

**Universidade Federal de Santa Catarina**  
**Atividades de Pesquisa**  
**Formulário de Tramitação e Registro**

Situação: **Aprovação/Depto Coordenador**  
 Protocolo nº: **2013.1337**

Título:	Aprimoramento da recarga por indução através de otimização com aplicação em veículos elétricos
Resumo:	A preocupação ambiental tem se tornado um tema de pesquisa emergente por parte da indústria. Acredita-se que os impactos das atividades econômicas no meio ambiente devem ser reduzidos drasticamente para limitar a redução dos recursos naturais e do aquecimento global, os quais são vitais para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável. Hoje o veículo elétrico é uma solução consensual para a redução de emissões causadas por combustíveis fósseis. No entanto, esta solução necessita ainda de numerosos desenvolvimentos para que se tornem tão competitivos quanto os modelos de combustão interna. Dentre todos os dispositivos passivos de melhoria, o processo de carregamento da bateria figura entre um dos principais itens para a adaptação do veículo elétrico à vida urbana moderna. Desta forma, a carga sem contato físico é uma oportunidade para o veículo elétrico. Esta solução assegura conforto na utilização além de robustez ao vandalismo e as intempéries. O princípio deste sistema é o acoplamento magnético entre o emissor e o receptor. É sabido que esta forma de energia pode interferir em outros subsistemas do veículo. Dimensionar e aprimorar este dispositivo requer estudos e pesquisas detalhadas além de experimentos em laboratório.
Palavras chave: (máximo 5)	Otimização; Carro elétrico; Recarga por indução
Grande Área do conhecimento:	Engenharias
Área do conhecimento:	Engenharia Elétrica
Nome do Grupo de Pesquisa: (CNPq - Diretório)	
Está vinculado a outro projeto de pesquisa?	
Período de realização:	11/01/2013 a 10/31/2016
A atividade receberá algum aporte financeiro?:	Sim
Orçamento Total:	R\$ 42.900,00
Financiador:	CNPQ
Propriedade Intelectual (o resultado do projeto é ou poderá ser protegido por):	

**Envolvidos neste projeto de pesquisa**

<b>Coordenador</b>	
Nº do SIAPE:	2051320
Nome do Coordenador:	Xisto Lucas Travassos Junior
CPF do Coordenador:	26641850803

Departamento:	CAMPUS DE JOINVILLE
Centro:	CAMPUS DE JOINVILLE
Regime de trabalho:	DE
Fone de contato:	97441181
E-mail:	lucas.travassos@ufsc.br
Carga horária semanal nesta atividade:	8 horas
Receberá remuneração nesta atividade de pesquisa?	Não

Você gostaria de participar do guia de fontes da UFSC?	Sim
--	-----

Outros prof. ou servidores da UFSC envolvidos?	Não
Alunos da UFSC envolvidos?	Não
Pessoas externas à UFSC envolvidas?	Não

<b>Outras Considerações</b>
Observações ad-referendum da CPE Anexar projeto de pesquisa.

Nº do Processo:	2013.1337
-----------------	-----------

# **Aprimoramento da recarga por indução através de otimização com aplicação em veículos elétricos**

## **Resumo**

A preocupação ambiental tem se tornado um tema de pesquisa emergente por parte da indústria. Acredita-se que os impactos das atividades econômicas no meio ambiente devem ser reduzidos drasticamente para limitar a redução dos recursos naturais e do aquecimento global, os quais são vitais para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável.

Hoje o veículo elétrico é uma solução consensual para a redução de emissões causadas por combustíveis fósseis. No entanto, esta solução necessita ainda de numerosos desenvolvimentos para que se tornem tão competitivos quanto os modelos de combustão interna.

Dentre todos os dispositivos passivos de melhoria, o processo de carregamento da bateria figura entre um dos principais itens para a adaptação do veículo elétrico à vida urbana moderna. Desta forma, a carga sem contato físico é uma oportunidade para o veículo elétrico. Esta solução assegura conforto na utilização além de robustez ao vandalismo e as intempéries.

O princípio deste sistema é o acoplamento magnético entre o emissor e o receptor. É sabido que esta forma de energia pode interferir em outros subsistemas do veículo. Dimensionar e aprimorar este dispositivo requer estudos e pesquisas detalhadas além de experimentos em laboratório.

Este é um projeto de inovação e conta com a participação do Laboratoire de Génie Electrique de Paris.

## **Introdução e Justificativa**

Os alimentos, as fontes de energia limpa, a água, os conteúdos criativos da informação e ainda o petróleo se constituirão nas maiores demandas do século 21.

Em matéria de alimento, o Brasil vem se preparando bem, com a adoção de inteligente política de produção. No campo da energia limpa, nossa posição é confortável dado o potencial hidroelétrico, a política atômica para fins pacíficos e as reservas de água potável (16% de toda a reserva mundial) [1].

O preocupante é pensar na nossa condição de produtores de tecnologia sustentável. A produção de veículos baseados no modelo de combustão interna no Brasil continua aumentando. O veículo elétrico ainda é uma realidade distante para a maioria da população e uma oportunidade para o crescimento sustentável.

Pode-se considerar que o estado de Santa Catarina tem duas montadoras de veículos (uma em funcionamento e outra em construção). No entanto, nossa capacidade técnica e científica para suportar inovações na área de tecnologia limpa para veículos é incipiente. O objetivo principal deste projeto é, portanto, dotar Santa Catarina e o Brasil de uma alternativa de pesquisa para utilização de energia limpa em substituição de combustíveis fósseis para veículos.

Hoje, o veículo elétrico necessita ainda de numerosos desenvolvimentos para se tornarem atrativos a maioria população. Dentre todas as melhorias, uma das mais importantes é a recarga das baterias.

Um dos elementos importantes em um sistema de recarga é a forma como a energia será transferida para o veículo. O modelo mais conhecido e comercializado hoje é o de contato ôhmico onde a energia é transferida através de um condutor. Este modelo é

incomodo para o usuário e aporta todas as perdas por efeito Joule. O segundo modelo é o chamado “sem fio” e é baseado pela transferência de energia por indução magnética.

Existem discussões acaloradas entre os simpatizantes dos dois modelos. No entanto, hoje o conceito mais pesquisado no mundo é o “sem fio” devido às adversidades da vida urbana moderna. Além da questão comodidade pode-se também atribuir a este modelo a vantagem relacionada à segurança das pessoas.

É possível fazer a recarga da bateria sem contato e de forma automatizada o que é extremamente desejado para o auto-serviço. Desta forma, o nível de segurança também é item comercial. Contrariamente ao primeiro modelo.

O tempo de recarga é um problema comum aos dois modelos. O aprimoramento dos emissores e receptores é um problema ainda em desenvolvimento. A vida moderna não permite que ninguém perca mais de 20 minutos abastecendo o veículo. Aprimorar estes dispositivos eletromagnéticos é, desta forma, um desafio para a viabilidade dos veículos elétricos.

Não obstante, o número elevado de dispositivos elétricos e eletrônicos traz a preocupação do funcionamento adequado destes quando submetidos ao processo de transferência de energia “sem fio”. Este problema é conhecido como compatibilidade eletromagnética do sistema como um todo e é extremamente complexo e importante para o produto veículo elétrico.

Portanto, considera-se este projeto aderente a realidade atual de Santa Catarina que conta com duas montadoras de veículos a combustão interna e é estratégico para o setor industrial nacional como também para o país. Além disso, pode-se considerar este projeto como desenvolvimento de tecnologia para o crescimento sustentável do país e a manutenção das condições climáticas do planeta.

## **Objetivo Geral**

Este projeto visa desenvolver os conhecimentos e as metodologias que permitirão aos construtores de veículos elétricos entender: 1) a difusão magnética gerada pela transferência de energia elétrica por indução através da abordagem científica com o uso de técnicas numéricas e experimentos em laboratório sempre considerando o aprimoramento do sistema; 2) verificar a interoperabilidade deste sistema com os sistemas elétricos e eletrônicos já existentes no veículo através da aplicação de técnicas de compatibilidade eletromagnética; 3) entender o desempenho do sistema de veículos com grande espalhamento de energia em termos de rendimento energético e da análise de sensibilidade.

## **Objetivos Específicos**

Em relação ao objetivo geral é possível estabelecer os objetivos específicos da seguinte forma:

- 1) a difusão magnética gerada pela transferência de energia elétrica por indução através da abordagem científica com o uso de técnicas numéricas e experimentos em laboratório sempre considerando o aprimoramento do sistema;
  - a) desenvolver métodos numéricos para a abordagem mais realista do problema de acoplamento magnético;
  - b) conceber dispositivos de acordo com as demandas da indústria para posterior aprimoramento;
  - c) estabelecer métodos de medição para verificação do modelo desenvolvido;

- d) estabelecer parcerias com o setor industrial e científico visando a transferência de conhecimento;
  - e) consolidar relacionamentos internacionais para impulsionar a pesquisa científica da Bahia e torná-la competitiva internacionalmente;
  - f) formação de recursos humanos qualificados.
- 2) verificar a interoperabilidade deste sistema com os sistemas elétricos e eletrônicos já existentes no veículo através da aplicação de técnicas de compatibilidade eletromagnética;
- a) desenvolver testes específicos e propor padrões e normas para os testes de espalhamento magnético durante recarga de bateria;
  - b) identificar as demandas industriais e prover respostas para a aceleração do desenvolvimento de normas e produtos;
- 3) entender o desempenho do sistema de veículos com grande espalhamento de energia em termos de rendimento energético e da análise de sensibilidade.
- a) produzir dados sobre a análise de sensibilidade e possíveis alterações comuns no setor industrial.

## **Fundamentação Teórica**

Os veículos elétricos normalmente portam uma bateria que deve ser recarregada através de condutores, que carregam uma corrente alternada como a encontrada nas tomadas das casas, ou através de dispositivos indutivos para recarregamento. Na primeira opção o veículo deve ser ligado a uma fonte (normalmente uma tomada) com tensões nominais de 110 ou 220 V (padrão nacional). Na segunda opção a carga induzida é feita através de um transformado tendo enrolamentos do primário e no secundário para carregar a bateria do veículo. O primário é construído em uma estação fixa enquanto o secundário é preso no veículo. Um conversor é utilizado com frequência de ressonância em torno de 100kHz (entre 30kHz e 150kHz) o sistema dispõe também de um dispositivo de controle permitindo a adaptação de tensão na saída para o estado de carga da bateria.

Para maximizar a eficiência, é importante que o enrolamento secundário disposto no veículo esteja alinhado e próximo do enrolamento primário para que a recarga aconteça. Este requerimento apresenta algumas dificuldades para a realização da estrutura do enrolamento secundário. Se o dispositivo estiver perto do chão e desprotegido poderá ser danificado por pequenos acidentes normais no processo de condução do veículo ou objetos dispostos nas ruas e estradas. Por outro lado, se o secundário estiver muito próximo do veículo o campo magnético gerado pela corrente pode aquecer o metal nas proximidades a níveis perigosos. Além disso, o calor reduz a eficiência da transferência de energia durante a recarga.

Desenvolver e aprimorar o enrolamento para reduzir ou suprimir estes problemas é um dos desafios dos veículos elétricos. Este projeto focalizará o estudo das bobinas de indução sobretudo as questões relativas a compatibilidade eletromagnética - CEM (exposição humana e interoperabilidade com os outros sistemas) além do aprimoramento por meio de otimização geométrica dos indutores para melhorar a eficiência da transferência de energia para carga respeitando as condições de CEM [2].

Inúmeras configurações de bobinas são conhecidas no estado da técnica. A maioria apresenta diferentes configurações de enrolamentos de fio sobre um eixo central formando uma bobina com configuração anular. A bobina tem espessura lateral e vertical o que a faz inadequada para certas posições do veículo.

No entanto foram desenvolvidas configurações com altura reduzida como descrito em [3]. Nesta patente uma bobina é feita em uma placa de circuito impresso com várias

camadas. Em [4] uma aplicação multicamada com placas de circuito impresso flexíveis foi proposta sendo que cada uma continha uma bobina com padrão espiral.

Ainda que estas configurações operem satisfatoriamente ainda apresentam desvantagens em relação à fixação do enrolamento secundário no veículo para a carga indutiva [5].

Para que possa ser otimizada a estrutura planar utilizada como acoplador de transferência de energia deve ser modelada. Esta estrutura contém duas bobinas (um receptor e outra transmissora) ainda pode contar com dois ferrites de tamanhos distintos de forma a cobrir as bobinas e formar uma blindagem. Este projeto também pode incluir placas de aço para representar o chassi do veículo.

As duas bobinas podem ser idênticas e separadas por uma distância previamente determinada. Este problema é resolvido no domínio da frequência usando a formulação magnetodinâmica:

$$\text{rot} [ (\mu)^{-1} \times \text{rot} (A) ] + i \times \omega \times \sigma A = J_e$$

onde  $A$  é o potencial vetor,  $\mu$  é a permeabilidade,  $\omega$  é a frequência,  $\sigma$  é a condutividade e  $J_e$  é a densidade de corrente. A corrente de Foucault no ferrite é considerada e o chassi é considerado um condutor perfeito [6].

Para o desenvolvimento de simulações próximas a situações reais é necessário conhecer as condições de funcionamento do sistema (corrente nos indutores no processo de carregamento) estes dados reais poderão ser fornecidos pelo LGEP [6].

Existem dois caminhos para determinar a solução para esta equação: a solução analítica e/ou através de métodos numéricos. Considerando o problema acima o uso de soluções analíticas é inviável devido a complexidade da geometria do problema, a dependência temporal das condições de contorno e a não-homogeneidade do meio.

No entanto, a escolha de um método numérico não é trivial. Em geral para ser eficiente um método numérico deve garantir precisão, versatilidade, baixo custo computacional e habilidade para encontrar uma solução caso esta exista. É importante ressaltar que nenhuma técnica ou método consegue cumprir integralmente estes requisitos. Existem inúmeras diferentes técnicas, algumas baseadas em equações diferenciais parciais e outras em equações integrais. As técnicas que serão empregadas neste projeto são brevemente discutidas a seguir.

Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (Finite-Difference Time-Domain - FDTD) tem sido aplicado amplamente em problemas de eletromagnetismo incluindo problemas de domínio aberto. O FDTD é baseado na substituição da derivada por uma simples aproximação baseada em diferenças entre os valores de dois pontos distintos dividido pela distância entre eles. Desta forma, é possível substituir uma equação contínua com um número infinito de graus de liberdade por uma equação discretizada com número finito de variáveis. Considerado de simples realização computacional este método é capaz de resolver problemas não-lineares e anisotrópicos sem precisar de uma malha regular o que garante uma modelagem correta de campos que variam no espaço [7].

Considerando o problema em questão e os aspectos de CEM em si os dispositivos estudados tem características de chaveamento rápidas e portanto regimes transitórios que podem causar distorções no espectro. Estas distorções por sua vez geram espalhamento eletromagnético em frequências superiores ao evento de origem desta forma o uso do método FDTD é uma ótima escolha para o estudo temporal e análise do espectro. Dentro deste contexto, vale ressaltar a experiência no proponente no desenvolvimento e aprimoramento do algoritmo FDTD. Este possui uma ferramenta validada e amplamente difundida na comunidade acadêmica.

Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (Finite Element Method - FEM) é uma técnica para solução de equações diferenciais desenvolvida originalmente para problemas mecânicos estruturais. No eletromagnetismo o FEM é associado com métodos variacionais e residuais. O princípio deste método consiste em dividir o domínio de estudo em subdomínios não necessariamente de mesma forma e dimensão. Este procedimento permite ao FEM variar a densidade dos elementos de acordo com a necessidade do problema. Em cada elemento a solução é representada por uma função polinomial [8].

Além disso, para tratar as descontinuidades encontradas em regiões entre meios com diferentes propriedades, elementos finitos de aresta são usados devido a sua precisão. Para problemas em três dimensões (3D) um elemento tetraédrico geralmente é utilizado. Analisando a complexidade do problema através das principais estruturas (bobinas, blindagem, veículo e ambiente) percebe-se uma pluralidade de materiais e geometrias complexas que merecem tratamento específico quanto ao cálculo dos fenômenos eletromagnéticos. Em se tratando de descontinuidades e mudanças de meio o FEM estabelece uma grande vantagem quando comparado ao FDTD. Para a aplicação desta ferramenta o projeto conta com a vasta experiência do LGEP na criação e desenvolvimento de ferramentas numéricas baseadas neste método [9]-[11].

Apesar do FDTD ser conceitualmente mais simples e de fácil realização em comparação com o FEM este é mais poderoso e versátil para problemas com geometria complexa e meio não-homogêneo. Entretanto, para processos de otimização no domínio do tempo o uso do FEM torna-se proibitivo devido ao tamanho da matriz gerada para solução do problema.

Existem muitos métodos de otimização e cada um deles alcança melhores resultados em determinados tipos de problema. A escolha do método depende de uma série de características do problema a ser otimizado, principalmente do comportamento da função que o representa, a qual muitas vezes é de difícil determinação. Para esta escolha, faz-se necessário também um bom conhecimento das ferramentas de otimização [12].

De acordo com as características dos problemas, podem-se classificar as ferramentas de otimização em dois grandes grupos: programação linear e programação não-linear. O primeiro grupo trata da resolução de problemas que sejam perfeitamente representados por um sistema de equações lineares. A programação não-linear trata de problemas não lineares.

As técnicas para programação não-linear podem ser subdivididas em três subgrupos: métodos determinísticos, estocásticos e enumerativos. Os métodos determinísticos são baseados no cálculo de derivadas, ou em aproximações destas.

Necessitam, portanto, de alguma informação do vetor gradiente, seja procurando o ponto onde ele se anula ou usando a direção para a qual aponta. Os métodos estocásticos utilizam um conjunto de ações probabilísticas que buscam a solução ótima de maneira ‘aleatória orientada’, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema. Já os métodos enumerativos fazem uma varredura completa (busca exaustiva) de todas as possíveis soluções, o que, na maior parte dos problemas, implica em um tempo excessivo de cálculo.

Na engenharia, particularmente em eletromagnetismo, os problemas são geralmente complexos, não-lineares, de difícil representação e necessitam de métodos numéricos para se obter a solução (Bastos & Sadowski [13] e Balanis [14], por exemplo). Por isto, ferramentas de programação não-linear estocásticas são as mais aptas para a otimização destes problemas.

O problema abordado neste projeto têm requisitos técnicos e financeiros que devem ser tratados no processo de otimização. Geralmente estes requisitos são antagônicos. Para

este tipo de problemas devem ser usadas ferramentas de otimização multiobjetivo. Estas ferramentas não apontam para somente uma solução, mas um grupo de soluções chamada de curva de Pareto.

Se ainda forem considerados aspectos de ordem prática (imprecisão na construção, por exemplo), é necessário verificar se a qualidade de uma solução permanece aceitável quando os parâmetros a ela associados sofrem pequenas variações. Como ilustração, a obtenção de uma asa de avião que produza um ganho fenomenal em eficiência aerodinâmica pode não significar grande vantagem se, com a variação de alguns milímetros em sua posição (causada por trepidação, por exemplo), este ganho seja completamente diferente.

Assim, a maximização da imunidade da solução às perturbações pode se tornar um novo objetivo na obtenção da solução ótima. Em projetos práticos é necessária, portanto, uma análise de sensibilidade das soluções obtidas pelo processo de otimização (Ávila [12], Takahashi et al. [15], Barthold [16], dentre outros).

Desta forma, o método numérico selecionado deverá ser acoplado ao algoritmo de otimização para que possíveis soluções de acordo com as restrições impostas sejam encontradas a exemplo do que foi realizado em [17]-[20].

## **Metodologia**

A metodologia a ser empregada é descrita, resumidamente, a seguir.

Como critério geral, menciona-se que, na avaliação do sistema de transferência de energia, a fonte de irradiação será a bobina. Assim, as seguintes etapas podem ser descritas referentes ao processo proposto:

- 1) Inicialmente, as fontes de emissão de irradiação serão identificadas e caracterizadas;
- 2) A partir deste estudo, modelos numéricos serão determinados, considerando especificações do parceiro industrial e considerações da equipe do LGEP;
- 3) Estes modelos serão, então, introduzidas em um software de cálculo de campos eletromagnéticos;
- 4) Os campos eletromagnéticos em diferentes pontos serão calculados, considerando-se as características do local da fonte (carroceria, fuselagem, presença de elementos próximos etc.);
- 5) Os campos eletromagnéticos irradiados em equipamentos vizinhos à fonte, assim como os níveis de perturbação induzidas nos cabos, serão determinados. Ressalta-se que, nesta etapa, as considerações das incertezas relacionadas ao arranjo e roteamento dos cabos serão, especialmente, abordadas utilizando-se processos de otimização;
- 6) Realização de uma possível solução aprimorada e proposição ao parceiro industrial.

De forma resumida, as cinco etapas citadas serão descritas a seguir:

**Etapas 1** Para a identificação das bobinas (em um sistema de transferência de energia sem contato) é necessário um modelo mesmo. O modelo do veículo poderá ser o próprio veículo seccionado ou somente o sistema eletrônico do mesmo. A idéia principal é simular o processo de recarga de bateria em um veículo elétrico aos mesmos níveis de solicitação eletromagnética que sofreriam quando testadas em montagens normalizadas, ou seja, o veículo completo.

**Etapas 2** A obtenção de modelos numéricos equivalentes deverá ser baseada em dados experimentais.

**Etapas 3** Uma vez que o modelo seja definido, estas serão introduzidas num software de cálculo de campos para a resolução dos problemas de espalhamento e irradiação. Nesta etapa três opções se apresentam: a utilização de softwares comerciais, a saber, a versão Microwave Studio, a utilização de uma ferramenta usando o método das diferenças



finitas no domínio do tempo desenvolvido pelo proponente deste projeto e/ou a utilização de ferramentas numéricas desenvolvidas pelo LGEP sendo que esta última já esta sendo utilizada para desenvolvimento de bobinas para veículos elétricos.

A ferramenta FDTD esta sendo desenvolvida há 5 anos fazendo parte de inúmeras publicações em renomados congressos e revistas internacionais. O método FDTD é uma técnica aproximada para solucionar equações diferenciais parciais. Este método tem sido aplicado a vários problemas de contorno em eletromagnetismo, incluindo os problemas de domínio aberto. O método das diferenças finitas pode ser considerado uma das mais antigas técnicas de solução aplicadas na resolução de equações diferenciais parciais. E, com o aumento dos recursos computacionais, este método vem sendo cada vez mais utilizado.

O FDTD baseia-se na substituição da operação de diferenciação por uma simples operação de subtração nos pontos de interesse seguida de uma divisão pelo intervalo entre os pontos considerados. Desta forma, é possível substituir uma equação contínua, com infinitos graus de liberdade, por uma equação discretizada, com número finito de nós.

Através deste processo, a equação diferencial parcial original é transformada em um conjunto de equações algébricas cuja solução simultânea fornece a solução aproximada da equação original do problema de contorno. O método de diferenças finitas é de simples implementação computacional. Além disso, é capaz de tratar problemas não-lineares e anisotrópicos, não tendo a obrigatoriedade de uma malha regular, o que permite uma boa modelagem de campos que variam rapidamente no espaço ou a modelagem correta de problemas que possuem superfícies curvas.

Etapa 4 Esta etapa consiste numa campanha de simulações envolvendo o modelo de fontes e as ferramentas de cálculo numérico descritas na etapa anterior para a obtenção dos dados suficientes para a resolução do problema de otimização que será tratado na etapa 5.

Etapa 5 A partir dos dados obtidos na etapa 4 um processo de otimização da posição dos equipamentos e seus cabos será feito. Para isso, propõe-se a utilização de métodos de otimização estocásticos baseados em evolução como os algoritmos genéticos. Os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos de otimização estocásticos que trabalham de forma aleatória orientada de acordo com regras probabilísticas baseadas numa analogia com os mecanismos da genética natural. Isto é, inicialmente cria-se uma população de indivíduos (posicionamento geométrico dos cabos e circuitos) aptos a ser solução do problema proposto (emissão de ruído eletromagnético). Realizam-se então reproduções entre os indivíduos (novas simulações), gerando permutações de material genético através de cruzamentos, e insere-se material genético (novos agrupamentos de circuitos sugeridos pelo AG) novo através de mutações. Tudo isto respeitando a lei da genética natural que diz que os mais aptos (leiautes com menos emissão de ruído) têm mais probabilidade de sobreviver. Com isto vai-se melhorando a população inicial, sendo que os mais aptos correspondem aos indivíduos que obtêm um valor maior (maximização) ou menor (minimização) em uma equação de mérito que representa o objetivo do problema.

Etapa 6 Através do uso do laboratório de dispositivos eletromagnéticos a solução aprimorada será realizada e testada utilizando parte da instrumentação obtida através do financiamento deste projeto.

Ressalta-se ainda que o tema deste projeto tem por objetivo a melhoria de produtos produzidos na região considerando padrões internacionais de qualidade. Muito tem se discutido sobre a utilização consciente dos recursos ambientais nos últimos anos e sobre a produção de equipamentos ecologicamente corretos. Este projeto tem por objetivo

apresentar respostas para a redução da poluição eletromagnética e a sua conseqüente interação com os seres vivos e o consumo de energia que podem ser alcançados usando técnicas de aprimoramento dos sistemas embarcados.

Finalmente, a difusão do conhecimento adquirido com a colaboração de renomadas instituições representa um dos objetivos principais deste projeto.

Sintetizando, a metodologia empregada neste projeto visa desenvolver os itens relacionados abaixo:

- a. Desenvolver soluções tecnológicas a problemas do setor produtivo utilizando o eletromagnetismo aplicado, visando acelerar processos de fabricação;
- b. Proteção do ser humano, de equipamentos e da eletrônica embarcada em veículos sob ação de campos eletromagnéticos rápidos e intensos, contemplando a definição de padrões que assegurem proteção ao ser humano quando exposto a campos eletromagnéticos;
- c. Desenvolvimento de instrumentação e técnicas avançadas para medida e ensaios não destrutivos de precisão utilizando fenômenos eletromagnéticos;
- d. Desenvolver soluções tecnológicas para aumentar o rendimento e melhorar o desempenho das fontes renováveis de energia elétrica, tais como a eólica e a de hidráulica de baixa queda;
- e. Desenvolvimento de material humano para a continuidade das pesquisas;
- f. Geração de dados para gestores públicos visando a gestão da exposição do eletromagnetismo aos seres humanos e a equipamentos sensíveis à sua atuação.

## **Indicadores para Avaliação e Acompanhamento**

Os indicadores de avaliação e acompanhamento estão diretamente relacionados com os objetivos específicos do projeto da seguinte forma:

1)

- a) publicação em evento ou periódico da área sobre o desenvolvimento do método para avaliação do problema; depósito de registro de modelo de utilidade para a bobina desenvolvida através do projeto;
- b) realização de reuniões com o parceiro industrial definição das especificações;
- c) definição do procedimento de ensaio e do plano de teste de ensaio de compatibilidade eletromagnética;
- d) participação (in loco) de pesquisadores do LGEP no projeto;
- e) indicador a);
- f) formação de recursos humanos estabelecida pela participação de alunos de pós-graduação no projeto.

2)

- a) produção de dados e comparação dos mesmos às normas da ICNIRP para exposição de campos por seres humanos;
- b) apresentação dos dados preliminares ao parceiro industrial e readequação do produto caso necessário (comprovação através de reunião).

3)

- a) realização de análise de sensibilidade com a solução escolhida.

## **Resultados Esperados com a execução do projeto**

O resultado esperado é o estabelecimento da recarga “sem fio” como viável considerando a interoperabilidade do sistema. Este sistema deve ter alto desempenho energético e responder aos anseios práticos dos construtores e usuários.

Desta forma, o projeto deverá apresentar um modelo aprimorado e testá-lo. A parceria entre indústria e academia vai permitir que estes resultados sejam obtidos.

Além disso, é possível enumerar os seguintes resultados transversais:

- 1) desenvolvimento de uma nova linha de pesquisa aplicada na UFSC;
- 2) implementação de colaboração industrial (FORD);
- 3) desenvolvimento de uma colaboração universitária internacional (LGEP);
- 4) estimular atividades de desenvolvimento sobre os veículos elétricos no Brasil particularmente na Bahia.

## **Produtos Esperados**

Durante a realização dos objetivos específicos alguns produtos serão finalizados dentre eles podemos citar:

- 1) desenvolvimento de ferramenta numérica para avaliar bobinas de recarregamento de baterias;
- 2) modelo de utilidade de bobina para responder as expectativas do parceiro industrial;
- 3) método de ensaio para composição de norma específica do parceiro industrial;
- 4) estabelecimento de acordo de transferência de tecnologia com o parceiro acadêmico;
- 5) solução de gargalos tecnológicos no estado da Bahia para atração de novas indústrias.

## **Referências Bibliográficas**

[1] FOLHA DE SÃO PAULO. Opinião. São Paulo: 25 de março de 2013. Luiz Carlos Barreto: As demandas estratégicas do século 21.

[2] SAE Electric Vehicle Inductive Coupling Recommended Practice, SAE J-1773, Issued 1995-01, Revised 1999-11, Reaffirmed 2009-05.

[3] Baarman; David W. ; et al., inventor; Warner, Norcross & Judd; In Re: Alticor Inc., assignee. Printed Circuit Board Coil. United States patent US 20090085706. 2009 Aug 1.

[4] Kato; Hiroshi; et AL., inventor; Sony Ericsson Mobile Communications Japan, Inc., assignee. Noncontact power-transmission coil, portable terminal, and terminal charging device. United States patent US 20080164840. 2008 Jul 10.

[5] [Raedy](#); Steven; inventor; [Evatran Group, Inc.](#), assignee. Secondary coil structure of inductive charging system for electric vehicles. United States patent US 20130038276. 2013 Feb 13.

[6] M. Ibrahim; L. Pichon; L. Bernard and A. Razek, Electromagnetic Model of EV Wireless Charging Systems in view of Energy Transfer and Radiated Field Control. Compumag 2013 - Conference on the Computation of Electromagnetic Fields. (To appear).

[7] A. Taflove and S. Hagness, Computational Electrodynamics: The finite-difference time-domain method, Artech House, Norwood, 2000.

[8] N. Ida and J. P. Bastos, Electromagnetics and Calculation of Fields, Springer Verlag, New York, 1992.

- [9] Lotfi Beghou, Lionel Pichon, François Costa, Characterization of radiated electromagnetic fields using equivalent sources – Application to the EMC of power printed circuit boards, *C. R. Physique* 10 pp. 91–99, 2009.
- [10] Lotfi Beghou, Bing Liu, Lionel Pichon, François Costa, Synthesis of Equivalent 3-D Models from Near Field Measurements - Application to the EMC of Power Printed Circuit Boards, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, n°3, pp. 1650-1653, 2009.
- [11] M. Smaïl, L. Pichon, M. Olivas, F. Auzanneau, M. Lambert, Recent progress in wiring networks diagnosis for automotive applications, *COMPEL*, Vol. 30, n°4, 2011, pp 1148-1161.
- [12] Avila, S. L. Otimização Multiobjetivo e Análise de Sensibilidade para Concepção de Dispositivos Eletromagnéticos. Aplicação: Síntese de Antenas Refletores para Comunicação Via Satélite. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.
- [13] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory – Analysis and Design*, 2a ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [15] R. H. C. Takahashi, J. A. Ramirez, J. A. Vasconcelos, et al., “Sensitivity analysis for optimization problems solved by stochastic methods,” *IEEE – Transactions on Magnetics*, v. 37, n. 5, pp. 3566–3569, Set. 2001.
- [16] F. J. Barthold, “A short guide to variational design sensitivity analysis,” In: 6<sup>th</sup> WCSMO – World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, May – Jun. 2005.
- [17] X. L. Travassos et al., “Optimal configurations for perfectly matched layers in FDTD simulations,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 563-566, 2006.
- [18] X. L. Travassos et al., “Design of Meander-Line Antennas for Radio Frequency Identification Based on Multiobjective Optimization,” in *International Journal of Antennas and Propagation*, vol 2012. pp. 1-5, 2012.
- [19] X. L. Travassos et al., “Antenna Optimization Using Multiobjective Algorithms,” in *ISRN Communications and Networking*, vol 2012. pp. 1-8, 2012.
- [20] X. L. Travassos et al., “Solution of Maxwell's Equations for the Simulation and Optimization of the Radar Assessment of Concrete Structures,” in *Research in Nondestructive Evaluation*, vol 18. pp. 151 – 161, 2007.

## Equipe Executora

Membro	Área	Titulação	Instituição	Carga Horária	Função no Projeto
Xisto Lucas Travassos Junior	Circuitos Elétricos Magnéticos e Eletrônicos	Doutorado	SENAI CIMATEC	16	Coordenação – Desenvolvimento da Ferramenta Numérica – Desenvolvimento do Experimento

## Cronograma Físico-Financeiro

Atividade	Trimestre											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Desembolsos	A			B		C			D			
1 – As fontes de emissão de irradiação serão identificadas e caracterizadas	X	X										
2 – Determinação do modelo numérico considerando especificações do parceiro industrial e considerações do LGEP			X	X	X	X	X					
3 – Cálculo dos campos para diferentes posições e configurações							X	X	X			
4 – Aprimoramento do sistema de transmissão através do uso de algoritmos de otimização									X	X		
5 – Realização e medidas de campos em um protótipo aprimorado										X	X	X

## Orçamento Detalhado

<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Justificativa</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
(\$A) Computador de alto desempenho para computação científica	01	Desenvolvimento da modelagem numérica do sistema	15.322,40	15.322,40
(\$B) Fonte 2kW de alto desempenho	01	Fonte para experimentos de transferência de energia	22.000,00	22.000,00
(\$B) Cabo de Litz de alto desempenho	50 m	Construção de bobinas	3.000,00	3.000,00
(\$C) Passagem PAR/JOI/PAR – LGEP – UFSC	01	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	3.900,00	3.900,00
(\$C) Diárias em Salvador	14	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	404,00**	5.656,00
(\$D) Passagem JOI/PAR/JOI - UFSC – LGEP	01	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	3.900,00	3.900,00
(\$D) Diárias em Gif-Sur-Yvette	14	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	444,40*	6.221,60
<b>Total</b>				<b>60.000,00</b>

\*Diária de US\$ 220,00 – Cotação de 13/05/2013 1 US\$ = 2,02 R\$

\*\*Diária de US\$ 200,00



# **Aprimoramento da recarga por indução através de otimização com aplicação em veículos elétricos**

## **Resumo**

A preocupação ambiental tem se tornado um tema de pesquisa emergente por parte da indústria. Acredita-se que os impactos das atividades econômicas no meio ambiente devem ser reduzidos drasticamente para limitar a redução dos recursos naturais e do aquecimento global, os quais são vitais para o desenvolvimento de uma sociedade sustentável.

Hoje o veículo elétrico é uma solução consensual para a redução de emissões causadas por combustíveis fósseis. No entanto, esta solução necessita ainda de numerosos desenvolvimentos para que se tornem tão competitivos quanto os modelos de combustão interna.

Dentre todos os dispositivos passivos de melhoria, o processo de carregamento da bateria figura entre um dos principais itens para a adaptação do veículo elétrico à vida urbana moderna. Desta forma, a carga sem contato físico é uma oportunidade para o veículo elétrico. Esta solução assegura conforto na utilização além de robustez ao vandalismo e as intempéries.

O princípio deste sistema é o acoplamento magnético entre o emissor e o receptor. É sabido que esta forma de energia pode interferir em outros subsistemas do veículo. Dimensionar e aprimorar este dispositivo requer estudos e pesquisas detalhadas além de experimentos em laboratório.

Este é um projeto de inovação e conta com a participação do Laboratoire de Génie Electrique de Paris.

## **Introdução e Justificativa**

Os alimentos, as fontes de energia limpa, a água, os conteúdos criativos da informação e ainda o petróleo se constituirão nas maiores demandas do século 21.

Em matéria de alimento, o Brasil vem se preparando bem, com a adoção de inteligente política de produção. No campo da energia limpa, nossa posição é confortável dado o potencial hidroelétrico, a política atômica para fins pacíficos e as reservas de água potável (16% de toda a reserva mundial) [1].

O preocupante é pensar na nossa condição de produtores de tecnologia sustentável. A produção de veículos baseados no modelo de combustão interna no Brasil continua aumentando. O veículo elétrico ainda é uma realidade distante para a maioria da população e uma oportunidade para o crescimento sustentável.

Pode-se considerar que o estado de Santa Catarina tem duas montadoras de veículos (uma em funcionamento e outra em construção). No entanto, nossa capacidade técnica e científica para suportar inovações na área de tecnologia limpa para veículos é incipiente. O objetivo principal deste projeto é, portanto, dotar Santa Catarina e o Brasil de uma alternativa de pesquisa para utilização de energia limpa em substituição de combustíveis fósseis para veículos.

Hoje, o veículo elétrico necessita ainda de numerosos desenvolvimentos para se tornarem atrativos a maioria população. Dentre todas as melhorias, uma das mais importantes é a recarga das baterias.

Um dos elementos importantes em um sistema de recarga é a forma como a energia será transferida para o veículo. O modelo mais conhecido e comercializado hoje é o de contato ôhmico onde a energia é transferida através de um condutor. Este modelo é



incomodo para o usuário e aporta todas as perdas por efeito Joule. O segundo modelo é o chamado “sem fio” e é baseado pela transferência de energia por indução magnética. Existem discussões acaloradas entre os simpatizantes dos dois modelos. No entanto, hoje o conceito mais pesquisado no mundo é o “sem fio” devido às adversidades da vida urbana moderna. Além da questão comodidade pode-se também atribuir a este modelo a vantagem relacionada à segurança das pessoas.

É possível fazer a recarga da bateria sem contato e de forma automatizada o que é extremamente desejado para o auto-serviço. Desta forma, o nível de segurança também é item comercial. Contrariamente ao primeiro modelo.

O tempo de recarga é um problema comum aos dois modelos. O aprimoramento dos emissores e receptores é um problema ainda em desenvolvimento. A vida moderna não permite que ninguém perca mais de 20 minutos abastecendo o veículo. Aprimorar estes dispositivos eletromagnéticos é, desta forma, um desafio para a viabilidade dos veículos elétricos.

Não obstante, o número elevado de dispositivos elétricos e eletrônicos traz a preocupação do funcionamento adequado destes quando submetidos ao processo de transferência de energia “sem fio”. Este problema é conhecido como compatibilidade eletromagnética do sistema como um todo e é extremamente complexo e importante para o produto veículo elétrico.

Portanto, considera-se este projeto aderente a realidade atual de Santa Catarina que conta com duas montadoras de veículos a combustão interna e é estratégico para o setor industrial nacional como também para o país. Além disso, pode-se considerar este projeto como desenvolvimento de tecnologia para o crescimento sustentável do país e a manutenção das condições climáticas do planeta.

## **Objetivo Geral**

Este projeto visa desenvolver os conhecimentos e as metodologias que permitirão aos construtores de veículos elétricos entender: 1) a difusão magnética gerada pela transferência de energia elétrica por indução através da abordagem científica com o uso de técnicas numéricas e experimentos em laboratório sempre considerando o aprimoramento do sistema; 2) verificar a interoperabilidade deste sistema com os sistemas elétricos e eletrônicos já existentes no veículo através da aplicação de técnicas de compatibilidade eletromagnética; 3) entender o desempenho do sistema de veículos com grande espalhamento de energia em termos de rendimento energético e da análise de sensibilidade.

## **Objetivos Específicos**

Em relação ao objetivo geral é possível estabelecer os objetivos específicos da seguinte forma:

- 1) a difusão magnética gerada pela transferência de energia elétrica por indução através da abordagem científica com o uso de técnicas numéricas e experimentos em laboratório sempre considerando o aprimoramento do sistema;
  - a) desenvolver métodos numéricos para a abordagem mais realista do problema de acoplamento magnético;
  - b) conceber dispositivos de acordo com as demandas da indústria para posterior aprimoramento;
  - c) estabelecer métodos de medição para verificação do modelo desenvolvido;

- d) estabelecer parcerias com o setor industrial e científico visando a transferência de conhecimento;
  - e) consolidar relacionamentos internacionais para impulsionar a pesquisa científica da Bahia e torná-la competitiva internacionalmente;
  - f) formação de recursos humanos qualificados.
- 2) verificar a interoperabilidade deste sistema com os sistemas elétricos e eletrônicos já existentes no veículo através da aplicação de técnicas de compatibilidade eletromagnética;
- a) desenvolver testes específicos e propor padrões e normas para os testes de espalhamento magnético durante recarga de bateria;
  - b) identificar as demandas industriais e prover respostas para a aceleração do desenvolvimento de normas e produtos;
- 3) entender o desempenho do sistema de veículos com grande espalhamento de energia em termos de rendimento energético e da análise de sensibilidade.
- a) produzir dados sobre a análise de sensibilidade e possíveis alterações comuns no setor industrial.

## **Fundamentação Teórica**

Os veículos elétricos normalmente portam uma bateria que deve ser recarregada através de condutores, que carregam uma corrente alternada como a encontrada nas tomadas das casas, ou através de dispositivos indutivos para recarregamento. Na primeira opção o veículo deve ser ligado a uma fonte (normalmente uma tomada) com tensões nominais de 110 ou 220 V (padrão nacional). Na segunda opção a carga induzida é feita através de um transformado tendo enrolamentos do primário e no secundário para carregar a bateria do veículo. O primário é construído em uma estação fixa enquanto o secundário é preso no veículo. Um conversor é utilizado com frequência de ressonância em torno de 100kHz (entre 30kHz e 150kHz) o sistema dispõe também de um dispositivo de controle permitindo a adaptação de tensão na saída para o estado de carga da bateria.

Para maximizar a eficiência, é importante que o enrolamento secundário disposto no veículo esteja alinhado e próximo do enrolamento primário para que a recarga aconteça. Este requerimento apresenta algumas dificuldades para a realização da estrutura do enrolamento secundário. Se o dispositivo estiver perto do chão e desprotegido poderá ser danificado por pequenos acidentes normais no processo de condução do veículo ou objetos dispostos nas ruas e estradas. Por outro lado, se o secundário estiver muito próximo do veículo o campo magnético gerado pela corrente pode aquecer o metal nas proximidades a níveis perigosos. Além disso, o calor reduz a eficiência da transferência de energia durante a recarga.

Desenvolver e aprimorar o enrolamento para reduzir ou suprimir estes problemas é um dos desafios dos veículos elétricos. Este projeto focalizará o estudo das bobinas de indução sobretudo as questões relativas a compatibilidade eletromagnética - CEM (exposição humana e interoperabilidade com os outros sistemas) além do aprimoramento por meio de otimização geométrica dos indutores para melhorar a eficiência da transferência de energia para carga respeitando as condições de CEM [2].

Inúmeras configurações de bobinas são conhecidas no estado da técnica. A maioria apresenta diferentes configurações de enrolamentos de fio sobre um eixo central formando uma bobina com configuração anular. A bobina tem espessura lateral e vertical o que a faz inadequada para certas posições do veículo.

No entanto foram desenvolvidas configurações com altura reduzida como descrito em [3]. Nesta patente uma bobina é feita em uma placa de circuito impresso com várias

camadas. Em [4] uma aplicação multicamada com placas de circuito impresso flexíveis foi proposta sendo que cada uma continha uma bobina com padrão espiral.

Ainda que estas configurações operem satisfatoriamente ainda apresentam desvantagens em relação à fixação do enrolamento secundário no veículo para a carga indutiva [5].

Para que possa ser otimizada a estrutura planar utilizada como acoplador de transferência de energia deve ser modelada. Esta estrutura contém duas bobinas (um receptor e outra transmissora) ainda pode contar com dois ferrites de tamanhos distintos de forma a cobrir as bobinas e formar uma blindagem. Este projeto também pode incluir placas de aço para representar o chassi do veículo.

As duas bobinas podem ser idênticas e separadas por uma distância previamente determinada. Este problema é resolvido no domínio da frequência usando a formulação magnetodinâmica:

$$\text{rot} [ (\mu)^{-1} \times \text{rot} (A) ] + i \times \omega \times \sigma A = J_e$$

onde  $A$  é o potencial vetor,  $\mu$  é a permeabilidade,  $\omega$  é a frequência,  $\sigma$  é a condutividade e  $J_e$  é a densidade de corrente. A corrente de Foucault no ferrite é considerada e o chassi é considerado um condutor perfeito [6].

Para o desenvolvimento de simulações próximas a situações reais é necessário conhecer as condições de funcionamento do sistema (corrente nos indutores no processo de carregamento) estes dados reais poderão ser fornecidos pelo LGEP [6].

Existem dois caminhos para determinar a solução para esta equação: a solução analítica e/ou através de métodos numéricos. Considerando o problema acima o uso de soluções analíticas é inviável devido a complexidade da geometria do problema, a dependência temporal das condições de contorno e a não-homogeneidade do meio.

No entanto, a escolha de um método numérico não é trivial. Em geral para ser eficiente um método numérico deve garantir precisão, versatilidade, baixo custo computacional e habilidade para encontrar uma solução caso esta exista. É importante ressaltar que nenhuma técnica ou método consegue cumprir integralmente estes requisitos. Existem inúmeras diferentes técnicas, algumas baseadas em equações diferenciais parciais e outras em equações integrais. As técnicas que serão empregadas neste projeto são brevemente discutidas a seguir.

Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo

O método das diferenças finitas no domínio do tempo (Finite-Difference Time-Domain - FDTD) tem sido aplicado amplamente em problemas de eletromagnetismo incluindo problemas de domínio aberto. O FDTD é baseado na substituição da derivada por uma simples aproximação baseada em diferenças entre os valores de dois pontos distintos dividido pela distância entre eles. Desta forma, é possível substituir uma equação contínua com um número infinito de graus de liberdade por uma equação discretizada com número finito de variáveis. Considerado de simples realização computacional este método é capaz de resolver problemas não-lineares e anisotrópicos sem precisar de uma malha regular o que garante uma modelagem correta de campos que variam no espaço [7].

Considerando o problema em questão e os aspectos de CEM em si os dispositivos estudados tem características de chaveamento rápidas e portanto regimes transitórios que podem causar distorções no espectro. Estas distorções por sua vez geram espalhamento eletromagnético em frequências superiores ao evento de origem desta forma o uso do método FDTD é uma ótima escolha para o estudo temporal e análise do espectro. Dentro deste contexto, vale ressaltar a experiência no proponente no desenvolvimento e aprimoramento do algoritmo FDTD. Este possui uma ferramenta validada e amplamente difundida na comunidade acadêmica.

Método dos Elementos Finitos

O método dos elementos finitos (Finite Element Method - FEM) é uma técnica para solução de equações diferenciais desenvolvida originalmente para problemas mecânicos estruturais. No eletromagnetismo o FEM é associado com métodos variacionais e residuais. O princípio deste método consiste em dividir o domínio de estudo em subdomínios não necessariamente de mesma forma e dimensão. Este procedimento permite ao FEM variar a densidade dos elementos de acordo com a necessidade do problema. Em cada elemento a solução é representada por uma função polinomial [8].

Além disso, para tratar as descontinuidades encontradas em regiões entre meios com diferentes propriedades, elementos finitos de aresta são usados devido a sua precisão. Para problemas em três dimensões (3D) um elemento tetraédrico geralmente é utilizado. Analisando a complexidade do problema através das principais estruturas (bobinas, blindagem, veículo e ambiente) percebe-se uma pluralidade de materiais e geometrias complexas que merecem tratamento específico quanto ao cálculo dos fenômenos eletromagnéticos. Em se tratando de descontinuidades e mudanças de meio o FEM estabelece uma grande vantagem quando comparado ao FDTD. Para a aplicação desta ferramenta o projeto conta com a vasta experiência do LGEP na criação de desenvolvimento de ferramentas numéricas baseadas neste método [9]-[11].

Apesar do FDTD ser conceitualmente mais simples e de fácil realização em comparação com o FEM este é mais poderoso e versátil para problemas com geometria complexa e meio não-homogêneo. Entretanto, para processos de otimização no domínio do tempo o uso do FEM torna-se proibitivo devido ao tamanho da matriz gerada para solução do problema.

Existem muitos métodos de otimização e cada um deles alcança melhores resultados em determinados tipos de problema. A escolha do método depende de uma série de características do problema a ser otimizado, principalmente do comportamento da função que o representa, a qual muitas vezes é de difícil determinação. Para esta escolha, faz-se necessário também um bom conhecimento das ferramentas de otimização [12].

De acordo com as características dos problemas, podem-se classificar as ferramentas de otimização em dois grandes grupos: programação linear e programação não-linear. O primeiro grupo trata da resolução de problemas que sejam perfeitamente representados por um sistema de equações lineares. A programação não-linear trata de problemas não lineares.

As técnicas para programação não-linear podem ser subdivididas em três subgrupos: métodos determinísticos, estocásticos e enumerativos. Os métodos determinísticos são baseados no cálculo de derivadas, ou em aproximações destas.

Necessitam, portanto, de alguma informação do vetor gradiente, seja procurando o ponto onde ele se anula ou usando a direção para a qual aponta. Os métodos estocásticos utilizam um conjunto de ações probabilísticas que buscam a solução ótima de maneira ‘aleatória orientada’, sem necessitar de qualquer informação de derivadas ou sobre o comportamento do problema. Já os métodos enumerativos fazem uma varredura completa (busca exaustiva) de todas as possíveis soluções, o que, na maior parte dos problemas, implica em um tempo excessivo de cálculo.

Na engenharia, particularmente em eletromagnetismo, os problemas são geralmente complexos, não-lineares, de difícil representação e necessitam de métodos numéricos para se obter a solução (Bastos & Sadowski [13] e Balanis [14], por exemplo). Por isto, ferramentas de programação não-linear estocásticas são as mais aptas para a otimização destes problemas.

O problema abordado neste projeto têm requisitos técnicos e financeiros que devem ser tratados no processo de otimização. Geralmente estes requisitos são antagônicos. Para

este tipo de problemas devem ser usadas ferramentas de otimização multiobjetivo. Estas ferramentas não apontam para somente uma solução, mas um grupo de soluções chamada de curva de Pareto.

Se ainda forem considerados aspectos de ordem prática (imprecisão na construção, por exemplo), é necessário verificar se a qualidade de uma solução permanece aceitável quando os parâmetros a ela associados sofrem pequenas variações. Como ilustração, a obtenção de uma asa de avião que produza um ganho fenomenal em eficiência aerodinâmica pode não significar grande vantagem se, com a variação de alguns milímetros em sua posição (causada por trepidação, por exemplo), este ganho seja completamente diferente.

Assim, a maximização da imunidade da solução às perturbações pode se tornar um novo objetivo na obtenção da solução ótima. Em projetos práticos é necessária, portanto, uma análise de sensibilidade das soluções obtidas pelo processo de otimização (Ávila [12], Takahashi et al. [15], Barthold [16], dentre outros).

Desta forma, o método numérico selecionado deverá ser acoplado ao algoritmo de otimização para que possíveis soluções de acordo com as restrições impostas sejam encontradas a exemplo do que foi realizado em [17]-[20].

## **Metodologia**

A metodologia a ser empregada é descrita, resumidamente, a seguir.

Como critério geral, menciona-se que, na avaliação do sistema de transferência de energia, a fonte de irradiação será a bobina. Assim, as seguintes etapas podem ser descritas referentes ao processo proposto:

- 1) Inicialmente, as fontes de emissão de irradiação serão identificadas e caracterizadas;
- 2) A partir deste estudo, modelos numéricos serão determinados, considerando especificações do parceiro industrial e considerações da equipe do LGEP;
- 3) Estes modelos serão, então, introduzidas em um software de cálculo de campos eletromagnéticos;
- 4) Os campos eletromagnéticos em diferentes pontos serão calculados, considerando-se as características do local da fonte (carroceria, fuselagem, presença de elementos próximos etc.);
- 5) Os campos eletromagnéticos irradiados em equipamentos vizinhos à fonte, assim como os níveis de perturbação induzidas nos cabos, serão determinados. Ressalta-se que, nesta etapa, as considerações das incertezas relacionadas ao arranjo e roteamento dos cabos serão, especialmente, abordadas utilizando-se processos de otimização;
- 6) Realização de uma possível solução aprimorada e proposição ao parceiro industrial.

De forma resumida, as cinco etapas citadas serão descritas a seguir:

**Etapas 1** Para a identificação das bobinas (em um sistema de transferência de energia sem contato) é necessário um modelo mesmo. O modelo do veículo poderá ser o próprio veículo seccionado ou somente o sistema eletrônico do mesmo. A idéia principal é simular o processo de recarga de bateria em um veículo elétrico aos mesmos níveis de solicitação eletromagnética que sofreriam quando testadas em montagens normalizadas, ou seja, o veículo completo.

**Etapas 2** A obtenção de modelos numéricos equivalentes deverá ser baseada em dados experimentais.

**Etapas 3** Uma vez que o modelo seja definido, estas serão introduzidas num software de cálculo de campos para a resolução dos problemas de espalhamento e irradiação. Nesta etapa três opções se apresentam: a utilização de softwares comerciais, a saber, a versão Microwave Studio, a utilização de uma ferramenta usando o método das diferenças

finitas no domínio do tempo desenvolvido pelo proponente deste projeto e/ou a utilização de ferramentas numéricas desenvolvidas pelo LGEP sendo que esta última já esta sendo utilizada para desenvolvimento de bobinas para veículos elétricos.

A ferramenta FDTD esta sendo desenvolvida há 5 anos fazendo parte de inúmeras publicações em renomados congressos e revistas internacionais. O método FDTD é uma técnica aproximada para solucionar equações diferenciais parciais. Este método tem sido aplicado a vários problemas de contorno em eletromagnetismo, incluindo os problemas de domínio aberto. O método das diferenças finitas pode ser considerado uma das mais antigas técnicas de solução aplicadas na resolução de equações diferenciais parciais. E, com o aumento dos recursos computacionais, este método vem sendo cada vez mais utilizado.

O FDTD baseia-se na substituição da operação de diferenciação por uma simples operação de subtração nos pontos de interesse seguida de uma divisão pelo intervalo entre os pontos considerados. Desta forma, é possível substituir uma equação contínua, com infinitos graus de liberdade, por uma equação discretizada, com número finito de nós.

Através deste processo, a equação diferencial parcial original é transformada em um conjunto de equações algébricas cuja solução simultânea fornece a solução aproximada da equação original do problema de contorno. O método de diferenças finitas é de simples implementação computacional. Além disso, é capaz de tratar problemas não-lineares e anisotrópicos, não tendo a obrigatoriedade de uma malha regular, o que permite uma boa modelagem de campos que variam rapidamente no espaço ou a modelagem correta de problemas que possuem superfícies curvas.

Etapa 4 Esta etapa consiste numa campanha de simulações envolvendo o modelo de fontes e as ferramentas de cálculo numérico descritas na etapa anterior para a obtenção dos dados suficientes para a resolução do problema de otimização que será tratado na etapa 5.

Etapa 5 A partir dos dados obtidos na etapa 4 um processo de otimização da posição dos equipamentos e seus cabos será feito. Para isso, propõe-se a utilização de métodos de otimização estocásticos baseados em evolução como os algoritmos genéticos. Os Algoritmos Genéticos (AG) são algoritmos de otimização estocásticos que trabalham de forma aleatória orientada de acordo com regras probabilísticas baseadas numa analogia com os mecanismos da genética natural. Isto é, inicialmente cria-se uma população de indivíduos (posicionamento geométrico dos cabos e circuitos) aptos a ser solução do problema proposto (emissão de ruído eletromagnético). Realizam-se então reproduções entre os indivíduos (novas simulações), gerando permutações de material genético através de cruzamentos, e insere-se material genético (novos agrupamentos de circuitos sugeridos pelo AG) novo através de mutações. Tudo isto respeitando a lei da genética natural que diz que os mais aptos (leiautes com menos emissão de ruído) têm mais probabilidade de sobreviver. Com isto vai-se melhorando a população inicial, sendo que os mais aptos correspondem aos indivíduos que obtêm um valor maior (maximização) ou menor (minimização) em uma equação de mérito que representa o objetivo do problema.

Etapa 6 Através do uso do laboratório de dispositivos eletromagnéticos a solução aprimorada será realizada e testada utilizando parte da instrumentação obtida através do financiamento deste projeto.

Ressalta-se ainda que o tema deste projeto tem por objetivo a melhoria de produtos produzidos na região considerando padrões internacionais de qualidade. Muito tem se discutido sobre a utilização consciente dos recursos ambientais nos últimos anos e sobre a produção de equipamentos ecologicamente corretos. Este projeto tem por objetivo

apresentar respostas para a redução da poluição eletromagnética e a sua conseqüente interação com os seres vivos e o consumo de energia que podem ser alcançados usando técnicas de aprimoramento dos sistemas embarcados.

Finalmente, a difusão do conhecimento adquirido com a colaboração de renomadas instituições representa um dos objetivos principais deste projeto.

Sintetizando, a metodologia empregada neste projeto visa desenvolver os itens relacionados abaixo:

- a. Desenvolver soluções tecnológicas a problemas do setor produtivo utilizando o eletromagnetismo aplicado, visando acelerar processos de fabricação;
- b. Proteção do ser humano, de equipamentos e da eletrônica embarcada em veículos sob ação de campos eletromagnéticos rápidos e intensos, contemplando a definição de padrões que assegurem proteção ao ser humano quando exposto a campos eletromagnéticos;
- c. Desenvolvimento de instrumentação e técnicas avançadas para medida e ensaios não destrutivos de precisão utilizando fenômenos eletromagnéticos;
- d. Desenvolver soluções tecnológicas para aumentar o rendimento e melhorar o desempenho das fontes renováveis de energia elétrica, tais como a eólica e a de hidráulica de baixa queda;
- e. Desenvolvimento de material humano para a continuidade das pesquisas;
- f. Geração de dados para gestores públicos visando a gestão da exposição do eletromagnetismo aos seres humanos e a equipamentos sensíveis à sua atuação.

## **Indicadores para Avaliação e Acompanhamento**

Os indicadores de avaliação e acompanhamento estão diretamente relacionados com os objetivos específicos do projeto da seguinte forma:

1)

- a) publicação em evento ou periódico da área sobre o desenvolvimento do método para avaliação do problema; depósito de registro de modelo de utilidade para a bobina desenvolvida através do projeto;
- b) realização de reuniões com o parceiro industrial definição das especificações;
- c) definição do procedimento de ensaio e do plano de teste de ensaio de compatibilidade eletromagnética;
- d) participação (in loco) de pesquisadores do LGEP no projeto;
- e) indicador a);
- f) formação de recursos humanos estabelecida pela participação de alunos de pós-graduação no projeto.

2)

- a) produção de dados e comparação dos mesmos às normas da ICNIRP para exposição de campos por seres humanos;
- b) apresentação dos dados preliminares ao parceiro industrial e readequação do produto caso necessário (comprovação através de reunião).

3)

- a) realização de análise de sensibilidade com a solução escolhida.

## **Resultados Esperados com a execução do projeto**

O resultado esperado é o estabelecimento da recarga “sem fio” como viável considerando a interoperabilidade do sistema. Este sistema deve ter alto desempenho energético e responder aos anseios práticos dos construtores e usuários.

Desta forma, o projeto deverá apresentar um modelo aprimorado e testá-lo. A parceria entre indústria e academia vai permitir que estes resultados sejam obtidos.

Além disso, é possível enumerar os seguintes resultados transversais:

- 1) desenvolvimento de uma nova linha de pesquisa aplicada na UFSC;
- 2) implementação de colaboração industrial (FORD);
- 3) desenvolvimento de uma colaboração universitária internacional (LGEP);
- 4) estimular atividades de desenvolvimento sobre os veículos elétricos no Brasil particularmente na Bahia.

## **Produtos Esperados**

Durante a realização dos objetivos específicos alguns produtos serão finalizados dentre eles podemos citar:

- 1) desenvolvimento de ferramenta numérica para avaliar bobinas de recarregamento de baterias;
- 2) modelo de utilidade de bobina para responder as expectativas do parceiro industrial;
- 3) método de ensaio para composição de norma específica do parceiro industrial;
- 4) estabelecimento de acordo de transferência de tecnologia com o parceiro acadêmico;
- 5) solução de gargalos tecnológicos no estado da Bahia para atração de novas indústrias.

## **Referências Bibliográficas**

[1] FOLHA DE SÃO PAULO. Opinião. São Paulo: 25 de março de 2013. Luiz Carlos Barreto: As demandas estratégicas do século 21.

[2] SAE Electric Vehicle Inductive Coupling Recommended Practice, SAE J-1773, Issued 1995-01, Revised 1999-11, Reaffirmed 2009-05.

[3] Baarman; David W. ; et al., inventor; Warner, Norcross & Judd; In Re: Alticor Inc., assignee. Printed Circuit Board Coil. United States patent US 20090085706. 2009 Aug 1.

[4] Kato; Hiroshi; et AL., inventor; Sony Ericsson Mobile Communications Japan, Inc., assignee. Noncontact power-transmission coil, portable terminal, and terminal charging device. United States patent US 20080164840. 2008 Jul 10.

[5] [Raedy](#); Steven; inventor; [Evatran Group, Inc.](#), assignee. Secondary coil structure of inductive charging system for electric vehicles. United States patent US 20130038276. 2013 Feb 13.

[6] M. Ibrahim; L. Pichon; L. Bernard and A. Razek, Electromagnetic Model of EV Wireless Charging Systems in view of Energy Transfer and Radiated Field Control. Compumag 2013 - Conference on the Computation of Electromagnetic Fields. (To appear).

[7] A. Taflove and S. Hagness, Computational Electrodynamics: The finite-difference time-domain method, Artech House, Norwood, 2000.

[8] N. Ida and J. P. Bastos, Electromagnetics and Calculation of Fields, Springer Verlag, New York, 1992.



- [9] Lotfi Beghou, Lionel Pichon, François Costa, Characterization of radiated electromagnetic fields using equivalent sources – Application to the EMC of power printed circuit boards, *C. R. Physique* 10 pp. 91–99, 2009.
- [10] Lotfi Beghou, Bing Liu, Lionel Pichon, François Costa, Synthesis of Equivalent 3-D Models from Near Field Measurements - Application to the EMC of Power Printed Circuit Boards, *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 45, n°3, pp. 1650-1653, 2009.
- [11] M. Smaïl, L. Pichon, M. Olivas, F. Auzanneau, M. Lambert, Recent progress in wiring networks diagnosis for automotive applications, *COMPEL*, Vol. 30, n°4, 2011, pp 1148-1161.
- [12] Avila, S. L. Otimização Multiobjetivo e Análise de Sensibilidade para Concepção de Dispositivos Eletromagnéticos. Aplicação: Síntese de Antenas Refletores para Comunicação Via Satélite. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina. 2006.
- [13] J. P. A. Bastos and N. Sadowski, *Electromagnetic Modeling by Finite Element Methods*, Marcel Dekker, New York, 2003.
- [14] C. A. Balanis, *Antenna Theory – Analysis and Design*, 2a ed., John Wiley & Sons, New York, 1997.
- [15] R. H. C. Takahashi, J. A. Ramirez, J. A. Vasconcelos, et al., “Sensitivity analysis for optimization problems solved by stochastic methods,” *IEEE – Transactions on Magnetics*, v. 37, n. 5, pp. 3566–3569, Set. 2001.
- [16] F. J. Barthold, “A short guide to variational design sensitivity analysis,” In: 6<sup>th</sup> WCSMO – World Congress on Structural and Multidisciplinary Optimization, Rio de Janeiro, Brazil, May – Jun. 2005.
- [17] X. L. Travassos et al., “Optimal configurations for perfectly matched layers in FDTD simulations,” in *IEEE Transactions on Magnetics*, vol. 42, pp. 563-566, 2006.
- [18] X. L. Travassos et al., “Design of Meander-Line Antennas for Radio Frequency Identification Based on Multiobjective Optimization,” in *International Journal of Antennas and Propagation*, vol 2012. pp. 1-5, 2012.
- [19] X. L. Travassos et al., “Antenna Optimization Using Multiobjective Algorithms,” in *ISRN Communications and Networking*, vol 2012. pp. 1-8, 2012.
- [20] X. L. Travassos et al., “Solution of Maxwell's Equations for the Simulation and Optimization of the Radar Assessment of Concrete Structures,” in *Research in Nondestructive Evaluation*, vol 18. pp. 151 – 161, 2007.

## Equipe Executora

Membro	Área	Titulação	Instituição	Carga Horária	Função no Projeto
Xisto Lucas Travassos Junior	Circuitos Elétricos Magnéticos e Eletrônicos	Doutorado	SENAI CIMATEC	16	Coordenação – Desenvolvimento da Ferramenta Numérica – Desenvolvimento do Experimento

## Cronograma Físico-Financeiro

Atividade	Trimestre											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Desembolsos	A			B		C			D			
1 – As fontes de emissão de irradiação serão identificadas e caracterizadas	X	X										
2 – Determinação do modelo numérico considerando especificações do parceiro industrial e considerações do LGEP			X	X	X	X	X					
3 – Cálculo dos campos para diferentes posições e configurações							X	X	X			
4 – Aprimoramento do sistema de transmissão através do uso de algoritmos de otimização									X	X		
5 – Realização e medidas de campos em um protótipo aprimorado										X	X	X

## Orçamento Detalhado

<b>Descrição</b>	<b>Quantidade</b>	<b>Justificativa</b>	<b>Valor Unitário</b>	<b>Valor Total</b>
(\$A) Computador de alto desempenho para computação científica	01	Desenvolvimento da modelagem numérica do sistema	15.322,40	15.322,40
(\$B) Fonte 2kW de alto desempenho	01	Fonte para experimentos de transferência de energia	22.000,00	22.000,00
(\$B) Cabo de Litz de alto desempenho	50 m	Construção de bobinas	3.000,00	3.000,00
(\$C) Passagem PAR/JOI/PAR – LGEP – UFSC	01	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	3.900,00	3.900,00
(\$C) Diárias em Salvador	14	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	404,00**	5.656,00
(\$D) Passagem JOI/PAR/JOI - UFSC – LGEP	01	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	3.900,00	3.900,00
(\$D) Diárias em Gif-Sur-Yvette	14	Colaboração para desenvolvimento do modelo numérico	444,40*	6.221,60
<b>Total</b>				<b>60.000,00</b>

\*Diária de US\$ 220,00 – Cotação de 13/05/2013 1 US\$ = 2,02 R\$

\*\*Diária de US\$ 200,00

