

SIMULAÇÃO DO DESEMPENHO DE MOTORES E GERADORES DE RELUTÂNCIA CHAVEADOS

Pedro P. de Paula¹, Wanderlei M. da Silva¹, José R. Cardoso² e Sílvio I. Nabeta²

¹Universidade Cruzeiro do Sul - UNICSUL

²Universidade de São Paulo - USP

São Paulo – SP – Brasil

e-mail: ¹ ppdepaula@uol.com.br; ² nabeta@pea.usp.br

Resumo – Este artigo mostra alguns aspectos da simulação de motores e geradores de relutância chaveados. Utiliza-se inicialmente o método dos elementos finitos magnetostático para a obtenção das curvas de torque e fluxo concatenado versus corrente de fase e posição angular do rotor. Estes resultados são utilizados para o desenvolvimento de simulações com métodos analíticos usando-se o programa Mathcad. Em seguida, utiliza-se o método dos elementos finitos acoplado com as equações de circuitos para a simulação do desempenho, tanto como motor, como no funcionamento como gerador. São apresentados também alguns resultados experimentais. Os protótipos utilizados têm 3 fases, 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor.

Palavras-chave – método dos elementos finitos; motor/gerador de relutância chaveado; simulação.

SWITCHED RELUCTANCE MOTOR AND GENERATOR PERFORMANCE SIMULATION

Abstract - This paper shows the simulation of switched reluctance motors and generators. The magnetostatic finite-element method is used to obtain the static torque and linkage flux versus phase current and rotor position. These results are used to develop the performance simulations in a Mathcad environment. The simulation with the finite-element method coupled with circuit equations is also focused. The main features of both methods are discussed. Some test results are presented. The machines prototypes have 3 phases, 6 stator poles and 4 rotor poles.

Keywords - finite-element method; switched reluctance motor/generator, simulation.

I. INTRODUÇÃO

No atual contexto do desenvolvimento tecnológico, os engenheiros dispõem de inúmeras alternativas para o acionamento de cargas mecânicas em velocidade variável e os motores de relutância chaveados se apresentam como uma alternativa viável em inúmeras aplicações. Embora este tipo de máquina seja conhecido desde meados do século XIX, sua utilização prática em larga escala somente está se tornando viável graças aos avanços da eletrônica de potência, do

controle eletrônico e do projeto assistido por computador, ocorridos nas últimas décadas[1].

A aplicação deste tipo de máquina como gerador elétrico ou como freio regenerativo também está encontrando seus espaços nos novos sistemas e equipamentos, tais como, gerador de bordo em aviões, motor de arranque e gerador de automóveis e geradores eólicos. Conforme já demonstrado em laboratório e em alguns protótipos, esta máquina também apresenta um excelente desempenho na geração de energia elétrica em regimes de velocidade variável [2-6].

Com a finalidade do aproveitamento dos seus aspectos vantajosos em novas aplicações, torna-se necessário o desenvolvimento de técnicas de projeto específicas para estes novos tipos de máquinas elétricas. Assim, uma das finalidades deste artigo é apresentar uma contribuição a este enfoque, ao desenvolvimento de ferramentas específicas de projeto, mais particularmente, nos aspectos relacionados à simulação computacional do desempenho destes acionamentos. Assim, num primeiro momento torna-se conveniente destacar alguns aspectos relacionados a este tema onde se insere este artigo:

a) desde os primórdios da disponibilização de computadores, eles foram usados para o projeto de máquinas elétricas, inicialmente, simplesmente codificando métodos de projeto consagrados pela prática;

b) nas duas últimas décadas, observou-se um forte desenvolvimento dos programas de elementos finitos disponíveis comercialmente capazes de resolver problemas eletromagnéticos em duas ou três dimensões;

c) os mais recentes desenvolvimentos destes programas oferecem as possibilidades de levar em consideração as correntes parasitas, os transientes eletromagnéticos e o acoplamento com as equações de circuitos elétricos, com as equações mecânicas e térmicas. Porém, destaca-se que estes tipos de abordagens somente podem ser feitos por pessoal altamente especializado;

d) o método dos elementos finitos (MEF) se apresenta muito mais como uma ferramenta de análise do que como ferramenta de projeto, que, dependendo do tipo de análise que se pretende fazer, o tempo de processamento pode se tornar um sério obstáculo. Entretanto, trata-se de uma ferramenta extremamente útil para a compreensão de certos tipos de fenômenos cujo estudo seria inviável por métodos mais convencionais;

e) um outro aspecto a destacar é o surgimento de métodos de projeto baseados em planilhas e formulações analíticas usando, por exemplo, o programa Excel ou Delphi e o desenvolvimento de simulações com modelos analíticos mais simplificados usando o programa Mathcad (que será apresentado neste artigo) ou Matlab/Simulink. As simulações

Artigo Submetido em 09/03/2003. Primeira Revisão em 26/04/2003. Segunda Revisão em 18/06/2003. Aceito sob recomendação do Editor Especial Prof. Richard Magdalena Stephan.

com modelos mais simplificados permitem a avaliação dos efeitos de diversos parâmetros sobre o projeto global com uma redução do tempo de processamento.

Neste artigo será feita inicialmente uma explanação de aspectos construtivos e de funcionamento deste tipo de máquina elétrica. Em seguida, será feita uma abordagem do uso do método dos elementos finitos, caso magnetostático, para a obtenção das curvas características de fluxo concatenado e torque em função da posição angular do rotor e da corrente. A partir destes dados, serão apresentados os aspectos concernentes à simulação do desempenho usando o programa Mathcad. Serão apresentados também os aspectos relacionados à simulação do desempenho, como motor e como gerador, usando o método dos elementos finitos acoplado com as equações de circuitos. Para finalizar o trabalho serão apresentados alguns resultados experimentais e comparações com as simulações com alguns comentários e conclusões obtidas.

II. MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO

Os motores e geradores de relutância chaveados se destacam entre os demais tipos de acionamentos elétricos pela sua simplicidade construtiva, aliada com um alto rendimento e flexibilidade operacional. A configuração do conversor eletrônico necessário para a alimentação da máquina elétrica também é bastante simples e requer um número de chaves de potência menor do que os dos demais tipos de máquinas. Desta forma é possível obter um acionamento em velocidade variável com alto rendimento e de baixo custo para os mais diversos tipos de aplicações industriais, domésticas, comerciais e de serviços públicos.

Destaca-se também o fato de que este tipo de máquina elétrica não se comporta como as máquinas elétricas convencionais que são capazes de funcionar em regime permanente com valores constantes de tensões ou correntes, eficazes ou instantâneos, conforme se tratem de máquinas CA ou CC. Na verdade, as formas de onda das correntes dependem fortemente dos ajustes dos parâmetros de controle e a otimização do seu desempenho é possibilitada pelo desenvolvimento de algoritmos de controle adequados.

Com a finalidade de ilustrar a descrição, são apresentadas as Figs. 1 e 2, que são representativas dos protótipos. Como pode ser observado na Fig. 1, o motor de relutância chaveado apresenta pólos salientes no estator e no rotor, e é construído com pacotes de lâminas de aço silício, montadas em planos perpendiculares ao eixo. Não há enrolamentos de nenhuma espécie no rotor e nem ímãs permanentes e, portanto, não há anéis, escovas e nem comutadores. Para assegurar a possibilidade de partida em qualquer posição angular do rotor, os números de pólos do estator e do rotor têm que ser diferentes. Os protótipos utilizados neste trabalho têm 3 fases, 6 pólos no estator e 4 pólos no rotor. As bobinas das fases são concêntricas e são montadas em pólos diametralmente opostos do estator com adequadas polaridades.

Devido ao fato de o motor desenvolver unicamente torque de relutância, o sentido do torque a ser desenvolvido dependerá unicamente das posições relativas dos pólos do rotor em relação à fase que estiver sendo energizada. Disto decorre também a possibilidade de operação em ambos os sentidos de rotação. Adicionalmente, o sentido de corrente

nas fases não afeta o sentido de torque e, portanto, as fases do motor são alimentadas com correntes unidirecionais simplificando bastante o seu conversor e minimizando o número de chaves necessárias por fase.

Na sua operação, o motor necessita de sensores de posição angular para o chaveamento das fases e o sentido de rotação dependerá exclusivamente da seqüência de chaveamento. O chaveamento das fases é definido pelo sistema de controle, levando-se em conta os sinais dos sensores e a velocidade. Devido à sua forma construtiva e ao seu próprio princípio de funcionamento, a indutância de cada fase varia fortemente com a posição angular do rotor e com o nível de saturação dos materiais ferromagnéticos. O valor máximo da indutância de uma fase ocorrerá quando um par de pólos do rotor está alinhado com os respectivos pólos do estator. O valor mínimo ocorrerá quando o eixo interpolar do rotor estiver alinhado com os respectivos pólos do estator. Quanto maior for a relação entre estes valores máximo e mínimo, maior será a relação torque desenvolvido/ampère.

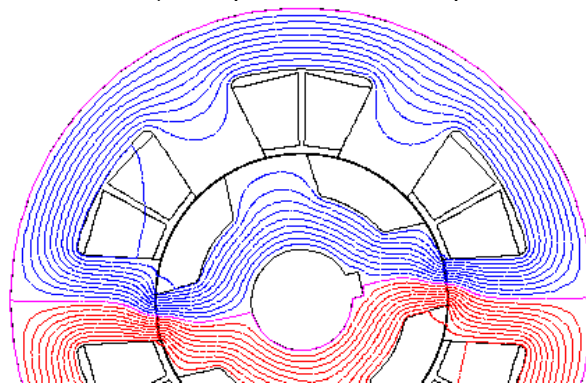


Fig. 1 – Seção transversal e mapeamento do fluxo

A Fig. 2 apresenta o esquema do conversor utilizado neste trabalho que permite a operação nos quatro quadrantes. Neste esquema, as fases são independentes umas das outras e se ocorrer uma falha em uma fase, a máquina poderá continuar operando com uma potência menor. Este tipo de conversor é largamente utilizado nas aplicações.

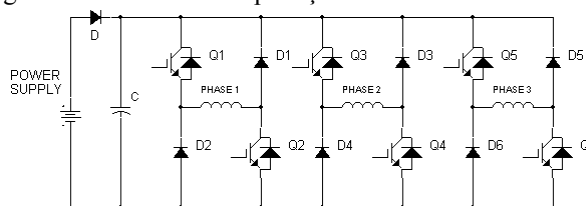


Fig. 2 – Conversor em meia-ponte assimétrica

Há dois modos de operação para este conversor: a operação no modo de pulso único e a operação com o recortamento da tensão do barramento CC. O ângulo de condução de cada fase é determinado pela lógica de controle a partir dos sinais do sensor de posição angular do rotor. No modo de recortamento de tensão, durante o período de condução, as chaves de potência são ligadas e desligadas numa frequência elevada para controlar o valor médio da tensão de fase e limitar a corrente. A modulação por largura de pulso (PWM) pode ser usada para limitar a corrente nas faixas inferiores e intermediárias de velocidade. Define-se a velocidade de base como a máxima na qual o motor desenvolve máximo torque, ou a menor velocidade na qual o

motor desenvolve máxima potência. Acima da velocidade de base, o tempo de condução das chaves será tal que as chaves de potência de cada fase serão ligadas e desligadas uma única vez em cada período de condução. Este modo de operação é o que se convencionou denominar modo de pulso único.

A operação como gerador refere-se, unicamente, ao modo de operação de pulso único e é obtido através de um adequado atraso do ângulo de condução das chaves de potência. A aplicação desta máquina como gerador está sendo considerada em aplicações que requerem uma larga faixa de velocidades, robustez, funcionamento em ambientes agressivos e tolerância à falhas. O gerador alimenta o barramento CC através do mesmo conversor utilizado para a operação como motor. Tudo o que se precisa fazer é suprir a energia mecânica necessária e dispor de um adequado sistema de controle para provocar o atraso dos ângulos de condução das fases. O gerador apresentado neste artigo é auto-excitado, ou seja, não necessita permanentemente de uma fonte para criar o fluxo concatenado com as fases. Os ângulos de controle podem ser adequadamente ajustados para otimizar a operação do equipamento.

III. MEF – CASO MAGNETOSTÁTICO

A primeira etapa para o projeto de uma nova máquina é a utilização das equações clássicas ou a utilização de métodos baseados em planilhas eletrônicas, conforme citadas anteriormente, para a obtenção das dimensões principais da máquina. Estas equações estão relacionadas ao carregamento elétrico e ao carregamento magnético. Levando-se em consideração os requisitos a serem atendidos, os recursos disponíveis e eventuais restrições, esta primeira etapa fornece as dimensões principais da máquina. Após esta primeira etapa, deve-se utilizar algum método de refinamento da solução ou soluções encontradas, visando a obtenção das dimensões finais. Este método poderá consistir no uso balanceado de técnicas mais clássicas com computacionais.

Um outro aspecto a ser considerado é o desenvolvimento das atividades de fabricação e experimentais com protótipos. Estas atividades devem ser ponderadas, pois, podem se tornar sérios inconvenientes para o desenvolvimento de novos produtos com preços competitivos. Atualmente, com os modernos métodos computacionais que são cada vez mais precisos e confiáveis, uma boa parte dos custos com atividades com protótipos pode ser evitada.

As atividades descritas neste artigo foram desenvolvidas utilizando-se o programa Flux2D [7] que resolve problemas de campos eletromagnéticos complexos através do método dos elementos finitos (MEF). A solução de problemas com geometria bi-dimensional é obtida pela discretização da seção transversal do motor num grande número de pequenos elementos de área denominados elementos finitos, mostrados na Fig. 3. Este programa leva em consideração as não-linearidades do domínio de estudo para resolver as equações diferenciais de forma a obter os valores nodais do vetor potencial magnético A . A partir disto todas as grandezas de campo de interesse tais como, a indução magnética, o fluxo magnético e outras podem ser determinadas.

A seção transversal em estudo é dividida em regiões caracterizadas pelos diferentes materiais usados na construção dos vários componentes da máquina, tais como, o eixo, as lâminas do rotor, as lâminas do estator, os

condutores, o entreferro, etc. Cada material é caracterizado pelas suas propriedades físicas. Considera-se que todos os materiais são isotrópicos.

O domínio de estudo contém 9926 elementos triangulares. O maior refinamento da malha é feito em torno do entreferro pois, é nessa parte que se espera obter uma maior variação das grandezas eletromagnéticas. O entreferro é representado por um anel e é caracterizado como sendo um entreferro rotativo. Esta é uma ferramenta disponível no programa Flux2D desenvolvida para facilitar os estudos de geometrias nas quais ocorrem movimentos relativos entre regiões, como, por exemplo, o movimento do rotor em relação ao estator. O entreferro rotativo consiste numa superfície com uma única camada de elementos. Este entreferro rotativo permite um melhoramento na solução de problemas deste tipo porque a cada deslocamento do rotor, ele somente reconstrói a sua própria malha, conservando a malha de todo o restante da geometria.

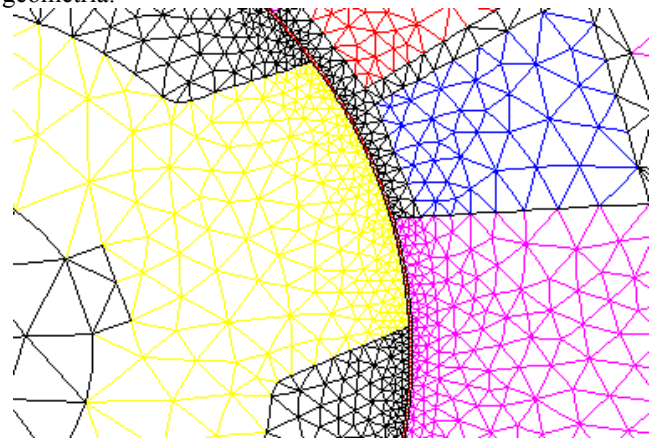


Fig. 3 – Malha de elementos finitos

Nos cálculos magnetostáticos da geometria, a condição de Dirichlet é imposta aos nós pertencentes à circunferência que delimita externamente as laminações do estator, ou seja, nenhuma linha de fluxo magnético a atravessa.

Uma vez obtida a solução para o problema de campo eletromagnético, o estágio de pós-processamento deste programa possibilita: mapeamento do fluxo magnético, fluxo concatenado com as bobinas, densidade de fluxo magnético, gráfico da densidade de fluxo magnético, representação das grandezas físicas por meio de vetores, força e torque, indutâncias próprias e mútuas e outras grandezas físicas de interesse. Este programa dispõe de dois tipos de rotinas de pós-processamento: uma numérica e uma gráfica para a visualização dos resultados.

A. Alguns Resultados do Caso Magnetostático

O caso magnetostático do MEF oferece diversos tipos de resultados úteis para o projeto e alguns são apresentados para possibilitar alguns comentários da sua utilização.

Destaca-se, em primeiro lugar, a Fig. 1 que apresenta o mapeamento do fluxo magnético na seção transversal da máquina em estudo, para uma determinada posição angular do rotor e para um determinado valor de corrente contínua e constante numa das fases. Diversos outros tipos de mapeamentos de grandezas eletromagnéticas podem ser obtidos com este procedimento, tais como, densidade de fluxo magnético, densidade de corrente, permeabilidade, intensidade de campo magnético, etc. Estes mapeamentos

são feitos para diversas posições do rotor, numa faixa equivalente a pelo menos, meio passo polar. Em cada posição angular escolhida, os mapeamentos são produzidos para valores de corrente dentro da faixa de utilização da máquina, definida em função dos diversos aspectos pertinentes do projeto. Para cada posição do rotor, pode-se determinar, uma curva de magnetização que apresenta o fluxo concatenado com a fase em função da corrente. A Fig. 4 apresenta as curvas de magnetização para cinco posições angulares diferentes.

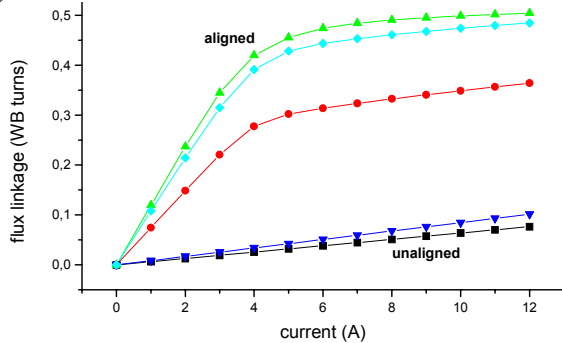


Fig. 4 – Curvas de magnetização

Nesta figura pode-se observar alguns aspectos típicos deste tipo de máquina. Na posição correspondente ao alinhamento do eixo interpolar do rotor com o eixo da fase energizada, verifica-se um comportamento praticamente linear em toda a faixa de correntes. Isto é uma consequência do grande entreferro existente em torno desta posição. No outro extremo, verifica-se a forte saturação que ocorre nos meios ferromagnéticos quando o eixo polar do rotor se encontra alinhado com o eixo polar da fase energizada e devido ao entreferro menor possível adotado na construção deste tipo de máquina. Para minimizar a potência aparente do conversor eletrônico a máquina deve ser fortemente saturada nestas regiões onde ocorre a superposição total ou parcial dos pólos do rotor e do estator. Assim, este método é bastante útil para o projeto da geometria dos pólos e das coroas do rotor e do estator de forma a atender a este requisito.

O estágio de pós-processamento deste programa também possibilita o cálculo da indutância própria da fase em função da posição angular e da corrente, conforme mostrado na Fig. 5. A indutância mantém o valor mínimo enquanto não ocorre a superposição dos pólos do rotor e do estator e praticamente não é afetada pela corrente. Com o deslocamento do rotor, após o início da superposição dos pólos, inicia-se um aumento do valor da indutância, até que o seu valor máximo é atingido na posição de alinhamento dos pólos do rotor e do estator. Em torno desta posição de alinhamento, pode-se observar a pronunciada influência da corrente (saturação).

A Fig. 6 mostra as características de torque estático em função da corrente e da posição angular do rotor. Nesta figura pode-se observar o fato de que o torque não é nulo antes de se iniciar a superposição dos pólos por causa do espraiamento de fluxo. Nas posições do rotor em torno da posição de alinhamento dos pólos, pode-se observar um certo arredondamento das curvas provocado pela forte saturação dos pólos do rotor e do estator. A saturação dos pólos, se por um lado é desejável para assegurar a minimização da potência aparente do conversor, por outro, provoca estes arredondamentos destas características de torque estático,

que, por sua vez, contribuem para a ondulação do torque da máquina, que podem provocar vibrações e ruídos. Este programa pode ser também adequadamente utilizado para projetar a geometria dos pólos visando também a otimização sob estes pontos de vista.

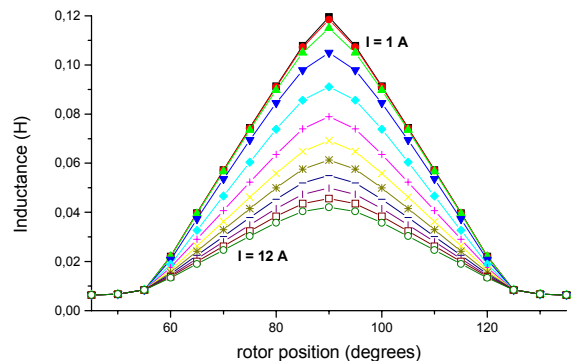


Fig. 5 – Indutância própria

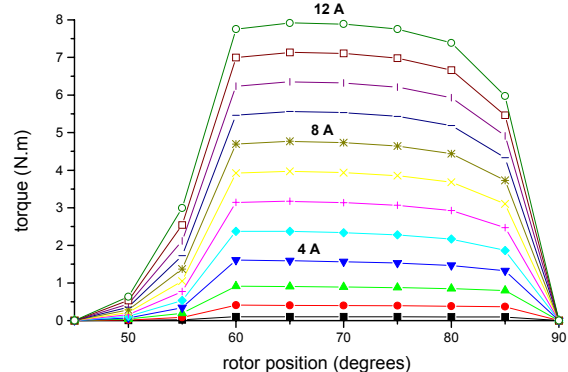


Fig. 6 – Torque estático

IV. SIMULAÇÕES COM MATHCAD

A simulação do desempenho com velocidade constante é feita utilizando-se o programa Mathcad. Para a realização destas simulações, assume-se que as mútuas indutâncias entre fases são desprezíveis. Esta simulação possibilita a determinação dos valores instantâneos da corrente de fase e do fluxo concatenado no modo de operação de pulso único. Esta simulação também possibilita a determinação das curvas dos valores instantâneos de fluxo concatenado versus a corrente de fase. Demonstra-se que estas curvas, para um ciclo do funcionamento da fase da máquina, definem uma superfície cuja área é proporcional ao torque médio desenvolvido [1,2]. Este método de simulação está sendo aprimorado para possibilitar o cálculo dos valores instantâneos do torque desenvolvido. Embora seja sabido que as mútuas indutâncias afetam o desempenho [2, 8, 9], este método de simulação permite a obtenção de resultados bastante úteis para o desenvolvimento do projeto, com um tempo de processamento bastante reduzido quando se compara, por exemplo, com simulações realizadas com o MEF acoplado com as equações de circuitos.

Um conjunto de curvas de magnetização da máquina, como as mostradas na Fig. 4, são usadas para a construção de uma superfície $\psi \times \theta \times i$, respectivamente, fluxo concatenado, posição angular do rotor e corrente de fase, mostrada na Fig. 7. A cada passo da simulação, utiliza-se a equação da tensão na fase para determinar o fluxo concatenado para aquela particular posição do rotor que é

conhecida pelo fato de ser assumida a velocidade constante. Com estes valores de fluxo e posição, determina-se o valor instantâneo da corrente por interpolação nesta superfície. Desta forma, seguindo-se este procedimento passo a passo, obtém-se os valores instantâneos de fluxo e de corrente.

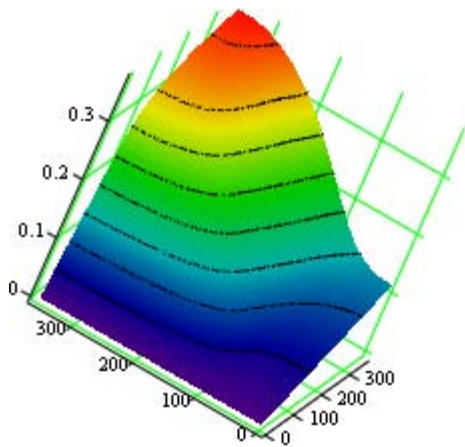


Fig. 7 – Superfície $\psi \times \theta \times i$

Este método de simulação é adequado tanto para a operação como motor, como para a operação como gerador. Durante o período de condução das chaves de potência, a tensão do barramento CC, VDC, é aplicada na fase e, considerando-se que as mútuas são desprezíveis, obtém-se a equação:

$$V_{DC} = R \cdot i + \frac{d\Psi}{dt} \quad (01)$$

onde, R é a resistência de fase, i é a corrente instantânea e Ψ é o fluxo concatenado. Para qualquer posição do rotor após o ângulo de início de condução, θ_{on} , o fluxo é calculado considerando-se a velocidade angular constante ω , conforme a equação (02),

$$\Psi = \frac{1}{\omega} \int_{\theta_{on}}^{\theta} (V_{DC} - R \cdot i) d\theta + \Psi_{on} \quad (02)$$

Durante este intervalo de tempo, conhecidas a posição instantânea do rotor e o valor instantâneo de fluxo concatenado, obtém-se o valor instantâneo da corrente por interpolação na superfície $\psi \times \theta \times i$ através de um método passo a passo no tempo. Após o desligamento das chaves de potência, que ocorre no ângulo θ_{off} , a corrente circula através dos diodos e da fase e a tensão reversa do barramento é aplicada na fase. Durante este intervalo de tempo, até o ângulo de extinção θ_{ext} , quando a corrente na fase finalmente se anula, a corrente é determinada de uma forma semelhante [6].

V. MEF – ACOPLAMENTO COM CIRCUITOS

Nesta seção são mostradas as simulações do desempenho da máquina de relutância, usando o MEF acoplado com as equações de circuitos elétricos. Assim, o conversor mostrado na Fig. 2 é modelado conforme a Fig.8, que apresenta apenas uma fase da máquina. Este modelo de circuito é usado tanto para simular o funcionamento como motor, como o funcionamento como gerador. Nas simulações são usadas todas as fases, modeladas como a fase mostrada, e nesta figura foi mostrada apenas uma somente para melhorar a visualização. Observam-se dois ramos contendo um

capacitor e um resistor em série. Estes capacitores representam a capacitância total conectada ao barramento CC. Os valores das resistências são pequenos e elas são necessárias para evitar distúrbios acentuados na simulação; se não houvesse estes resistores, a tensão do barramento, para o caso de simulações na condição operacional de gerador auto-excitado, se tornaria instável devido a problemas numéricos. O resistor R2 é a carga nas simulações como gerador e nas simulações como motor ele é retirado.

Cada fase do tem duas chaves de potência, dois diodos, quatro lados de bobinas, um resistor conectado em paralelo, um resistor em série e um indutor em série. Os elementos de circuito que aparecem em paralelo com o resistor R1P são usados para modelar a fase. A fase 1 da máquina é representada por quatro bobinas (BOB1A...BOB1D) ligadas em série e com polaridades adequadas a um resistor R1E e um indutor L1E. Estes dois últimos elementos são os parâmetros representativos das cabeceiras de bobinas. Cada uma destas bobinas representa um lado de bobina da fase, conforme pode ser observado na seção transversal mostrada na Fig.1. Levando-se em consideração que os condutores são suficientemente finos, o efeito pelicular é desprezado. Os parâmetros das cabeceiras são calculados através de métodos analíticos convencionais. O resistor R1P ligado em paralelo tem um valor elevado para minimizar sua influência no circuito e serve para adquirir a forma de onda da tensão de fase.

O modelo de circuito é usado para simular as operações como motor e como gerador auto-excitado. A fonte CC é usada para a alimentação quando se trata de simulações do funcionamento como motor. Nas simulações do funcionamento como gerador, a fonte é mantida no barramento apenas nos primeiros ciclos do funcionamento para evitar um descarregamento dos capacitores, que ocorreria para suprir a energia necessária para excitar cada fase no início de cada ciclo. Se isto ocorresse na simulação, isto iria provocar um enorme distúrbio na tensão do barramento e aumentar enormemente o tempo de simulação.

Os transistores de potência são representados por chaves, que são abertas e fechadas de acordo com a posição instantânea do rotor, levando-se em consideração que a velocidade é constante e a posição inicial do rotor no início da simulação.

As equações do MEF são então acopladas com as equações de circuitos, o que resulta num sistema de equações, que é resolvido levando-se em consideração as não-linearidades através do método Newton-Raphson e usando uma técnica passo a passo no tempo. O passo de tempo deve ser suficientemente pequeno para assegurar resultados suficientemente precisos e a escolha do seu valor é uma das escolhas críticas deste tipo de método. Valores pequenos demais resultam num tempo excessivo de processamento; valores grandes demais resultam em imprecisão e oscilações dos resultados. Observou-se nestas simulações que são necessários, pelo menos, 40 passos de tempo por ciclo de cada fase para se conseguir resultados satisfatórios.

A Fig. 9 mostra um exemplo do efeito da escolha do número de passos de tempo por ciclo. Esta figura mostra a tensão e a corrente no capacitor do barramento CC, obtidas

das simulações do funcionamento como gerador auto-excitado. Até o instante 0,28 s, 40 passos de tempo são usados durante o intervalo de condução das chaves de potência. Após este instante, este número foi reduzido para 10, resultando numa diminuição da tensão e da corrente, o que não corresponde à realidade do funcionamento do gerador. Um outro aspecto que pode contribuir para uma redução significativa do tempo de processamento nas simulações do funcionamento como gerador auto-excitado, é a disponibilidade de métodos de cálculo que permitam prever o valor da tensão do barramento, para as condições de velocidade e ângulos de controle especificados [2].

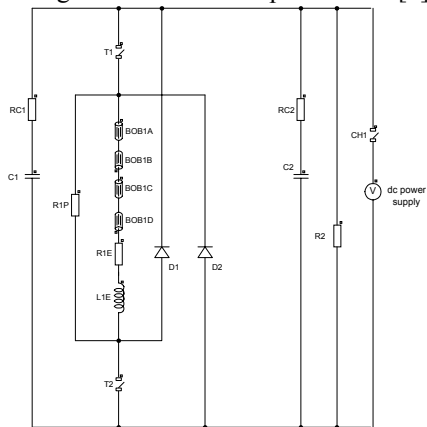


Fig. 8 – Modelo do circuito

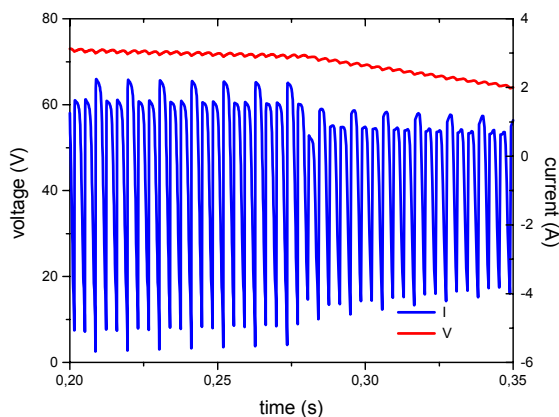


Fig. 9– Tensão e corrente do capacitor do barramento CC

VI. RESULTADOS

Nesta seção serão apresentados resultados das simulações do desempenho da máquina e serão comentados os seus principais aspectos.

A. Simulação da Operação no Modo de Pulso Único – MEF

A Fig. 10 é um exemplo dos resultados obtidos da simulação pelo MEF acoplado com as equações de circuitos, na operação como motor no modo de pulso único, com a fonte CC que alimenta o barramento ajustada em 70 Volts e com velocidade constante igual a 3000 rpm. Estas simulações são realizadas com um tempo de processamento relativamente curto, da ordem de 6 horas, pois a tensão do barramento é garantida pela fonte de corrente contínua. Apenas uns poucos ciclos de simulação são necessários para se assegurar a convergência dos resultados. Na parte de pós-processamento do programa, podem-se obter as diversas formas de onda das diversas grandezas eletromagnéticas e

mecânicas para se realizar as análises da adequação do projeto.

B. Simulação da Operação com Recortamento da Tensão do Barramento CC – MEF acoplado

Para realizar as simulações quando o motor opera no modo de recortamento de tensão usando o MEF acoplado com as equações de circuitos, o mesmo modelo de circuito da Fig. 8 é utilizado, com a inclusão de uma chave adicional em série com a chave superior de cada fase. A função desta chave é possibilitar o recortamento da tensão do barramento. Esta forma de operação é usada nas faixas de baixa e de média velocidade.

Na realidade, o conversor real não dispõe destas chaves, que são incluídas unicamente para possibilitar a simulação. Levando em consideração o requisito de se utilizar um número de passos de tempo mínimo por ciclo e que a frequência do recortamento da tensão é muito maior do que a frequência da operação de cada fase verifica-se que o tempo de processamento pode atingir valores elevados, dependendo dos valores particulares dos parâmetros de controle em questão.

A Fig. 11 mostra os resultados da simulação para a fonte CC ajustada em 100 volts e com a velocidade do rotor constante e igual a 625 rpm.

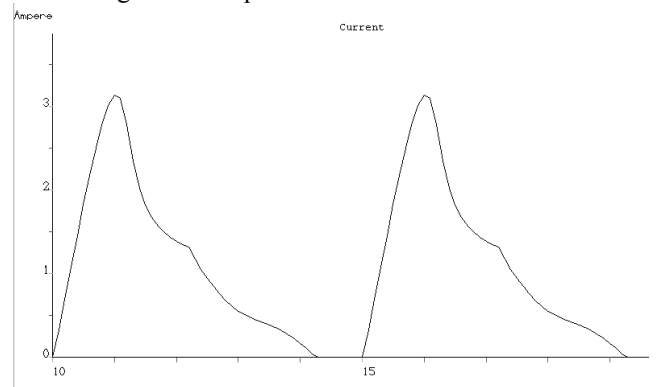


Fig. 10 – Corrente de fase, simulação MEF, motor, pulso único

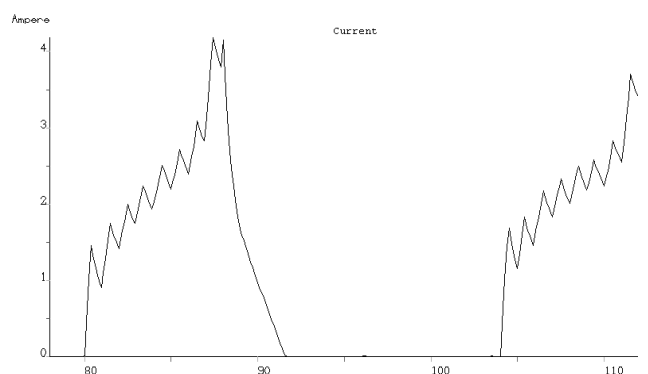


Fig. 11 – Corrente de fase, simulação MEF, motor, PWM

C. Simulação da Operação como Gerador Auto-excitado, no modo de pulso único - MEF acoplado

As figuras 12, 13 e 14, apresentam alguns resultados obtidos da simulação do funcionamento como gerador auto-excitado, no modo de pulso único. Nesta simulação, a capacitância total do barramento é de 5640 μF com uma carga resistiva de 40 Ω . A velocidade do rotor é de 1400 rpm. Além dos aspectos relativos à escolha do passo de

tempo, é necessária também a utilização de métodos adequados para o cálculo do valor médio da tensão do barramento CC para minimizar o tempo de processamento. O valor médio da tensão do barramento é assumido como condição inicial dos capacitores do barramento. Esta determinação é crítica neste tipo de simulação e, se o valor não for suficientemente próximo do valor resultante da tensão para as condições especificadas, o tempo de processamento pode se tornar proibitivo. Em condições adequadas, para a obtenção de resultados significativos, basta simular alguns ciclos de operação, com um tempo de processamento da ordem de 24 horas.

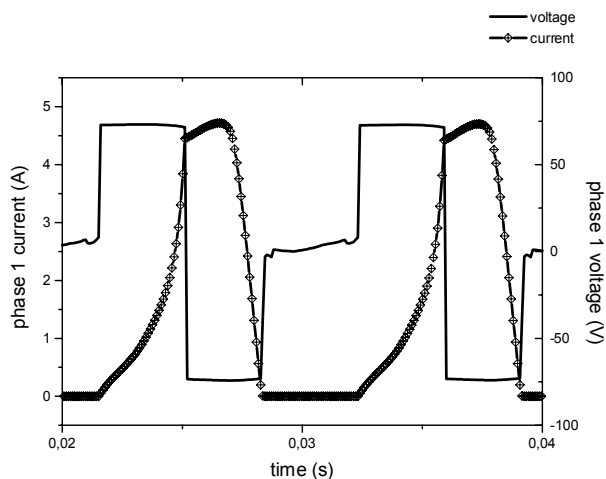


Fig. 12 – Corrente e tensão de fase, simulação MEF, gerador

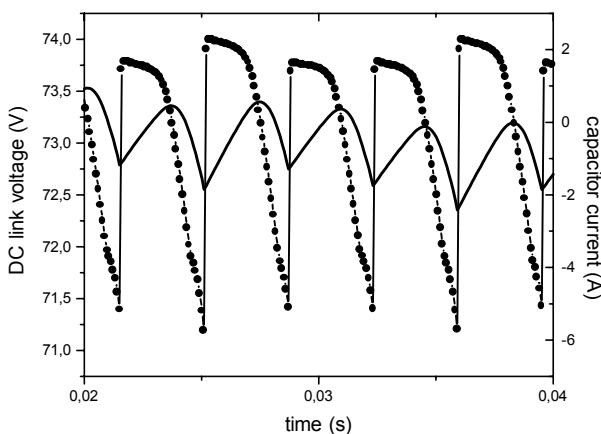


Fig. 13 – Corrente e tensão do capacitor, simulação MEF, gerador

D. Resultados de Ensaios e da Simulação com o Mathcad

Seguindo-se o procedimento descrito na Seção IV, foram realizadas as simulações usando-se o programa Mathcad. As próximas duas figuras, 15 e 16 foram incluídas para apresentar os resultados das simulações da máquina operando como motor e dos testes realizados nas mesmas condições operacionais. Este método de simulação também pode ser utilizado para a operação como gerador bastando para isto, avançar o ângulo de início de condução. Os protótipos foram construídos com carcaças basculantes e com bobinas de sonda envolvendo os seus pólos, de forma a possibilitar a medição do fluxo concatenado com um integrador, conforme a Fig. 16. Nestas condições

apresentadas, a tensão do barramento é de 100 V, 1250 rpm e com ângulo de condução de 30 graus. Observa-se pelas figuras que são obtidos bons resultados e as principais fontes de erros são: mútuas indutâncias, imperfeições na fabricação e imprecisão do sistema de sensoriamento da posição do rotor.

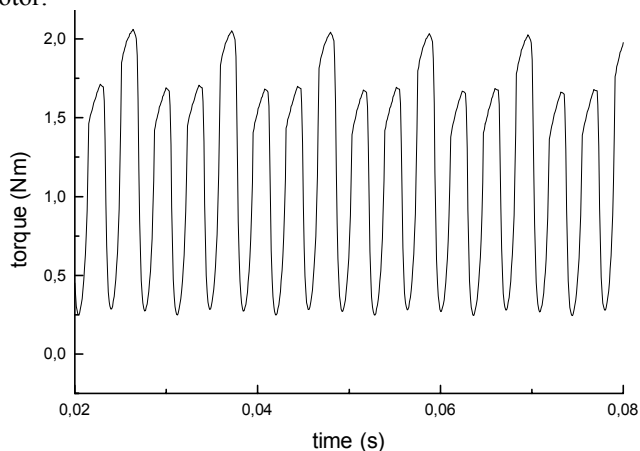


Fig. 14 – Torque, simulação MEF, gerador auto-excitado

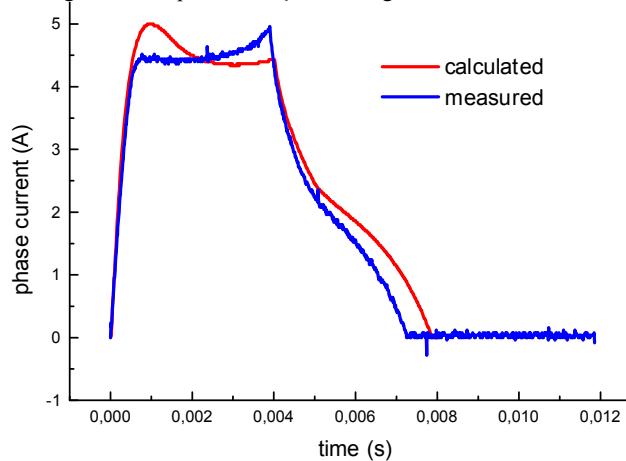


Fig. 15 – Corrente de fase instantânea

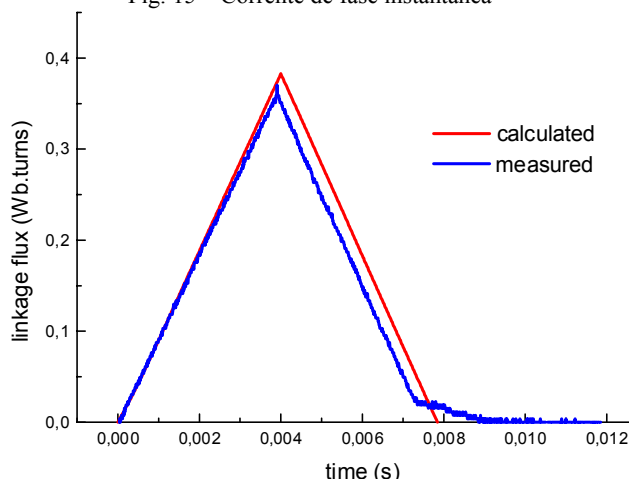


Fig. 16 – Fluxo concatenado com a fase 1 em função do tempo

Uma das grandes vantagens de um método de simulação deste tipo é a possibilidade da obtenção relativamente rápida de curvas de desempenho como a da Fig. 17, que mostra a relação torque x velocidade da máquina.

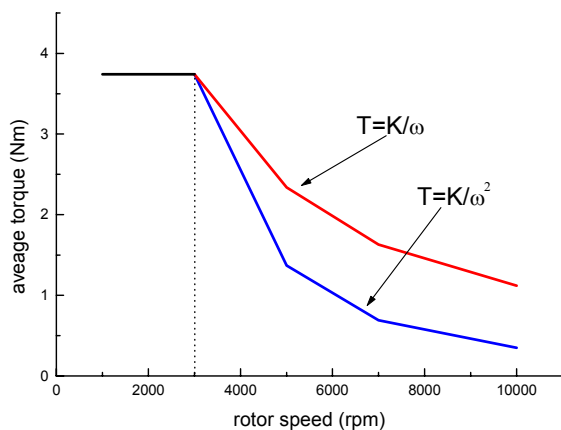


Fig. 17 – Torque médio versus velocidade

VII. CONCLUSÕES

Neste artigo são apresentados alguns aspectos concernentes à utilização de métodos computacionais para o projeto de motores e geradores de relutância chaveados.

Destacam-se os aspectos importantes de cada método considerado e que podem ser aplicados no desenvolvimento de projetos de novas máquinas.

Estes métodos estão sendo aplicados em três protótipos, que foram fabricados para possibilitar as comparações com resultados experimentais. Pretende-se aplicar estes protótipos no acionamento de cadeiras de rodas para deficientes físicos, para a construção de uma bancada que permita o desenvolvimento de estudos de tração elétrica e para aplicações como gerador elétrico.

Os resultados obtidos até aqui são satisfatórios e muitos desenvolvimentos ainda são necessários, tais como:

- determinação do torque instantâneo com o Mathcad;
- simulação da operação com PWM com Mathcad;
- desenvolvimento de sistemas de controle adequados baseados em microcontroladores ou Processadores Digitais de Sinais – DSP's, usando estes resultados de simulação; etc.

A experiência obtida até aqui parece mostrar que é necessária a disponibilização de métodos analíticos que conduzam rapidamente a resultados globais, tais como, as simulações com Mathcad, para fazer uma primeira abordagem do projeto de uma aplicação. Uma vez escolhido o(s) projeto(s) que podem ser satisfatórios, pode-se investir o tempo e recursos para a aplicação de métodos mais precisos como o MEF acoplado com circuitos.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos aos alunos da Unicsul e ao técnico Luciano B. Pereira pela colaboração neste projeto. P. P. de Paula agradece à CAPES pelo financiamento parcial deste trabalho através de bolsa de Pós-Doutoramento no Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, projeto 1262-02-5.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] T.J.E. Miller. *Switched Reluctance Motors and their Control*. Oxford, Magna Physics Pub., 1993.
- [2] P.P. de Paula, *Aspectos de projeto, simulação e operação de geradores e motores de relutância chaveados*, Tese (Doutorado), EPUSP, São Paulo, Brasil, 2000.

- [3] A.V. Radun, "Generating with the switched reluctance motor", in *Proceedings of APEC'94*, 1994, pp.41-46.
- [4] T. Sawata, P.C. Kjaer, C. Cossar and T.J.E. Miller, "A control strategy for the switched reluctance generator", in *Proceedings of ICEM'98*, 1998, vol.3, pp.2131-2136.
- [5] R. Inderka, M. Menne and R.W. De Doncker, "Generator operation of a switched reluctance machine drive for electric vehicles", in *Proceedings of EPE99 (CD)*, 1999.
- [6] P.P. de Paula, W.M. da Silva, G. Janólio, A. M. Ebesui, G. Ett and V. Ett, "Preliminary results of an electric vehicle traction system prototype based on fuel-cell and switched reluctance motor-generator", in *Proceedings of the Brazilian Power Electronics Conference-COBEP2001*, Florianópolis, Brasil, 2001, pp. 259-266.
- [7] Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble, *FLUX2D: logiciel de calcul électromagnétique par éléments finis*, LEG-CEDRAT (CEE), Grenoble, France, MAGSOFT, New York, USA.
- [8] P.P. de Paula, W.M. da Silva, S.I. Nabeta and J.R. Cardoso, "Modelling a switched reluctance motor/generator by using the finite-element method coupled with circuit equations", *Proceedings of ICEM2000*, Helsinki, Finland, pp.1752-1756.
- [9] T.J.E. Miller, "Developments in reluctance motors characteristics and design methods", *Proceedings of the IPEC2000*, Tokyo, Japan, pp. 608-613.

DADOS BIOGRÁFICOS

Pedro Pereira de Paula, nascido em 03/06/1955 em Sorocaba, SP, é engenheiro eletricitista (1981), mestre (1993) e doutor em Engenharia Elétrica (2000) pela Escola Politécnica da USP. Foi engenheiro da Seção de Materiais do IEE-USP (82 a 85), do Agrupamento de Eletrotécnica do IPT (85 a 87) e, desde 1987, é engenheiro do Centro Tecnológico da Marinha em SP. Atualmente é Professor Titular da Universidade Cruzeiro do Sul, onde atua desde 1995. Suas áreas de interesse são: projeto, métodos de simulação e ensaios de máquinas elétricas, particularmente, máquinas de relutância, de ímãs permanentes e síncronas. É membro da SOBRAEP.

Wanderlei Marinho da Silva, nascido em 18/05/1964 em São Paulo, é engenheiro eletricitista (1990) pela Universidade Santa Cecília, mestre (1998) e doutorando em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP. Possui especialização (1997) pela University of Manchester Institute of Science and Technology – UMIST, Manchester, Inglaterra. É tecnólogo sênior do Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN-CNEN-SP e ocupa atualmente o cargo de engenheiro responsável pela seção de Eletrônica de Potência do Centro Tecnológico da Marinha em São Paulo CTM-SP. Atualmente é professor adjunto da Universidade Cruzeiro do Sul, onde atua desde 1996. É professor do curso de pós-graduação em instrumentação, controle e automação do Instituto Mauá de Tecnologia -IMT. Suas áreas de interesse são: eletrônica de potência, qualidade do processamento da energia elétrica, sistemas de controle eletrônicos e acionamentos de máquinas elétricas, modelagem e simulação computacional. É membro da

SOBRAEP.

José Roberto Cardoso, nascido em 1949 em São Paulo, é engenheiro eletricitista (1974), mestre (1979) e doutor em Engenharia Elétrica pela Escola Politécnica da USP. Desde 1999 ele é Professor Titular do Departamento de Engenharia Elétrica da EPUSP. Em 1988, ele fundou o LMAG – Laboratório de Eletromagnetismo Aplicado. Ele foi o *chairman* do COMPUMAG'97. Suas áreas de interesse incluem o cálculo de campos eletromagnéticos pelo MEF e máquinas elétricas.

Silvio Ikuyo Nabeta, nascido em 02/07/1960 em São Paulo, é engenheiro eletricitista (1983) e mestre (1990) pela Escola Politécnica da USP e doutor em Engenharia Elétrica (1994) pelo Institut National Polytechnique de Grenoble. De 1984 a

1986 foi engenheiro de projetos de motores industriais e de tração elétrica (trólebus e metrô) e dispositivos de corrente contínua na Engesa Equipamentos Elétricos S.A. De 1987 a 1989 atuou como engenheiro de projetos de motores de potência fracionária na Emhart do Brasil. Em 1990 foi pesquisador na área de compatibilidade eletromagnética no IPT - SP. Desde 1997 é docente na Escola Politécnica da USP e suas áreas de interesse são: desenvolvimento de ferramentas numéricas em eletromagnetismo, máquinas e tração elétrica. Publicou 17 artigos em revistas indexadas nacionais e internacionais e 56 trabalhos em congressos. Possui uma patente de motor de relutância chaveado para ferramentas manuais no INPI. É presidente da SBMag - Sociedade Brasileira de Eletromagnetismo na gestão 2002-2004 e membro representante das Américas no board da ICS - International Compumag Society até 2006.