



AMBIENTE COMPUTACIONAL PARA PROJETO E ANÁLISE DE FONTES CHAVEADAS E DISPOSITIVOS MAGNÉTICOS DE ALTA FREQUÊNCIA

Murilo Pereira Soares – murilojf@yahoo.com.br
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia
Rua Benjamin Constant, 790, Centro
36016-400 – Juiz de Fora – MG

Francisco José Gomes – chico@jfnet.com.br
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia
Rua Benjamin Constant, 790, Centro
36016-400 – Juiz de Fora – MG

Henrique A. C. Braga – hbraga@engelet.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora, Faculdade de Engenharia
Rua Benjamin Constant, 790, Centro
36016-400 – Juiz de Fora – MG

***Resumo:** As fontes chaveadas são largamente utilizadas devido à alta eficiência que apresentam, aliada à grande flexibilidade de projeto. Adicionalmente, o crescente avanço da tecnologia de semicondutores e dispositivos magnéticos tem constituído outro aspecto decisivo para sua consolidação. O correto funcionamento deste equipamento, contudo, depende de uma escolha correta dos materiais magnéticos utilizados em sua implementação, sem o que os resultados podem perder em eficiência e desempenho. Neste contexto insere-se o presente trabalho, que contempla o desenvolvimento de um ambiente computacional para estudo e projeto de componentes magnéticos para operar na faixa de frequências de 10 a 150 KHz, com ênfase no projeto de fontes chaveadas, possibilitando opções distintas de componentes magnéticos, com análise de perdas, custos e eficiência do equipamento final.*

***Palavras-chave:** fontes chaveadas, transformadores, indutores, materiais magnéticos, ferrites.*

1. INTRODUÇÃO

Os materiais magnéticos são componentes praticamente onipresentes nos equipamentos eletro-eletrônicos atuais, em suas distintas concepções e aplicabilidades. Quer com características magnéticas duras, variando do pioneiro Alnico aos atuais “ímãs Neo” – NdFeB, quer com características doces, englobando desde os ferrites doces aos MPP - “Molybdenum Permalloy Powder – estes materiais constituem uma base fundamental para se efetuar projetos corretos e eficientes dos equipamentos eletro-eletrônicos. Sob uma ótica do ensino de engenharia, contudo, a realização física dos diversos equipamentos dependentes dos materiais magnéticos – a grande maioria dos equipamentos utilizados atualmente, diga-se de



passagem - vem geralmente acompanhada de dificuldades de caráter técnico, associadas à escolha correta dos componentes magnéticos necessários ao seu funcionamento: os equacionamentos teóricos nem sempre se materializam em materiais corretos. Esta situação decorre, a nosso ver, de fatores que variam desde uma visão com viés excessivamente “acadêmica” do processo de elaboração de um projeto de engenharia até mesmo um desconhecimento da importância desempenhada pelos diversos materiais no desenvolvimento científico e tecnológico. Para o aluno, muitas vezes, um transformador se resume somente à uma relação entre tensões ou um indutor constitui somente um valor numérico associado a um componente do circuito. Uma consequência imediata que pode resultar desta situação é um desencontro entre um modelo teórico “perfeito”, utilizado como ponto de partida, e um produto final que não corresponde às exigências mínimas de custo, desempenho, eficiência e durabilidade.

Neste contexto insere-se o presente trabalho, que contempla o desenvolvimento de um ambiente computacional para estudo e projeto de componentes magnéticos, com ênfase nos materiais utilizados, para operar na faixa de frequências de 10 a 150 KHz, utilizando como padrão o projeto de fontes chaveadas. O ambiente possibilita ao usuário utilizar opções distintas de componentes magnéticos, com análise de perdas, custos e eficiência do equipamento final, dependente das escolhas utilizadas, possibilitando verificar a influência dos materiais no resultado final. A escolha das fontes chaveadas ocorreu pelo fato destes equipamentos estarem sendo largamente utilizados nos dias atuais, devido à alta eficiência que apresentam, assim como à grande flexibilidade de projeto. Outro aspecto decisivo para sua consolidação é o crescente avanço da tecnologia de semicondutores e dispositivos magnéticos. Diferentemente do enfoque da maioria das disciplinas de graduação, nas quais estuda-se análise de indutores e transformadores, com um conhecimento prévio de suas dimensões, tipo de núcleo e número de espiras, o trabalho propõe que se percorra o caminho inverso, auxiliando os acadêmicos em práticas laboratoriais, além de auxiliar no entendimento da influência do uso de diferentes núcleos, materiais e conversores no funcionamento real do circuito projetado.

O trabalho está estruturado como segue: o capítulo 2 mostra as características básicas das fontes chaveadas em comparação com as lineares, o capítulo 3 efetua uma breve descrição dos componentes utilizados em seu projeto e o capítulo 4 descreve como o algoritmo está estruturado, com as devidas considerações técnicas. A operação do ambiente, com alguns resultados obtidos são mostrados nos capítulos 5 e 6, e as conclusões finais no capítulo 7.

2. BASE CONCEITUAL: FONTES LINEARES X FONTES CHAVEADAS

Apesar de serem utilizadas com um mesmo objetivo, as fontes lineares e chaveadas operam de formas distintas. Assim, a escolha do tipo de fonte a ser usada depende basicamente da aplicação a ser alimentada, e cabe ao projetista escolher a melhor opção.

As fontes lineares normalmente são construídas operando-se um MOSFET — transistor de efeito de campo tipo metal-óxido-semicondutor — em sua região linear. No entanto, esta configuração resulta em queda de tensão entre a entrada e a saída, significando uma perda considerável de potência, dependente da carga alimentada. Estas perdas podem tornar as fontes lineares, dependendo da aplicação, pouco eficientes, restringindo seu uso à demandas de menor potência. Na prática, para os casos em que a carga a ser alimentada consome até 10W, as fontes lineares mostram-se tecnicamente viáveis e constituem uma solução de baixo custo. As grandes vantagens do uso de fontes lineares são a sua simplicidade de projeto, o uso de poucos componentes, além do fato de não provocarem ruídos de alta frequência, como no caso das fontes chaveadas (ON SEMICONDUCTOR, 2001).

As fontes chaveadas, por sua vez, funcionam com transistores MOSFETs comutando entre duas regiões de operação: a região de corte, a qual ocorre para uma tensão elevada, mas sem circulação significativa de corrente, e a saturação, na qual a corrente pode atingir valores altos, mas a queda de tensão é mínima. Essencialmente, o semicondutor responsável por este chaveamento cria, a partir de uma entrada contínua, uma tensão alternada, que pode ser elevada ou rebaixada, com transformadores apropriados, e novamente filtrada para se obter a saída contínua desejada. Outro aspecto interessante é o aumento considerável do rendimento final do equipamento, que pode variar entre 65% e 95%. Como desvantagem, pode-se dizer que as fontes chaveadas apresentam uma maior complexidade de projeto, além de criar ruídos de alta frequência, inaceitáveis em muitas aplicações, sendo necessária a sua filtragem nestes casos, como sugerido em ON SEMICONDUCTOR (2002). Algumas das topologias mais usadas em fontes chaveadas, citadas em BROWN (1990), são: *flyback*, *forward*, *push-pull*, meia ponte e ponte completa.

3. COMPONENTES MAGNÉTICOS UTILIZADOS EM FONTES CHAVEADAS

Uma dos aspectos de maior importância na seleção de um material magnético é a sua condição de saturação. Verifica-se que, para atingir condições próximas da idealidade, deveriam ser utilizados núcleos de ar e condutores com diâmetro reduzido, o que acarretaria um número elevado de espiras, uma elevada resistência elétrica e capacitância parasita considerável. Para que o equipamento possa suportar maior densidade de corrente, a secção transversal do condutor deveria ser aumentada, gerando enrolamentos pesados e volumosos, além de custo adicional de materiais. Desta forma, uma solução de compromisso consiste na utilização de um núcleo apropriado que permita o uso reduzido de espiras, possua volume aceitável, reduza o fluxo de dispersão e os custos associados.

Os núcleos mais utilizados para operações em baixas frequências (abaixo de 2KHz) são os de aço-silicioso, na forma laminada, justapostas lateralmente e eletricamente isoladas. Este procedimento, ao aumentar a resistência elétrica do material, dificulta a circulação das correntes parasitas induzidas no núcleo, também denominadas correntes de Foucault, reduzindo as perdas no componente.

Nas regiões de frequências mais elevadas, deve-se selecionar um núcleo com baixa condutividade, para redução das correntes parasitas, e com alta permeabilidade magnética. A opção mais usada neste caso são os ferritas, que satisfazem estas exigências, embora apresentem um B_{max} reduzido (entre 0,3T e 0,5T). Os ferritas são fabricados, fundamentalmente, a partir de uma mistura de óxido de ferro (Fe_2O_3) com algum óxido de um metal bivalente (NiO, MnO, ZnO, MgO, CuO, BaO, CoO).

Existem diversos tipos de núcleos, utilizados nas mais diversas aplicações, dentre os quais podem ser citados os núcleos tipo “E” (Figura 1), “U”, Pote, Toróide, RM, dentre outros (THORNTON, 1994), (TSC INTERNATIONAL, 2000).



Figura 1: Núcleo Tipo "E"



Os núcleos tipos “E” (EE e EI) apresentam maior dispersão do fluxo, embora suportem valores mais elevados de B_{\max} e possam ser utilizados em aplicações de potência mais elevada. Os do tipo “U” são utilizados em transformadores de alta tensão, devido à possibilidade de alocar-se um enrolamento em cada perna do núcleo, o que facilita o isolamento, em detrimento do aumento do fluxo de dispersão. As aplicações dos demais tipos de núcleos podem ser encontradas nos catálogos dos fabricantes citados nas referências ou nas normas específicas (NBR 6545).

4. ESTRUTURA UTILIZADA PARA O PROJETO

Apesar da existência de procedimentos simplificados de cálculo, dispensando enfoque de maior complexidade, a elaboração do projeto de componentes magnéticos não é, de forma alguma, tarefa trivial. A necessidade de consulta praticamente exaustiva em uma base de dados é um dos fatores que dificultam o desenvolvimento de um ambiente para esta finalidade.

A figura 2 exemplifica as etapas adotadas no projeto de indutores. A filosofia adotada para estabelecimento do algoritmo tem como meta a busca de um desempenho desejado para o componente projetado. Desta forma, ao calcular os dados construtivos para o projeto, o ambiente disponibiliza ao usuário uma série de opções, com materiais distintos, que podem ser utilizados para se obter as características desejadas. Obviamente, todos os materiais são diferentes, e isto gera como resultado valores diferentes para o número de espiras, diâmetro do condutor, etc. No entanto, todos os componentes projetados têm, teoricamente, a mesma saída, pois o seu cálculo foi justamente baseado nestas características fornecidas pelo usuário (tensão de entrada e saída, frequência de operação, corrente de entrada/saída). A primeira etapa consiste em se calcular a energia a ser suportada pelo mesmo e, em seguida, o valor de uma variável auxiliar de projeto, dependente do tipo de núcleo e acréscimo de temperatura. A escolha dos núcleos é feita a partir do produto mínimo das áreas, calculado e comparado com dados construtivos fornecidos pelos fabricantes. O número de espiras é determinado com base na estimativa do fator de indutância (indutância por unidade de espira - $B < 0,25$ mT ou 2,5 Gauss). A bitola dos condutores, por sua vez, é calculada levando-se em consideração a densidade de corrente que circulará através do mesmo, e a frequência de operação, para reduzir perdas por efeito skin. Finalizando o projeto, as perdas nos fios são estimadas através da resistência à corrente contínua, desprezando as perdas por efeito skin, que foram minimizadas no projeto.

5. O AMBIENTE COMPUTACIONAL

O ambiente foi desenvolvido utilizando-se a linguagem de programação C++ e pode ser dividido funcionalmente em duas partes: estudo e projeto.

A primeira corresponde ao estudo das fontes chaveadas e componentes magnéticos, compreendendo a ajuda disponível e dois formulários do programa. Na “Ajuda” o usuário encontra informações sobre o funcionamento das fontes chaveadas, projeto e montagem de indutores e transformadores, além de um tutorial sobre a utilização do programa. Na Figura 3 visualiza-se um formulário da “Ajuda”, com informações sobre a montagem de componentes magnéticos.

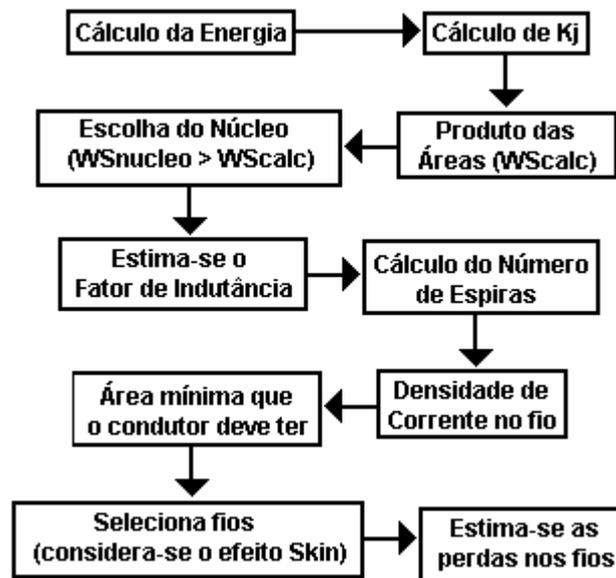


Figura 2: Fluxograma exemplificando as etapas do projeto de indutores

Nos formulários do programa estão disponíveis informações sobre os diferentes tipos de núcleos existentes, exemplificados com fotos e desenhos, além dos tipos de materiais disponíveis para diversos fabricantes, assim como as principais características e curvas referentes a estes materiais.

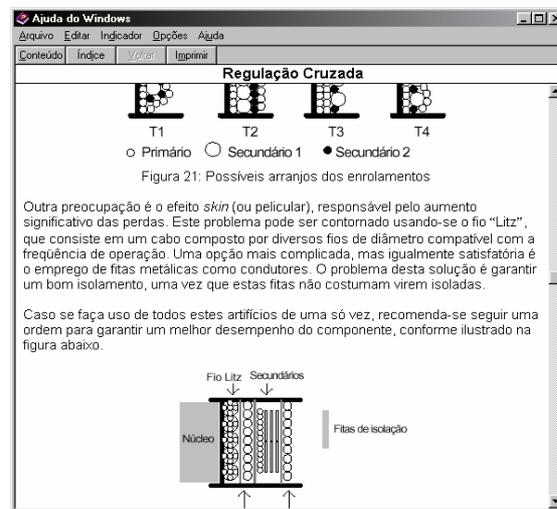


Figura 3: Ajuda do programa

Existe ainda um formulário de cadastro de novos materiais, que permite ao usuário projetar componentes usando materiais de qualquer fabricante, desde que disponha de algumas informações sobre o mesmo. A Figura 4 mostra o formulário de informações sobre materiais disponíveis.

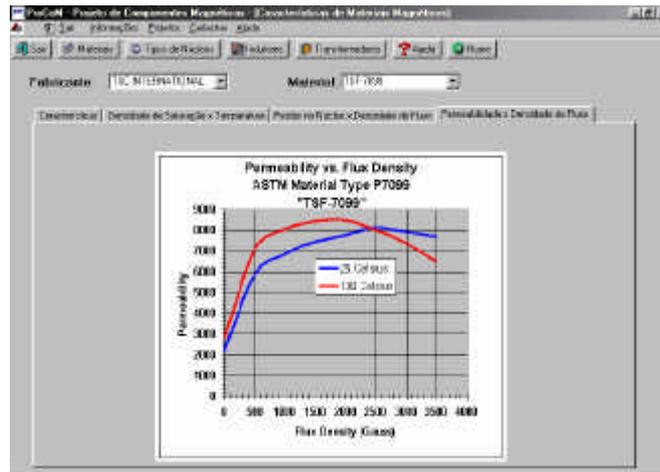


Figura 4: Formulário sobre tipos de materiais exibindo a curva Permeabilidade x Densidade de Fluxo, do material TSC-7099, da TSC International.

Na Figura 5 pode-se observar os principais tipos de núcleos existentes no mercado, assim como um desenho exibindo suas características.

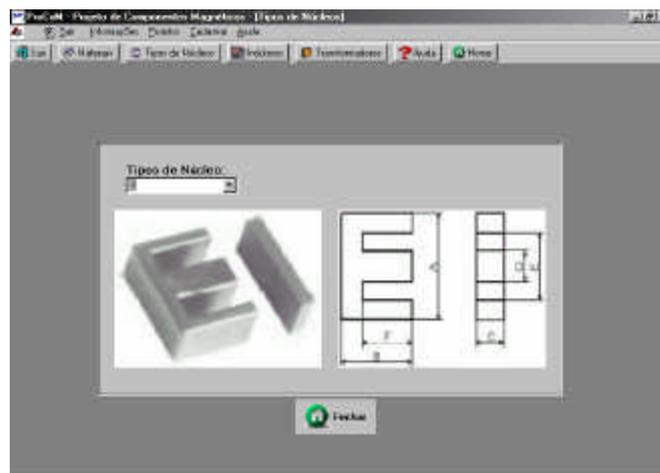


Figura 5: Formulário sobre tipos de núcleos exibindo o núcleo tipo EI.

A segunda parte do ambiente é dedicada ao projeto dos componentes (transformadores e indutores), utilizando uma extensa base de dados de materiais de vários fabricantes. O usuário deverá fornecer valores de entrada, especificados adiante, e o programa calculará para cada material da base, os possíveis formatos e tamanhos de núcleos que podem ser usados para construir o componente com as características próximas às desejadas. A figura 6, a seguir, mostra o exemplo do formulário usado no projeto de indutores.

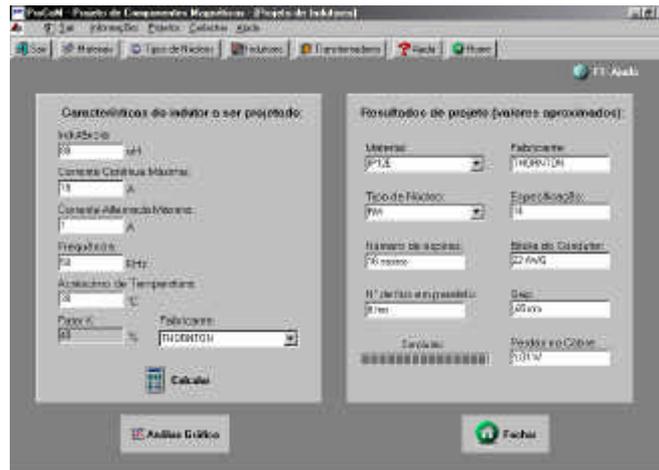


Figura 6: Formulário de projeto de indutores

No cálculo dos indutores é necessário fornecer a indutância desejada, as correntes alternadas e contínuas máximas, a frequência de operação e o acréscimo de temperatura esperado (normalmente entre 30°C e 60°C). Como resultado, o software fornece o material a ser utilizado, o fabricante deste material, o formato e tamanho do núcleo, número de espiras, bitola do condutor, número de condutores em paralelo (para minimizar o efeito skin), o entreferro a ser introduzido, efetuando ainda uma estimativa da potência dissipada no condutor utilizado no indutor.

O formulário de Projeto de Transformadores permite que o usuário projete componentes com até três saídas distintas, com diferentes níveis de tensão e corrente. Neste módulo deverão ser fornecidos dados como tensões de entrada (máxima e mínima), tensão e corrente em cada saída desejada, ciclo de trabalho da tensão de entrada, frequência, rendimento desejado do transformador, devendo também ser escolhido o tipo de configuração a ser utilizada com o componente.

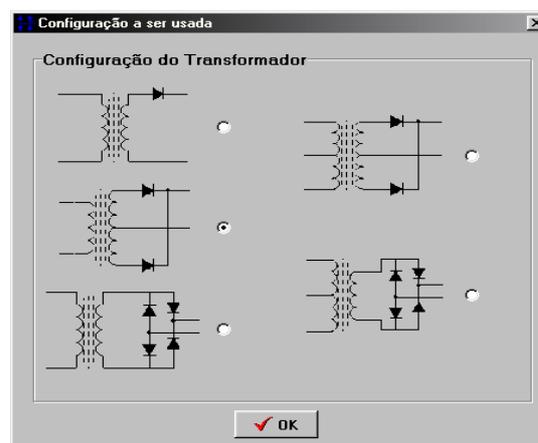


Figura 7: Configuração do Transformador

A figura 7 mostra o formulário para escolha da configuração a ser utilizada no transformador. O usuário terá a opção de escolher entre diversos tipos de retificadores usados

em conversores, assim como se a forma de onda é uma senóide ou uma onda retangular, devendo neste caso também fornecer o ciclo de trabalho desta onda (Figura 8).

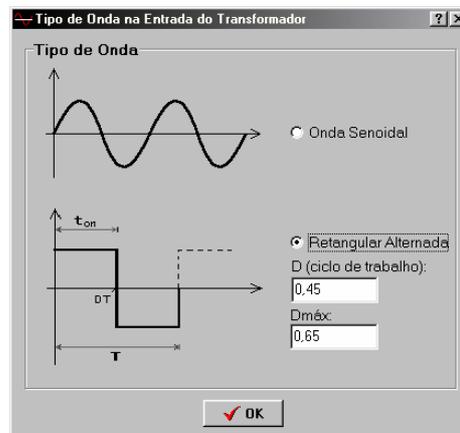


Figura 8: Formulário para escolha da forma de onda.

Após escolha destes parâmetros e preenchimento das demais informações necessárias, o ambiente executa o projeto do componente solicitado, buscando a configuração necessária ao alcance do resultado estabelecido pelo usuário.

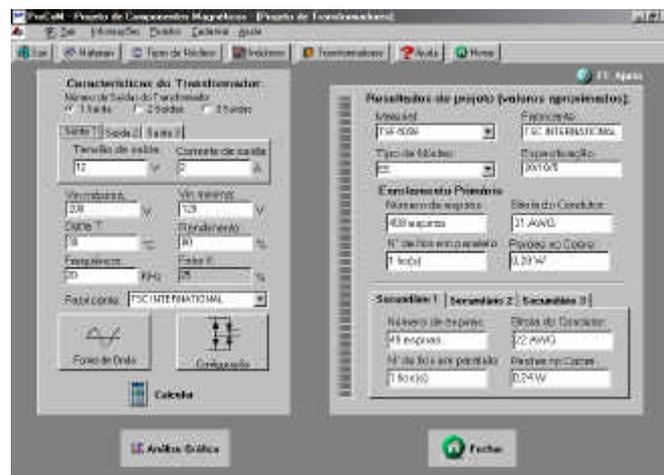


Figura 9: Projeto de Transformadores

Os resultados são exibidos em um painel ao lado dos dados de entrada, dispostos de forma clara e objetiva. O programa retorna os dados construtivos do projeto: o núcleo a ser utilizado, número de espiras e bitola dos condutores do primário e dos secundários, além da estimativa de perdas nos mesmos.

6. ANÁLISE DE DESEMPENHO

Como colocado anteriormente, o objetivo do ambiente é permitir uma análise da influência dos diferentes materiais no desempenho final do componente, sob os aspectos de perdas, custo, material utilizado, etc. Para isto, o ambiente possui um formulário inteiramente

voltado para a análise dos resultados obtidos. A primeira análise proporcionada compara as necessidades de materiais associados aos condutores necessários, para cada concepção escolhida, (Figura 10) bem como as perdas por efeito Joule nos condutores necessários em cada opção efetuada.

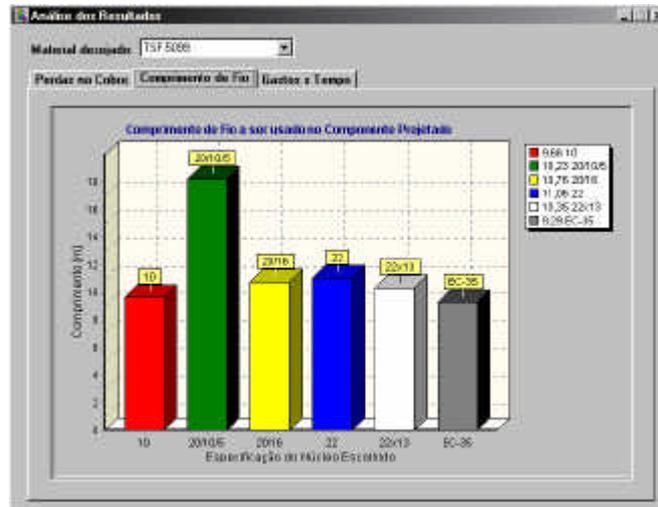


Figura 10: Formulário de Análise dos Resultados

Outra análise possível envolve os custos associados aos componentes, comparando o custo inicial (dos condutores), associados às perdas energéticas nos condutores ao longo do tempo. A Figura 11 mostra os resultados associados aos custos, para diversas opções de núcleo, em função do tempo de sua utilização.

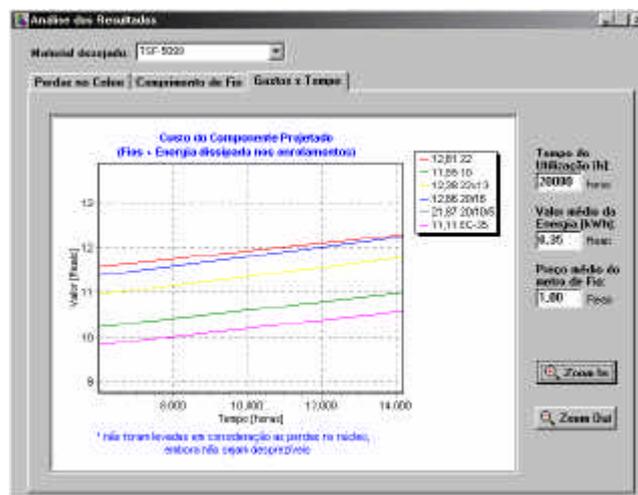


Figura 11: Custos associados a núcleos distintos

7. CONCLUSÕES

O ambiente desenvolvido constitui importante ferramenta auxiliar de projetos, destacando para o usuário as conseqüências associadas aos custos de material e perdas energéticas, para determinada escolha de materiais. O ambiente destaca, para o usuário, o aspecto associado à



uma importante etapa da execução do projeto: a seleção e escolha dos materiais adequados, fase esta nem sempre presente em um enfoque “acadêmico”. De forma fácil e interativa, o ambiente permite seleção e comparação de opções distintas, porém realçando as consequências da opção tomada para o resultado final exibido pelo componente. O ambiente revela-se extremamente útil para cursos e estudos envolvendo componentes na área de eletrônica de potência, bem como para o estudo de materiais magnéticos, em cursos na área de materiais.

A inclusão de um software deste tipo em um curso de engenharia não é, de forma alguma, tarefa simples. Se por um lado tem-se diversos aspectos positivos, já mencionados anteriormente, por outro encontra-se a imensa dificuldade em se quebrar rotinas e metodologias usadas nestes cursos. Muitas vezes torna-se difícil convencer professores e estudantes do imenso potencial de uma ferramenta de projeto / simulação, como a proposta neste trabalho, no complemento das atividades curriculares, sejam elas teóricas ou práticas laboratoriais.

No âmbito local (Universidade Federal de Juiz de Fora), este programa é mostrado aos estudantes na disciplina de Materiais Elétricos, devido à sua grande afinidade com a mesma. Para facilitar o acesso e a disseminação do ambiente desenvolvido, o mesmo é disponibilizado na página do PET (Programa de Educação Tutorial – www.pet.ufjf.br) da Engenharia Elétrica da UFJF, de forma que todos os alunos da graduação e demais interessados possam utilizá-lo. Desta forma acredita-se estar contribuindo com a melhoria do ensino de engenharia, adicionando-se um recurso simples, interativo, além de muito cativante ao atual contexto da educação na engenharia.

Agradecimentos

Aos professores que me orientaram neste trabalho, aos amigos do PET e à SESu/MEC pelo apoio durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BROWN, J. Transformer’s Mystique. **The Inside line Magazine**. USA, v. 1, n. 3, 1990

MELLO, L. F. P. **Projetos de Fontes Chaveadas**. São Paulo: Ed. Érica Ltda, 1987.

AYRES, C. A.; SOUZA, L. E. **Curso de Fontes Chaveadas**. Itajubá: EFEI, 1990.

ON SEMICONDUCTOR. **Rectifier Applications Handbook**, Rev. 2. USA, November, 2001.

ON SEMICONDUCTOR. **SWITCHMODE™ Power Supply Reference Manual**, Rev. 3. USA, July 2002.

ON SEMICONDUCTOR. **Switching Controllers Selector Guide**, Rev. 0. USA, December, 2002.

POMÍLIO, J. A. **Apostila de Fontes Chaveadas**. Campinas: UNICAMP, Janeiro 1997.

MOHAN, N.; UNDELAND, T.; ROBBINS, **Power Electronics**, W. John Wiley & Sons, Inc. New York, 1995.



NBR 6545 – “**Ferrites: Terminologia**”, Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, Brasil, de março de 1983

**SWITCHING POWER SUPPLIES AND HIGH FREQUENCY
MAGNETICS COMPONENTS ANALYSIS AND DESIGN SUPPORT
COMPUTATIONAL ENVIRONMENT**

***Abstract:** Switching power supplies are largely used nowadays due to its high efficiency, allied the great projects flexibility it presents. Moreover, the raising improvement in semiconductor and magnetic devices technology appear to lead this consolidation. However, the expected working of this device depends on the accurate choice of magnetic materials used in its construction otherwise it will not work properly. These surroundings are the major motivation of this work, which's focused on developing a computational environment for analysis and design of high frequency magnetic components, especially those that operates into the frequency band of 10kHz to 150kHz, emphasizing switching power supplies projects, and giving user the possibility to analyze the component losses, costs and efficiency.*

***Key-words:** switching power supply, transformers, inductors, ferrite cores.*