

## **SUPERCONDUTIVIDADE E APLICAÇÕES: UMA NECESSIDADE DE INSERÇÃO NOS CURRÍCULOS DOS CURSOS DE ENGENHARIA**

**Laura de Oliveira Carraro** – laura.o.carraro@gmail.com

**Ângelo Rocha de Oliveira** – a.oliveira@ieee.org

**Marlon Jose do Carmo** – marloncarmo@ieee.org

**José Evaristo Rodrigues Costa** – jercosta@leopoldina.cefetmg.br

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais CEFET-MG

Rua José Peres, 558, Campus III,

36.700-000 – Leopoldina – MG

***Resumo:** Nesse trabalho analisam-se as descobertas, conceitos introdutórios e aplicações de uma nova tecnologia: a Supercondutividade. Esse tema tem sido alvo de grandes pesquisas científicas e está sendo utilizado para melhorias nas mais diversas áreas, como engenharia biomédica, engenharia de transporte, armazenamento, distribuição e transmissão de energia elétrica, entre outros. Sendo assim, é de grande importância que os cursos de Engenharia se adaptem a essa realidade oferecendo aos seus discentes, disciplinas que tenham como alvo o ensino desse fenômeno físico. Porém, para a inserção deste novo tema nos currículos destes cursos de graduação, é necessária uma flexibilidade na estrutura curricular, que pode ser obtida com a inserção de disciplinas optativas nas grades curriculares, ou até, gradativamente, à medida que as pesquisas se consolidam no país, o oferecimento de disciplinas obrigatórias.*

***Palavras-chave:** Educação em Engenharia, Engenharia de materiais, Estrutura curricular, Supercondutividade.*

### **1 INTRODUÇÃO**

No início do século XX primórdios de uma nova tecnologia começaram a aparecer, foi quando pesquisadores começaram a descobrir o fenômeno da supercondutividade, que hoje é base de estudos nas mais variadas áreas como: armazenamento, distribuição e transmissão de energia elétrica, transporte, biomedicina, etc.

Mesmo que este fenômeno não esteja definitivamente esclarecido (existem várias teorias que buscam explicá-lo), várias empresas, reconhecidas mundialmente, já comercializam produtos fabricados com materiais supercondutores, que são potencialmente aplicáveis em vários setores.

Uma vez que o fenômeno da supercondutividade está se infiltrando nas mais variadas áreas, os currículos dos cursos de engenharia precisam ser atualizados, para que os alunos tenham uma formação fidedigna às necessidades do mercado atual.

Hoje, vários cursos de graduação já inserem esse tema nos currículos, seja em matérias optativas ou matérias obrigatórias.

O presente trabalho está dividido da seguinte forma: a seção 2 apresenta conceitos dos fenômenos da supercondutividade e as mais diversas áreas de aplicações deste fenômeno; a

seção 3 discute a Flexibilidade nos Currículos de Engenharia e abordam-se alguns cursos que inserem esse tema nos currículos. A seção 4 conclui este trabalho.

## 2 A SUPERCONDUTIVIDADE

Em 1911 (em Leiden, na Holanda), Heike Kamerlingh Onnes, descobriu que a resistência (à passagem de corrente elétrica) do mercúrio era zero quando este material era submetido à temperatura de 4,2K. Três anos antes, a equipe por ele liderada, havia obtido a liquefação do gás hélio, que ocorre a mesma temperatura, 4,2K (-268,936°C).

Em 1914, Onnes observou que um material deixava de ser supercondutor se fosse submetido a um campo magnético externo superior ao campo crítico ( $H_c$ ), mesmo se a temperatura tendesse a 0K. Esta descoberta possibilitou verificar que também havia uma densidade de corrente elétrica crítica ( $J_c$ ) que, caso superado, seria responsável pela transição para o estado normal (SOTELO et al., 2009). Estavam, então, descobertos alguns parâmetros relacionados à supercondutividade: temperatura crítica ( $T_c$ ), campo magnético crítico ( $H_c$ ) e densidade de corrente elétrica crítica ( $J_c$ ).

No ano de 1986 (em Zurique, na Suíça), J. G. Bednorz e K. A. Müller descobriram a supercondutividade acima de 30 K em um óxido cerâmico contendo lantânio, bário e cobre. Através desta descoberta, deu-se início aos estudos dos chamados supercondutores de alta temperatura crítica (*High temperature superconductors – HTS*) que iriam, mais tarde, superar os até então conhecidos supercondutores de baixa temperatura crítica (*Low temperature superconductors - LTS*).

Antes do final de 1986, os cientistas tinham verificado o começo da supercondutividade a 93 K no óxido de ítrio-bário-cobre ( $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ ). E com o passar dos anos novos materiais supercondutores de alta temperatura crítica foram descobertos, como por exemplo, os compostos à base de bismuto (Bi-Sr-Ca-Cu-0), de tálio (Tl-Ba-Ca-Cu-0) e mercúrio (Hg-Ba-Ca-Cu-0). Estes materiais apresentam as mais elevadas temperaturas críticas conhecidas (IRJALA et al., 2011).

Com a descoberta dos supercondutores de alta temperatura crítica a aplicação da supercondutividade se tornou economicamente mais viável porque se pode usar nitrogênio líquido (que tem um preço acessível) como refrigerante, lembrando que hélio líquido (utilizado nos LTS) possui um preço muito mais alto (DIAS et al., 2009).

Os materiais supercondutores são divididos em dois grupos: Tipo I e Tipo II. Esta divisão tem a ver com as diferentes respostas dos materiais supercondutores quando estes são submetidos a campos magnéticos. Nos materiais supercondutores do Tipo I quando o valor do campo magnético crítico ( $H_c$ ) é atingido, a magnetização vai a zero e o material passa para a fase normal, deixando de ser um supercondutor, a “Figura 1-a” exemplifica esse comportamento.

Nos materiais supercondutores do Tipo II, nota-se a presença de um estado misto, que na “Figura 1-b” compreende a região que vai de  $H_{c1}$  até  $H_{c2}$ . O estado misto é caracterizado pela existência de regiões normais e supercondutoras no interior do material supercondutor. Nesse tipo de material quando  $H_{c1} < H_c$  ocorre o Efeito Meissner (é caracterizado pela exclusão do fluxo magnético do interior de um material supercondutor). Na região de  $H_{c1}$  até  $H_{c2}$  o fluxo magnético não está totalmente expulso do material e penetra, parcialmente, no interior do material. Quando  $H > H_{c2}$  a magnetização se anula e o material perde as características de um supercondutor (DIAS et al., 2009).

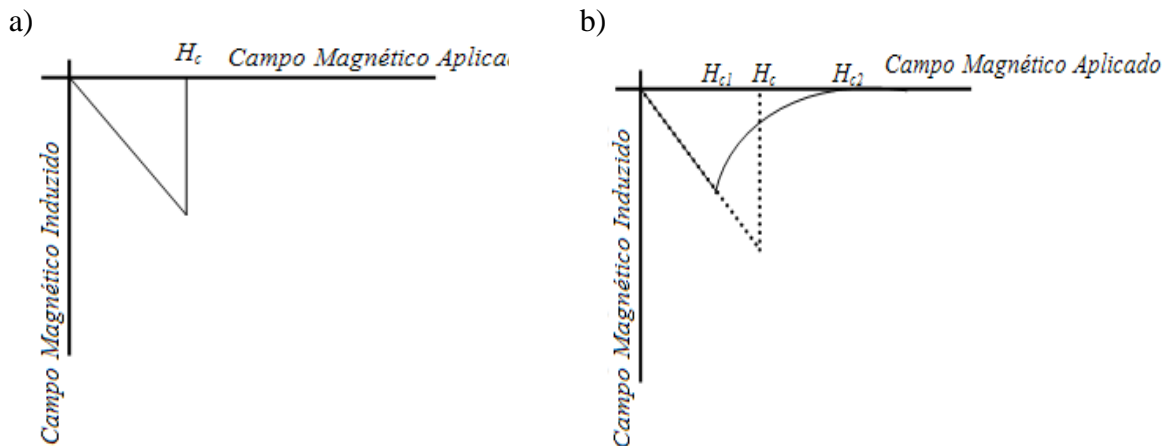


Figura 1 - Comportamento magnético de um supercondutor do a) Tipo I e b) Tipo II.

Por enquanto não há uma teoria definitiva que explique o fenômeno da supercondutividade por este motivo, existem vários físicos que propõem modelos que definem o fenômeno, tais como: Modelo de London, Modelo de London – Pippard, Modelo de 2 Fluidos etc (SASS, 2011).

## 2.1 A Supercondutividade nas diversas áreas

### *Armazenamento de energia elétrica*

Uma das maiores limitações das pesquisas tecnológicas é o armazenamento de energia. Para que se aproveite, plenamente, um determinado tipo de energia, o sistema de armazenagem deve ser econômico e seguro.

Pode-se citar como exemplo a energia eólica. Sabe-se que esse tipo de energia não é constante, em determinados períodos do ano ocorrem muitos ventos, porém, em outros períodos, os ventos são escassos. Sendo assim, em um sistema que precisa fornecer uma quantidade de energia constante, é necessária a utilização de dispositivos que armazenem a energia produzida. Portanto, quando a produção de energia for maior do que a demanda pode-se armazenar o excedente (que será utilizado quando a situação for oposta).

Os armazenadores supercondutores de energia, SMES (*Superconducting Magnetic Energy Storage*), são promissores para resolver estes problemas de armazenamento de energia.

A tecnologia SMES é baseada na habilidade dos supercondutores de transportar elevadas correntes DC (corrente contínua), com perdas resistivas próximas de zero, na presença de significativos campos magnéticos, não armazenando diretamente a energia elétrica (“Figura 2”). A bobina supercondutora atua armazenando energia no campo magnético gerado pela circulação de corrente. Sendo a bobina um indutor  $L$ , a energia armazenada  $E$  é proporcional ao quadrado da corrente  $I$  que circula na bobina, conforme Equação (1).

$$E = \frac{1}{2} LI^2 \quad (1)$$

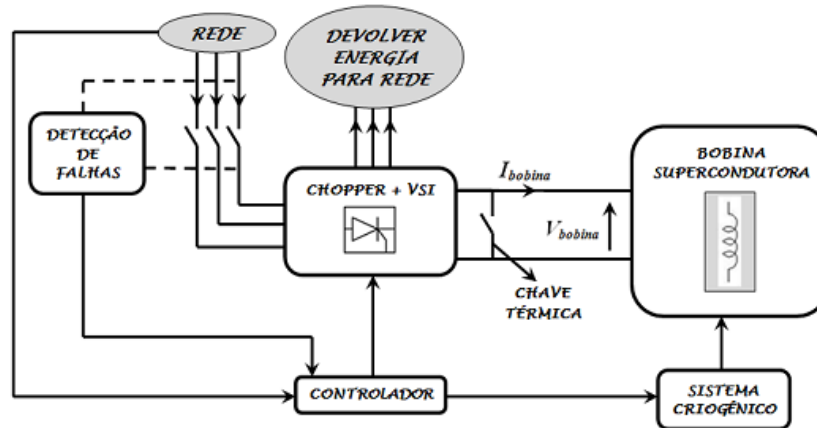


Figura 2 - Sistema Típico SMES.

## Engenharia de Transporte

Há mais de cinquenta anos estudam-se transportes ferroviários utilizando levitação. São os chamados trens MAGLEV (*Magnetic Levitation Transport*). Através da levitação pode-se eliminar o atrito entre as rodas e o trilho, atingindo velocidades superiores a 450 km/h (STEPHAN, 2010).

Existem diversas técnicas de levitação, dentre as quais podemos citar: eletromagnética, elétrica e mecânica. Um dos métodos de levitação magnética é o método de Levitação Supercondutora (SQL). Como o próprio nome diz, utilizam-se as propriedades dos materiais supercondutores (aliadas a outras tecnologias) para garantir a levitação.

Vários países como China, Alemanha e Brasil estão desenvolvendo protótipos de trens MagLev. No Brasil, o Laboratório de Aplicações de Supercondutores (LASUP) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) está implementando um trem de levitação supercondutora, chamado MagLev Cobra, conforme “Figura 3”.



Figura 3 - Protótipo do MagLev Cobra COPPE/UFRJ.

O sistema MagLev Cobra operará sem transmissão de poluentes, será movido por energia elétrica. A tração é obtida através da ação de um motor linear.

## *Engenharia Biomédica*

A medicina também se beneficia dos avanços tecnológicos dos materiais supercondutores. Uma das mais importantes aplicações consiste no uso de bobinas supercondutoras para a obtenção de imagens por ressonância magnética (*IRM*). Essa técnica utiliza ímãs superpotentes (fabricados com uma liga de germânio e nióbio,  $Nb_3Ge$ ), que quando submetidos a temperaturas de 23K se tornam supercondutores.

Esta técnica expõe os átomos de hidrogênio (presentes nas substâncias que constituem os tecidos dos órgãos) a elevados campos magnéticos e de radiofrequência, fazendo com que os spins (destes átomos) absorvam energia e modifiquem suas orientações em relação às orientações das linhas de força do campo magnético. Sendo assim, as imagens são geradas, podendo acusar a existência de células anormais, tumores entre outros (RAMANATHAN *et al.*, 2004).

## *Distribuição e Transmissão de energia elétrica*

A fim de transmitir e distribuir a energia de forma mais eficiente, (projetar motores de propulsão e geradores, sistemas de cabos de desmagnetização, condensadores síncronos entre outros) baseados na tecnologia de supercondutores, um dos elementos cruciais é o fio para transmissão da corrente elétrica. Uma nova geração de fios supercondutores está ganhando espaço no mercado, são os fios 2G (*Segunda geração de fios supercondutores*) HTS.

Várias empresas ao redor do mundo (muitas delas têm adotado parcerias com universidades, centros tecnológicos, laboratórios nacionais e com o governo), entre elas a SuperPower<sup>®</sup>, American Superconductor<sup>®</sup> entre outras, buscam aprimorar suas técnicas de produção a fim de melhorar as propriedades elétricas e mecânicas dos fios, além de buscar uma produção mais econômica.

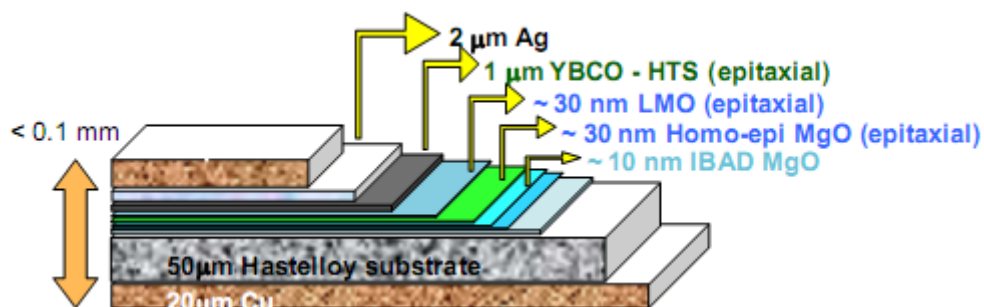


Figura 4 – Esquema do fio 2G HTS fabricado pela SuperPower<sup>®</sup>. Fonte: SuperPower<sup>®</sup>.

Uma das vantagens dos fios 2G HTS são (HAZELTON *et al.*, 2010):

- Operação em alta temperatura;
- Operação em elevados campos magnéticos;
- As propriedades mecânicas dos fios são superiores.

A companhia American Superconductor<sup>®</sup> batizou seus fios 2G HTS com o nome Amperium<sup>™</sup> Wire<sup>®</sup>. Segundo a empresa, estes fios são capazes de conduzir mais de 100 vezes a corrente elétrica dos fios de cobre de mesma dimensão. Em perspectiva, nos sistemas de transmissão de alta tensão, apenas um desses fios ultrafinos seria capaz de transportar energia suficiente para atender às necessidades de cerca de 10.000 lares dos EUA.

### **3 A FLEXIBILIDADE NOS CURRÍCULOS DE ENGENHARIA**

Devida às mudanças nas necessidades da sociedade e a constante evolução tecnológica, os cursos de Engenharia têm sofrido profundas modificações.

O futuro engenheiro precisa construir uma sólida base, que deve ser consolidada no período da graduação, quando se deve aprender a aprender e sempre, continuar aprendendo (TOLEDO, 2006).

O estudante de engenharia deve ser preparado para aprender de forma autônoma e para ter uma visão da realidade (enfrentando desafios). Conforme os estudantes das mais diversas áreas, ele precisa estar apto a trabalhar em equipe, ser criativo, ser sensível as causas ambientais e precisa exercer seu papel de cidadão. De acordo com o Art. 3º da Resolução CNE / CES 11/2002, publicada em 9 de abril de 2002, que trata das Diretrizes Curriculares para os cursos de Engenharia "O Curso de Graduação em Engenharia tem como perfil do formando egresso/profissional o engenheiro, com formação generalista, humanista, crítica e reflexiva, capacitado a absorver e desenvolver novas tecnologias, estimulando a sua atuação crítica e criativa na identificação e resolução de problemas, considerando seus aspectos políticos, econômicos, sociais, ambientais e culturais, com visão ética e humanística, em atendimento às demandas da sociedade."

Sendo assim, o currículo atual deve contemplar, além da aprendizagem de conteúdo e habilidades específicas, a aplicação e a integração dessas aprendizagens e habilidades (TOLEDO, 2006).

Devido ao dinamismo da sociedade (que acompanha as mudanças tecnológicas) os currículos devem ser flexíveis, adequando-se as necessidades da sociedade. Uma das formas de se atingir essa flexibilidade é inserir disciplinas optativas nos currículos dos cursos de Engenharia.

#### **3.1 Alguns cursos de Engenharia que inserem o tema, Supercondutividade, nos currículos**

Visando a formação do cidadão e profissional para sua futura atuação, o curso de Engenharia de Controle e Automação no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, tem oferecido diversas disciplinas optativas. Dentre elas, podemos citar a disciplina Tópicos Especiais em Supercondutividade e Aplicações (a ementa desta disciplina está apresentada na "Tabela 1") (CEFET-MG, 2010). Através desta disciplina foram expostas aos alunos do curso de graduação o despertar de uma tecnologia inovadora, que (mundialmente) é base de estudos nas mais diversas áreas.

Com o intuito de introduzir o aluno aos conceitos básicos de supercondutividade, o curso de Engenharia de Materiais, da USP (Universidade de São Paulo) contempla (desde 1996) uma disciplina optativa eletiva nomeada Introdução à Supercondutividade (a ementa desta disciplina está apresentada na "Tabela 2") (USP, 1996).

O curso de Engenharia Elétrica da UNICAMP (Universidade Estadual de Campinas) também oferece uma disciplina, na qual, um dos temas propostos é o ensino dos fenômenos

da supercondutividade, a disciplina é nomeada Introdução à Ciência dos Materiais para o curso de Engenharia Elétrica (UNICAMP, 2011).

Tabela 1 – Ementa da disciplina Tópicos Especiais em Supercondutividade e Aplicações oferecida, pelo CEFET-MG, ao curso de Engenharia de Controle e Automação.

<b>Ementa</b>
Supercondutividade.
Modelos Fenomenológicos de London e Ginzburg – Landau.
Supercondutores do Tipo I e do Tipo II. Rede de Abrikosov.
Corrente Crítica e aprisionamento de vórtices.
Modelo de estado crítico (Bean).
Arraste de fluxo ativado termicamente: modelo de Anderson-Kim e TAFF.
Materiais supercondutores.
Aplicações.

Tabela 2 – Ementa da disciplina Introdução à Supercondutividade oferecida pela USP, ao curso de Engenharia de Materiais.

<b>Ementa</b>
Equações de London.
Teoria de Ginzburg – Landau.
Teoria par de Copper.
Teoria de Hubbard aplicado aos supercondutores de alto $T_c$ .

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho analisou os principais conceitos relacionados ao fenômeno da supercondutividade, apresentou as principais áreas de aplicação dessa tecnologia além de explicar a relevância de inserção desse assunto nos currículos dos cursos de Engenharia.

Foram apresentados alguns cursos de Engenharia que, por acreditarem na importância desse tema, já inserem (em suas grades curriculares) disciplinas, que têm como tema conceitos relacionados ao fenômeno da supercondutividade. Analisando as diversas áreas nas quais são empregados materiais supercondutores pode-se notar que o tema é relevante.

A fita ou fio 2G HTS já é produzida e comercializada pelas empresas líderes mundiais. Sabe-se que essa matéria-prima possui um preço muito elevado (\$300-400/kA-m (SuperPower, 2011)) porém, através dos significativos avanços tecnológicos estão previstas melhorias significativas, as quais podem ser a chave para disseminação de novas tecnologias baseadas em supercondutividade. Os elevados custos podem ser compensados pelos grandes benefícios destas novas tecnologias.

### *Agradecimentos*

Os autores agradecem ao MEC/SESu, FNDE, CAPES, FAPEMIG, Fundação CEFETMINAS e CEFET-MG pelo apoio ao desenvolvimento deste trabalho.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CEFET-MG. **Citação de referências e documentos eletrônicos.** Disponível em:

< <http://www.eca.cefetmg.br/site/sobre/disciplinas.html> > Acesso em: 05 jun. 2011.

DIAS, D.H.N.; MOTTA, E.S.; SOTELO, G.G.; ANDRADE, R.; STEPHAN, R.M.; KUEHN, L.; HAAS, O.; SCHULTZ, L. Simulations and Tests of Superconducting Linear Bearings for a MAGLEV Prototype. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, v.19, p. 2120-2123, 2009.

Escola de Engenharia de Lorena. **Citação de referências e documentos eletrônicos.**

Disponível em: < <http://www.demar.eel.usp.br/grade.html> > Acesso em: 05 jun. 2011.

HAZELTON, D.; XIE, Y.; SELVAMANICKAM, V.; ANTHONY, R.; LLAMBES, J.C.; LEHNER, T. High-Performance 2G HTS Wire for Efficient and Reliable Electricity Supply. IEEE Conf on Innovative Technologies for Efficient and Reliable Electricity Supply, 2010.

IRJALA, M.; HUHTINEN, H.; JHA, R.; AWANA, V.P.S.; PATURI, P. Optimization of the BaCeO<sub>3</sub> Concentration in YBCO Films Prepared by Pulsed Laser Deposition. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, v.PP, n.99, p.1, 2011.

RAMANATHAN, C.; BOULANT, N.; CHEN, Z.; CORY, D.G.; CHUANG, I.; STEFFEN, M. NMR Quantum Information Processing. Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2004.

SASS, Felipe. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, COPPE/UFRJ. Mancais Magnéticos supercondutores utilizando fitas de segunda geração, 2011. 81p, il. Tese (Mestrado).

SOTELO, G.G.; ANDRADE, R.; FERREIRA, A.C. Test and Simulation of Superconducting Magnetic Bearings. Applied Superconductivity, IEEE Transactions on, v.19, p. 2083 – 2086, 2009.

STEPHAN, R.M. LEVITAÇÃO MAGNÉTICA: Um assunto estratégico para desenvolvimento do Brasil. **Revista do CREA RJ**, Rio de Janeiro, p. 12-15, 2010.

SUPERPOWER<sup>®</sup>. Second Generation HTS Wire for Wind Energy Applications, Symposium on Superconducting Devices for Wind Energy, pp. 1-43, 2011.

TOLEDO, O.M.T. A estrutura curricular do curso de Engenharia de Controle e Automação do CEFET-MG concebida por eixos de conteúdos e atividades. **Anais: XXXIV - Congresso Brasileiro de Ensino de Engenharia.** Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 2006.

UNICAMP. **Citação de referências e documentos eletrônicos.** Disponível em:

<[http://www.fee.unicamp.br/cg/lista\\_disc\\_1.php?id=EE410](http://www.fee.unicamp.br/cg/lista_disc_1.php?id=EE410)> Acesso em: 05 jun. 2011.

USP. **Citação de referências e documentos eletrônicos.** Disponível em:

<<https://sistemas.usp.br/jupiterweb/obterDisciplina?sgldis=LOM3019>> Acesso em: 04 jun. 2011.



## **SUPERCONDUCTIVITY AND APPLICATIONS: A NEED FOR INCLUSION IN CURRICULUM COURSE OF ENGINEERING**

**Abstract:** *In this paper we analyze the findings, introductory concepts and applications of a new technology: Superconductivity. This theme has been the subject of great scientific research and is being used for improvements in several areas such as biomedical engineering, transport engineering, storage, distribution and transmission of electricity, among others. It is therefore very important that engineering courses to adapt to this reality by offering its students, courses that target the teaching of this physical phenomenon. However, for the insertion of this new theme in the curricula of these courses, flexibility is required in the curricular structure, which can be obtained with the inclusion of optional subjects in the curriculum, or until, gradually, as the research will be consolidated in country, offering the required courses.*

**Key-words:** *Education Engineering, Materials Engineering, Curriculum structure, Superconductivity.*