluid-based Stretchable Magnetic Core Inductors. *Journal of Physics: Conference Series*, [S. 1], ano 012007, v. 660, p. 1-6, 4 dez. 2015. DOI 10.1088/1742-6596/660/1/012007. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/660/1/012007>. Acesso em: 21 out. 2022.
- [39] HATEM, Sude; KURT, Erol. The simulation of a new high frequency transformer. *Journal of Energy Systems*, [S. 1], ano 2022, v. 6, n. 2, 30 jun. 2022. *Research Articles*, p. 322-337. DOI 10.30521/jes.1123925. Disponível em: <https://dergipark.org.tr/en/pub/jes/issue/70249/1123925>. Acesso em: 23 out. 2022.
- [40] HENRIQUEZ, Pamela (ed.). A magnetosfera é o nome dado ao campo magnético do nosso planeta. Ele atua como um escudo protetor para a atmosfera contra as partículas de alta energia que chegam do Sol. 2 set. 2021. 1 ilustração. Disponível em: <https://www.tempo.com/noticias/ciencia/mudancas-climaticas-e-campo-magnetico-da-terra-existe-uma-relacao.html>. Acesso em: 30 out. 2022.