

UMA REVISÃO DAS ESTRATÉGIAS DE REDUÇÃO DE ONDULAÇÕES DE CONJUGADO NO MOTOR DE RELUTÂNCIA CHAVEADO

Luís Oscar A. P. Henriques, Luís Guilherme B. Rolim,
Walter I. Suemitsu

e-mail: porto@coe.ufrj.br
Universidade Federal do Rio de Janeiro
Programa de Engenharia Elétrica
C. Postal 68504
CEP 21945-970 - Rio de Janeiro – RJ
Brasil

Paulo J. Costa Branco

e-mail: pbranco@alfa.ist.utl.pt
Instituto Superior Técnico de Lisboa
Av. Rovisco Pais 1049-011
Lisboa
Portugal

Resumo - Neste artigo é apresentada uma revisão das técnicas mais importantes para a redução de oscilações de conjugado no motor de relutância chaveado. Propõe-se também uma nova técnica para a minimização das ondulações de conjugado, baseada em técnicas de controle “neuro-fuzzy”. É feita uma análise crítica das vantagens e desvantagens dos métodos apresentados, para compará-los com a técnica proposta.

Abstract – This paper presents a review of the most important techniques to minimize the torque ripple in switched reluctance motor (SRM). It is proposed a new technique to minimize the torque ripple using neuro fuzzy technique. A critique analysis about the advantages and drawback for the presented methods are show, to be compared with the proposed technique

I. INTRODUÇÃO

Devido à sua característica não linear, o motor de relutância chaveado apresenta oscilações implícitas de conjugado, o que se constitui em uma grande desvantagem para sua utilização em aplicações gerais, nas quais os motores de indução são amplamente utilizados. Para tentar superar esta restrição, muitas estratégias têm sido propostas para reduzir (ou cancelar) as oscilações de torque. Essencialmente, duas abordagens principais têm sido utilizadas: uma consiste em melhorar o projeto da máquina, e a outra consiste em projetar um controle eficiente que diminua ou elimine as oscilações.

Os projetistas de máquinas de relutância levam em consideração os aspectos da não linearidade magnética, para projetar a estrutura das regiões polares do estator e do rotor de modo que a máquina possa operar em uma determinada velocidade sem oscilações de conjugado. Entretanto, esta estratégia restringe excessivamente a faixa de velocidades de operação do motor de relutância chaveado [1].

O artigo [2] apresenta modificações mecânicas nas regiões polares para uma operação suave; de fato eles apresentam um motor que possui uma característica de conjugado x ângulo do tipo senoidal. Também há soluções em que se projeta o motor com uma geometria otimizada para produzir um conjugado sem oscilações [3]. O artigo [4] apresenta um modelo analítico que inclui o efeito da saturação do ferro e necessita somente da geometria do motor e dos parâmetros

do material como entradas. As equações analíticas são complexas, mas permitem um modelo que permite prever as curvas de desempenho da máquina, tais como as do fluxo enlaçado pelos enrolamentos, da força contra-eletromotriz e do conjugado estático. Outra metodologia bastante utilizada pelos projetistas atualmente faz uso dos métodos de elementos finitos para simular toda a operação do motor [5] e [6].

A outra abordagem, bastante utilizada atualmente, baseia-se em projetar conversores e controladores que minimizem as oscilações de conjugado através da seleção da melhor combinação de parâmetros de operação, que incluem entre outros, a tensão de alimentação, os ângulos de energização e desenergização, e o perfil da corrente.

Dentre os diversos trabalhos que propõem um perfil ótimo de corrente [7], [8], [2]. Alguns trabalhos são baseados no modelo estático do sistema, o que significa que o controle utiliza uma tabela que contém a característica magnética para uma única velocidade [2], enquanto que outros apresentam a vantagem de serem capazes de se adaptar em tempo real a qualquer variação nas características do sistema, ou ainda podem estimar algumas variáveis utilizadas para o controle do motor, tais como: velocidade, conjugado ou posição.

Além destes trabalhos, há artigos que utilizam um modelo linear, mas este modelo apresenta a desvantagem de não ser adequado para aplicações que exigem um desempenho elevado, além de exigir inúmeras aproximações matemáticas. Em outros trabalhos, é usado um perfil de corrente para produzir picos de corrente em regiões de baixa variação de indutância.

Ultimamente, métodos baseados em sistemas de aprendizagem como redes neurais e lógica fuzzy têm sido utilizados, explorando a característica destes métodos de não necessitarem um modelo matemático do sistema a ser controlado.

O objetivo deste trabalho é comparar as vantagens e desvantagens de diversos métodos. Além disso, apresentamos uma nova abordagem de controle para reduzir as oscilações de conjugado, baseada em uma técnica híbrida que utiliza redes neurais e lógica fuzzy.

É bastante complexo levar em conta um único critério para todas as estratégias de controle para minimização das oscilações de conjugado em motores de relutância chaveados. Portanto, propomos dividi-las em alguns sub-grupos, como mostrado na Figura 1.

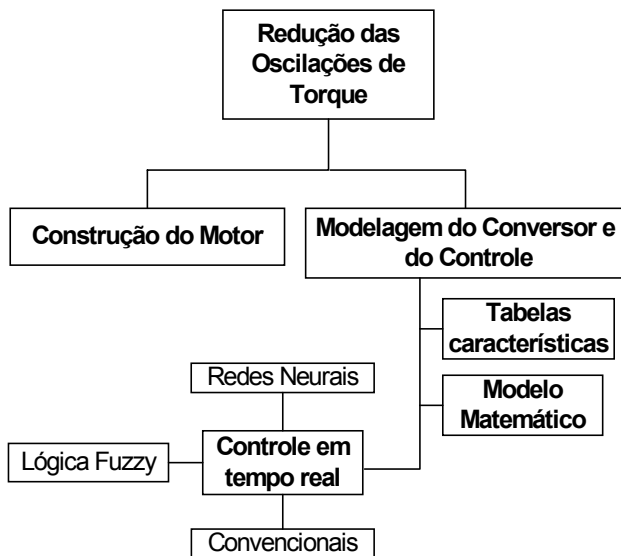


Figura 1. Diagrama de blocos dos métodos de redução das oscilações de conjugado

II. TABELA CARACTERÍSTICA

Esta estratégia de controle foi a primeira a ser implementada. É baseada na tabela que contém as características magnéticas do motor, em particular as relações: $L(\theta, I)$ e $\Gamma(\theta, I)$ (apresentadas graficamente na Figura 2 e na Figura 3)

Utilizando estes gráficos, pode-se obter a corrente ideal para se obter a corrente ideal para produzir o conjugado ideal. Uma desvantagem deste método é a dificuldade de obtenção das tabelas que dão origem aos gráficos na Figura 2 e Figura 3. As mesmas devem ser obtidas experimentalmente, fixando-se a corrente de alimentação e variando o ângulo que determina a posição do rotor, o que demanda um tempo razoavelmente longo. De qualquer maneira, como o conhecimento destas características é necessário para determinar se o motor fabricado está de acordo com o projeto inicial, esta desvantagem não representa uma restrição muito grande.

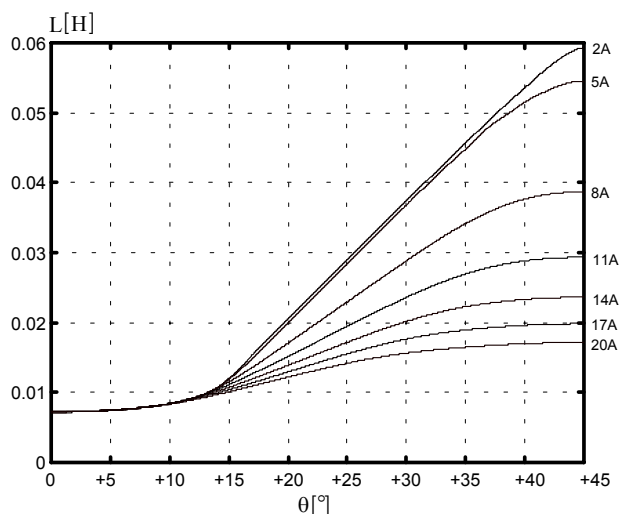


Figura 2. Perfil de Indutância $L(\theta, I)$.

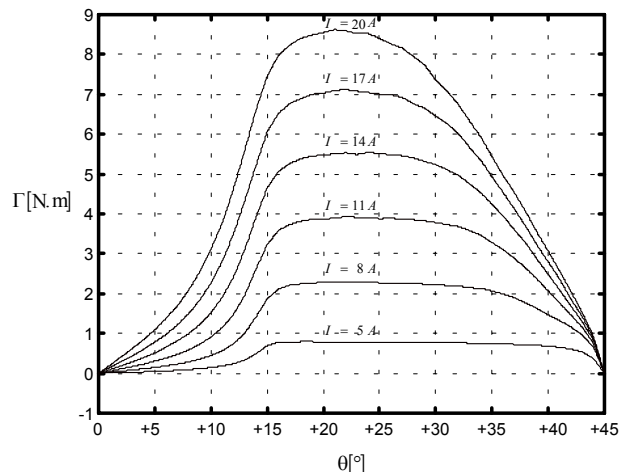


Figura 3 – Conjugado em uma fase - $\Gamma(\theta, I)$.

O método descrito por [8] é baseado na estimação do conjugado instantâneo do motor de relutância chaveado através curva característica fluxo/posição/corrente. Essas curvas são obtidas, através de medidas experimentais da tensão e da corrente para diferentes posições do rotor, e posteriormente outros valores são obtidos utilizando-se o método de interpolação bi-cúbica. Através deste método, o conjugado é estimado através de equações polinomiais de 3ª ordem, sendo que os coeficientes calculados são armazenados na memória do DSP utilizado na implementação (Figura 4). Em seguida, o conjugado estimado é comparado com o conjugado de referência, e o resultado é aplicado ao regulador de corrente que controla a corrente de fase do motor (

Figura 5). O algoritmo deste método não leva em consideração a vantagem da sobreposição de fases quando a variação da indutância de fase é positiva.

O método de redução de oscilações apresentado em [7] baseia-se na superposição de correntes durante o chaveamento. Define-se um ponto central de chaveamento, onde duas fases têm correntes iguais, de modo que a soma dos conjugados gerados pela corrente de cada fase seja igual ao conjugado desejado.

III. MODELO ANALÍTICO

A representação da máquina através de seu modelo matemático linear ou não linear é um passo adiante no estudo do controle do motor de relutância chaveado. Os modelos analíticos permitem levar em consideração a velocidade do motor e utilizar uma abordagem em tempo real, ao invés de empregar uma tabela estática [9].

Alguns estudos calculam a função de conjugado ótimo, para minimizar as oscilações [10], [11]. Esta abordagem reduz significativamente o trabalho computacional do controlador e facilita a operação do controle em tempo real. Este método também permite a inclusão de objetivos de controle secundários, como a maximização do desempenho. Entretanto, o cálculo da função “off-line” também leva à perda de robustez do sistema. Outro problema é a necessidade de maior espaço de memória para armazenar toda a informação na tabela, para operar o motor em uma banda de velocidade mais larga em alguns níveis de conjugado.

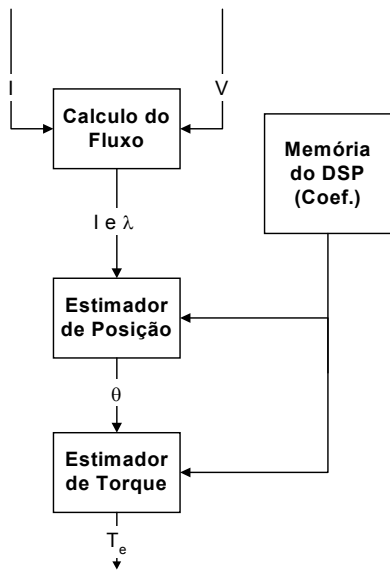


Figura 4 – Estimação da posição e do conjugado

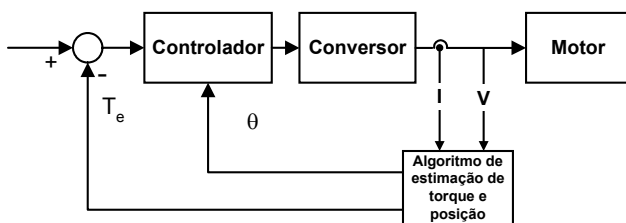


Figura 5 – Estimação e contr. de um motor de relutância chaveado

Uma possibilidade para implementar um controle adaptativo foi pesquisada em [12], mas o controlador obtido tem uma estrutura complicada para a operação em tempo real e sua implementação se torna inviável.

O artigo [13] apresenta uma abordagem matemática para obter o modelo analítico que representa as características fluxo/corrente/posição e conjugado/corrente/posição. O uso deste modelo permite um controle rápido de conjugado em tempo real, através da malha de controle de velocidade e posição. A desvantagem do método proposto é que uma grande parte do sistema é representado de forma linear.

O trabalho [14] trata da redução das oscilações de conjugado na região linear e com a presença de indutância mútua. Entretanto, as perdas no ferro e por correntes parasitas são desprezadas. A técnica de redução das oscilações é baseada na adição do quadrado das correntes das fases. A justificativa para se usar tal estratégia é o fato que o conjugado é proporcional ao quadrado da corrente. Uma desvantagem deste método é que só pode ser utilizado em motores do tipo 8/6. Além disso, outro ponto crítico é a necessidade de haver somente 2 fases conduzindo ao mesmo tempo, uma vez que são utilizados 2 sensores de corrente.

IV. CONTROLE ADAPTATIVO “ON-LINE”

Técnicas de controle em tempo real podem ser usadas para implementar o controle do motor. Algumas técnicas usam algoritmos complexos que atualizam os parâmetros do controlador em tempo real, outras utilizam técnicas de inteligência artificial como redes neurais, lógica fuzzy e algoritmos

genéticos. Devido à evolução dos microprocessadores, com sua crescente capacidade de armazenamento e de processamento de dados, estes métodos são cada vez mais utilizados.

A. Controle Adaptativo Convencional

Utilizando técnicas de controle convencionais, podemos obter os valores atualizados dos parâmetros do controlador, empregado um algoritmo de identificação recursivo [15]. Durante a operação, os parâmetros de controle são ajustados “on-line”.

A única entrada necessária para o controlador é a resistência de fase. O controlador ajusta seus parâmetros em tempo real para qualquer variação nas características do motor. Algoritmos de sintonização automática podem minimizar as oscilações de conjugado em Motores de Relutância Chaveados (MRC). Os resultados indicam que esta técnica apresenta bons resultados em baixas velocidades. Para altas velocidades, ela gera um modelo inválido para o algoritmo de estimação, causado pelo longo tempo necessário para efetuar o cálculo do conjugado e a identificação do sistema no mesmo DSP.

O controle de velocidade é efetuado por um controlador PI convencional que gera um sinal de referência de conjugado T^* . Com o sinal T^* , e depois da estimação do conjugado do motor, o controlador produz as correntes de referência.

A grande contribuição deste trabalho é em relação ao método de identificação do sistema, e não à minimização das oscilações de conjugado. Entretanto, quanto melhor for a identificação do sistema, mais facilmente pode-se minimizar as oscilações.

O artigo [16] propõe a otimização das curvas das correntes nas fases, principalmente nos momentos de chaveamento, para a redução das oscilações. A estratégia é baseada na geração de formas de corrente de modo que a adição dos conjugados gerados em cada fase seja constante e igual ao conjugado desejado. Para isso, os autores definem uma função de contorno $f_T(\theta)$.

Existem inúmeros conjuntos de funções de contorno que se ajustam ao motor de relutância. Como exemplo temos as funções mostradas na Figura 7.

A função correspondente para a fase 1 seria:

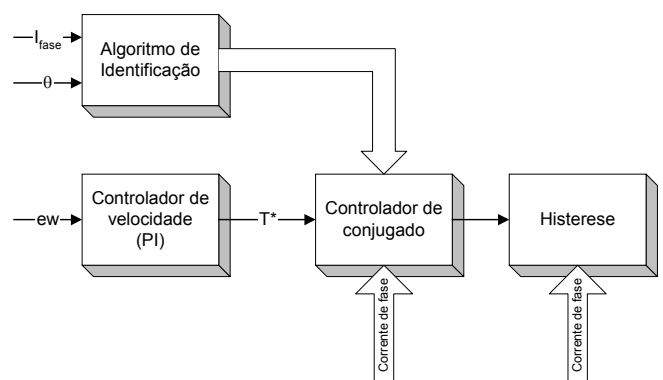


Figura 6 – Diagrama do controlador com adaptação de parâmetros

$$\begin{aligned}
 f_1(\theta) &= 0.5 - 0.5 \cos 4(\theta - \theta_0), & \theta_0 \leq \theta < \theta_1 \\
 &= 1, & \theta_1 \leq \theta < \theta_2 \\
 &= 0.5 + 0.5 \cos 4(\theta - \theta_2), & \theta_2 \leq \theta < \theta_3 \\
 &= 0, & \text{para outros valores}
 \end{aligned}
 \quad (1)$$

O algoritmo de controle utiliza as curvas características de conjugado/corrente/posição. Primeiramente a função $f(\theta_1)$ é calculada utilizando-se as curvas e então se calcula o conjugado em cada fase. Este conjugado é inserido na tabela e em seguida é possível obter as correntes $I_{desejada}$. Em seguida regulamos as correntes para manter os valores desejados. O uso dessas funções de contorno apresenta algumas restrições:

- A soma das funções para todas as fases deve ser constante,
- A corrente deve ser capaz de seguir o contorno definido pela função.

Portanto, embora seja possível usar diversas funções de contorno, é necessário estabelecer um critério para a escolha das mesmas.

Além disso, o chaveamento da corrente entre as fases é considerado instantâneo, o que não é realizável devido à alta relação di/dt decorrente da indutância do enrolamento da fase.

B. Redes neurais

A técnica de aprendizado “backpropagation” é apresentada em [17]. Este método possui as vantagens de não necessitar de um modelo ou de equações que descrevam o sistema e de apresentar reduzida complexidade matemática.

Entretanto, a coleta de dados para o treinamento é crítica para um aprendizado eficiente. Além disso, o período de treinamento é muito lento. Este trabalho simplesmente modela o motor, não realizando a compensação. Isto é, só substitui as tabelas que representam o motor por uma rede neural.

O trabalho [18] apresenta uma rede neural para controlar o motor de relutância chaveado. A técnica é baseada na especificação de um perfil de conjugado de referência. Este perfil é obtido de $T(\theta, I)$.

Este artigo propõe a geração da tabela da relação inversa conjugado/corrente/posição “online”.

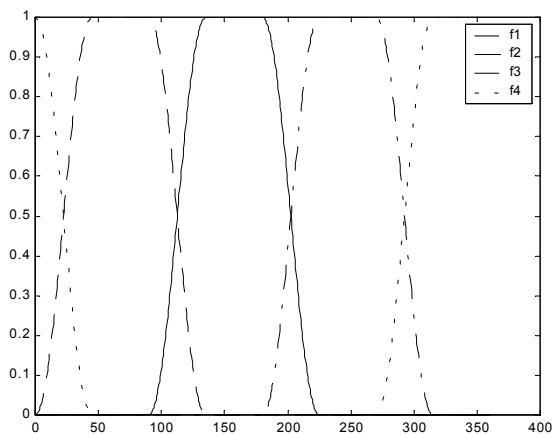


Figura 7 – Funções de contorno das correntes

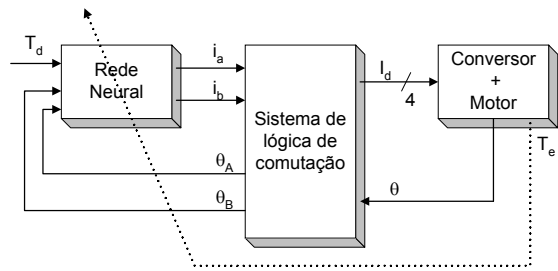


Figura 8 – Sistema Proposto

Esta abordagem é interessante porque permite considerar as interações magnéticas entre as fases em condução. Isto não é possível quando se trabalha com o sistema estático.

O trabalho apresenta uma rede com duas entradas (conjugado e θ) e uma saída (corrente). É importante levar em conta que o sensor de conjugado é necessário durante todo o intervalo de operação. As condições iniciais influem consideravelmente no aprendizado da rede e se as mesmas forem favoráveis, o aprendizado é bem rápido. A Figura 8 mostra o sistema implementado.

Uma desvantagem deste método é que se os parâmetros iniciais da rede neural não forem apropriados, o tempo de aprendizagem ficará afetado, causando até mesmo perturbações no conjugado que podem ser críticas para o processo em que a máquina estiver operando.

C. Lógica Fuzzy

O artigo [19] mostra uma aplicação da lógica “fuzzy” que substitui o controlador PI convencional. O MRC apresenta uma estrutura de controle não linear, multivariável, que exige um projeto de controle complexo para atingir um elevado desempenho dinâmico. Entretanto, os controles baseados na abordagem linear, próximo ao ponto de operação, não produzem o desempenho desejado.

O artigo é dividido em 2 partes:

1ª – As não linearidades magnéticas são modeladas utilizando-se lógica “fuzzy”.

2ª – Um controle de velocidade é implementado com lógica “fuzzy”.

Com entradas para o controlador de velocidade temos e_w (erro de velocidade) e $e_{w'}$ (variação do erro de velocidade) e como saída ΔI . As regras foram obtidas por tentativa e erro. As restrições para este trabalho são a necessidade de se conhecer as regras de fuzzificação previamente e também a incapacidade de mudar estas regras “online”.

Um controle adaptativo “fuzzy” é proposto em [20]. Os parâmetros iniciais são escolhidos aleatoriamente e em seguida eles são ajustados para otimizar o controle. O método apresentado neste trabalho não depende de propriedades predeterminadas da máquina, e é capaz de se adaptar a qualquer mudança destas propriedades. É robusto em relação ao erro de posição, e evita a produção de conjugado negativo durante o chaveamento.

Entretanto, o método proposto é baseado na suposição que um sensor de conjugado é conectado permanentemente na máquina, o que não é prático nem confiável e é muito caro.

O controlador utiliza como entrada a posição do rotor e como saída a corrente I_{fases} . Ele é baseado em uma base de dados que utiliza o erro entre o conjugado desejado e o real como método de adaptação. O conjugado desejado é estimado utilizando-se a técnica proposta por [21].

O erro de conjugado ($T^* - T$) é usado para a adaptação e as saídas são as referências para as correntes de fases. A comutação é normalmente efetuada próximo da posição de alinhamento do estator e do rotor, onde a indutância de fase é alta e a de desmagnetização baixa.

O método apresentado em [22] é uma tentativa para reduzir as oscilações de conjugado através de uma técnica “fuzzy”, em que o sinal de oscilação de conjugado é obtido indiretamente do sinal de aceleração do motor. A estratégia é baseada em regras que ativam diferentes funções de acordo com a fase que deve ser energizada. Essas funções são formuladas com referência ao controle de velocidade com modo de deslizamento.

As entradas para a operação em modo de deslizamento são o erro de velocidade e a aceleração. Esta maneira de obter a informação sobre a oscilação de conjugado, através do sinal de aceleração, é interessante, mas o método de estimação pode falhar. Além disso, o sistema de lógica “fuzzy” apresentado neste artigo é estático; portanto, o controle não será modificado se houver variações na carga, ou em qualquer parâmetro da máquina. Isto é indesejável, pois o SLF (sistema de lógica “fuzzy”) pode ser sintonizado para uma determinada condição de operação ótima, mas para outras situações, esta sintonização poderá não ser satisfatória.

Outra técnica baseada em lógica “fuzzy” é o compensador do ângulo de desenergização. O ângulo de desenergização pode ser variado automaticamente para um intervalo de velocidades do motor, para reduzir as oscilações de conjugado. Com a variação deste ângulo, é possível variar o perfil de corrente nas fases do motor [23].

D. Compensador “Neuro-Fuzzy”

Neste trabalho [24], o controle possui uma maior flexibilidade de operação, desde que a aprendizagem está presente no compensador. Esta aprendizagem torna o compensador menos dependente das características da máquina. Se o sistema apresentar alguma modificação na carga, na tensão de alimentação ou na velocidade de operação, o compensador tem a capacidade de se adaptar a este novo ponto de operação e procura reduzir as oscilações de conjugado. A estratégia proposta para produzir este sinal de compensação consis-

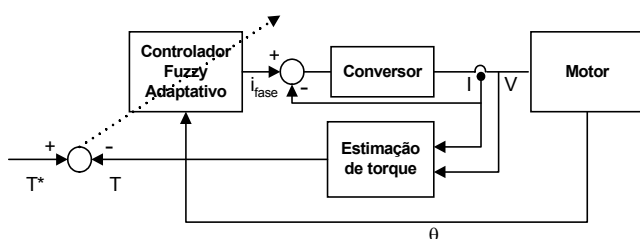


Figura 9 – Controle adaptativo “fuzzy” para a redução das oscilações de conjugado em um MRC

te em incorporar ao sistema de controle PI tradicional, mecanismos de aprendizagem, como por exemplo, no caso deste artigo, um sistema “neuro-fuzzy” (SNF). O controle mencionado consiste em utilizar um controlador “neuro-fuzzy”, cuja saída é utilizada juntamente com a saída do controlador PI tradicional, como mostrado na Figura 10.

Como entrada do compensador, podem ser utilizados a velocidade do motor, a posição do rotor, a referência de corrente ou o erro de velocidade. A flexibilidade é muito importante para aplicações em que todos os sinais de treinamento forem disponíveis através de sensores. Este controlador é importante porque seu treinamento é possível através de sinais correlacionados indiretamente com os sinais de entrada. Por exemplo, podemos usar a própria oscilação de conjugado para treinar a rede “neuro-fuzzy”, com o objetivo de produzir uma nova forma de corrente. Ou podemos usar o erro de velocidade como um sinal de treinamento indireto, possibilitando a eliminação do sensor de conjugado.

Em trabalho apresentado anteriormente por [25], foi apresentada uma estratégia de compensação “offline” empregando-se o algoritmo “neuro-fuzzy” desenvolvido em [26]. Devido a esta abordagem (treinamento “offline”), era sempre necessário treinar novamente a compensação do sistema depois de qualquer variação nos parâmetros da máquina ou na carga [27].

Neste artigo, é proposta uma estratégia mais avançada. Utilizando-se as mesmas condições que no caso “offline”, uma compensação “online” para a redução das oscilações de conjugado é considerada para duas abordagens diferentes: com o sinal de conjugado e sem este sinal. Na primeira abordagem, a parte oscilante do conjugado (conjugado total – conjugado médio) é usada, e na segunda, o sinal de erro de velocidade é utilizado para obter a informação sobre a oscilação de conjugado da máquina. De fato, há duas entradas diferentes para o compensador, mas somente uma estratégia de compensação.

Uma desvantagem da primeira abordagem é a necessidade de se utilizar um sensor de conjugado. Entretanto, esta pode ser utilizada como um primeiro passo para a aquisição das regras do compensador, para em seguida empregar a segunda abordagem. O uso do sensor de conjugado só é viável economicamente se for possível realizar um treinamento “offline” do sistema e depois retirar o referido sensor. O mesmo é excessivamente caro para mantê-lo conectado durante a operação normal do motor.

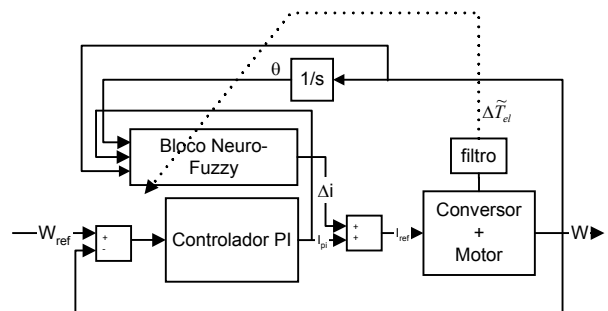


Figura 10 – Diagrama simplificado com o controlador PI e o compensador “neuro-fuzzy”

A maioria das pesquisas sobre o assunto necessita o uso de um sensor ou um observador de conjugado[28]. A segunda abordagem apresenta a vantagem de eliminar o sensor de conjugado. Entretanto, o sinal de atualização obtido indiretamente do erro de velocidade não possui tanta informação sobre as oscilações de conjugado como o próprio sinal de conjugado e assim um tempo de treinamento maior e uma taxa de aprendizagem muito pequena são necessários para manter o sistema estável.

A estratégia de compensação incorpora um mecanismo de aprendizagem ao controlador PI. Este compensador consiste em se utilizar um sistema “neuro-fuzzy” cuja saída é empregada em conjunto com a saída do PI, como mostrado na Figura 9. Como entradas para o compensador, o sinal de velocidade, a posição do rotor, a corrente de fase, ou o sinal de erro da velocidade podem ser usados. Esta flexibilidade é bastante interessante em aplicações em que os sinais de aprendizagem necessários não são disponíveis através de sensores.

Note-se a importância de um controlador deste tipo, que torna possível seu treinamento através de sinais ligados indiretamente com os sinais de entrada. Por exemplo, as oscilações de conjugado podem ser utilizadas para treinar o compensador “neuro-fuzzy” com o objetivo de produzir uma corrente oscilante, e um erro de velocidade que forneça uma informação indireta sobre as oscilações de conjugado, eliminando-se assim a necessidade de um sensor de conjugado.

V. RESULTADOS

Nesta seção, apresentaremos resultados de simulação e experimentais do sistema, que comprovam a capacidade de compensação da corrente para a minimização das oscilações de torque usando-se a estratégia neuro-fuzzy.

A Método com sinal de torque

Os resultados obtidos utilizando-se o sinal de torque como sinal de erro para atualização dos sistemas de compensação são apresentados para duas velocidades: 200 rpm e 50 rpm, validando a importância deste método para baixas velocidades.

O sistema para 200 rpm foi simulado por 0,6 segundos com início da aprendizagem em 0,2 segundos. O resultado de corrente obtido para 200 rpm é apresentado na Figura 11.

O sistema básico ficou modelado com taxa de aprendizagem de 0,3 e 3 funções de pertinência para cada uma das três entradas (corrente, posição e velocidade).

Observa-se na

Figura 12 que imediatamente após a entrada da compensação, a oscilação de torque diminui. O erro médio quadrático inicia neste ponto uma queda bastante abrupta em seu valor. Tudo isto é devido à taxa de aprendizagem de 0.3. O erro de velocidade (Figura 14) nos mostra uma envoltória no

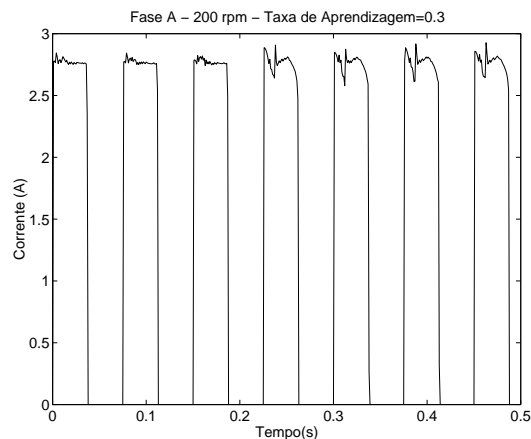


Figura 11 – Corrente de fase – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 200 rpm

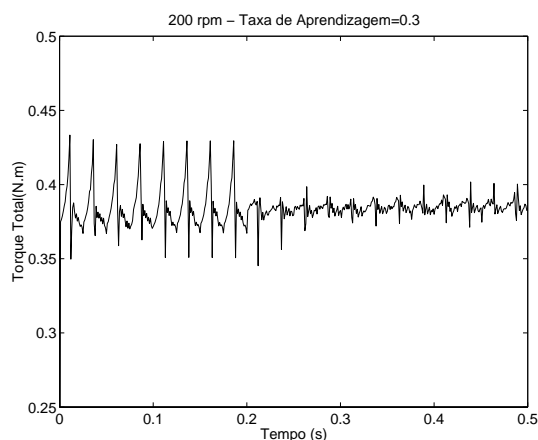


Figura 12 – Torque Total – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 200 rpm

erro de velocidade de aproximadamente 1 rpm antes da compensação. E após um período de regime transitório cai para 0.1 rpm. Demonstrando que o sistema está compensando a corrente.

Os resultados para 50 rpm são apresentados a seguir (Figura 15 e Figura 16). Para este caso, foram simulados 1.5 segundos e o início do treinamento é aos 0.6 segundos.

Para a velocidade de 50 rpm encontramos a mesma situação de resultados obtidos para a velocidade de 200 rpm. Temos um período de transitório, que com o tempo levará o sistema para uma regime permanente onde teremos o erro de velocidade oscilando em torno do erro de velocidade nulo (Figura 17).

Figura 18 e Figura 19 mostram resultados experimentais do erro médio quadrático e do sinal de torque respectivamente, para uma operação de treinamento online de 8 minutos a 500 rpm.

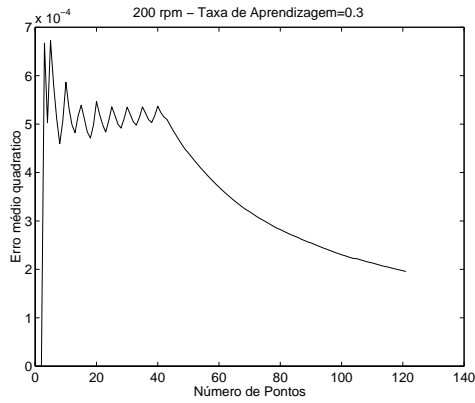


Figura 13 – Erro médio Quadrático – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 200 rpm

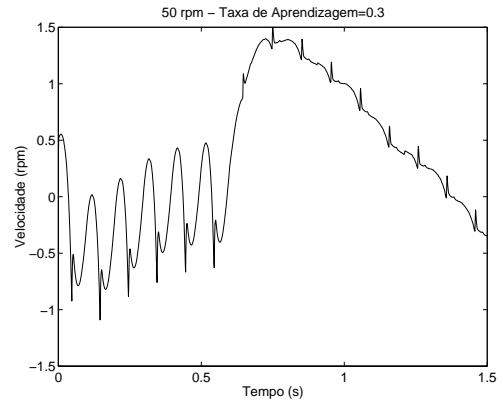


Figura 17 – Erro de Velocidade – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 50 rpm

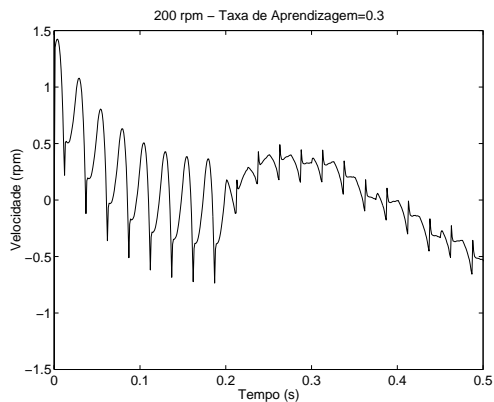


Figura 14 – Erro de Velocidade – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 200 rpm

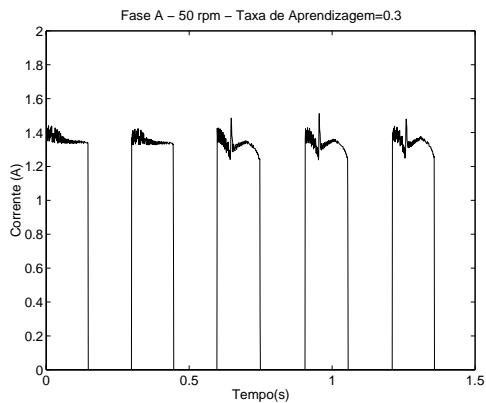


Figura 15 – Corrente de fase – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 50 rpm

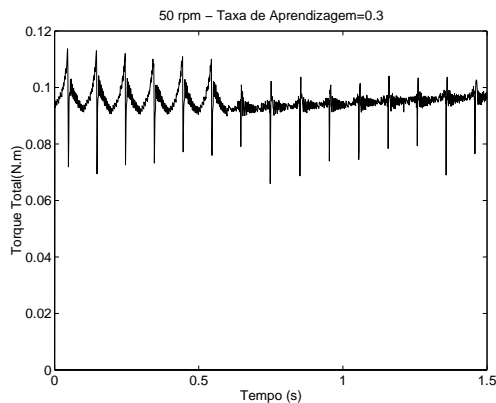


Figura 16 – Torque Total – Taxa de Aprendizagem 0,3 – 50 rpm

B Método sem sensor de torque

Para esta metodologia onde não se usa o sensor de torque, nem se estima o seu valor para a obtenção do sinal de torque, utiliza-se o sinal de velocidade como apresentado anteriormente. Para esta condição, apresentamos os resultados obtidos para 50 rpm a seguir.

Observa-se na Figura 21 a redução das oscilações de torque é observada pela curva do erro médio quadrático.

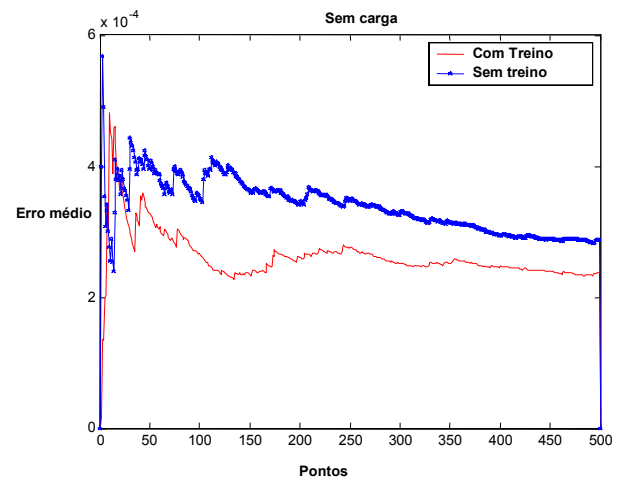


Figura 18 – Erro médio quadrático

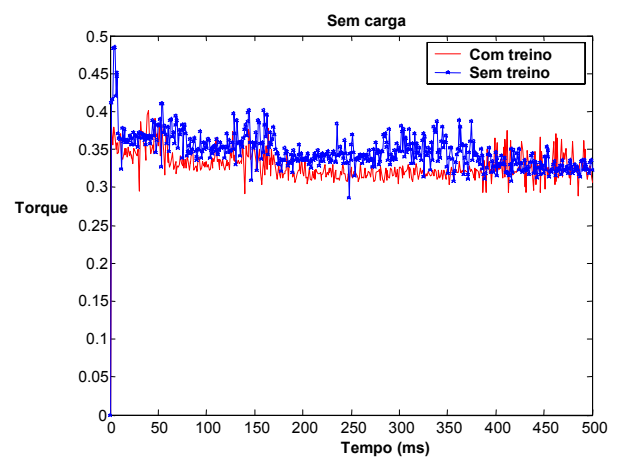


Figura 19 – Torque Elétrico

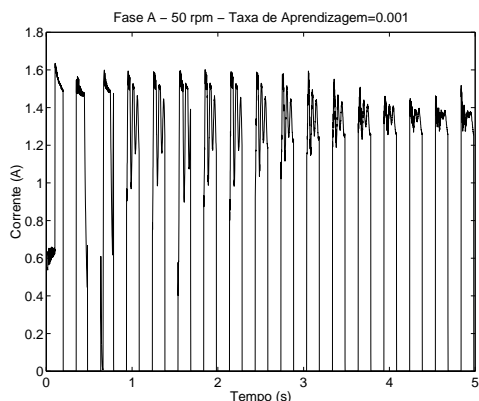


Figura 20 – Corrente de fase – Taxa de Aprendizagem 0,001 – 50 rpm

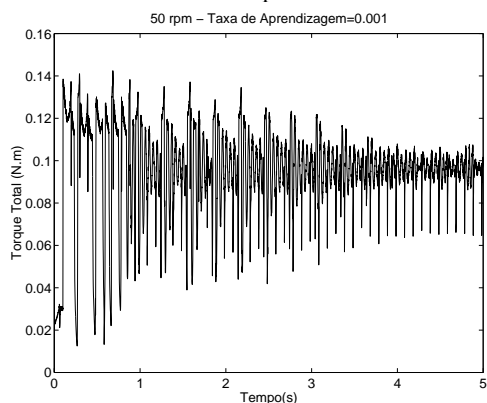


Figura 21 – Erro médio quadrático da velocidade – Taxa de Aprendizagem 0.001 – 50 rpm

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho é apresentada uma revisão das estratégias de redução das oscilações de conjugado em um MRC e uma nova metodologia para a compensação dessas oscilações. Esta metodologia apresenta uma maior flexibilidade de operação devido à presença de aprendizagem no compensador, a qual o torna menos dependente das características do motor. Se o sistema sofre alguma modificação na carga, na fonte ou na velocidade de operação, o compensador possui a capacidade de auto-regulação, de modo a modificar a forma da função de controle neste novo ponto de operação e buscando a redução das oscilações de conjugado desejada. Mais detalhes desta metodologia podem ser obtidos em [24].

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem às agências financiadoras CAPES (Brasil) e GRISES (Portugal) pelo suporte financeiro, durante a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] T.J.E. Miller “*Switched Reluctance Motors and their Control*”, Magma Physics Publishing and Clarendon Press-Oxford 1993.

- [2] R.C. Kavanagh, J.M.D. Murphy, e M. Egan, “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives using Self-Learning Techniques”, *Proc. of IECON'91*, pp. 289-294, Vol. 1, Japão, 1991.
- [3] J.V. Bryne, M.F. McMyllin, et al. *Proc. Motor Con.* 147-160, 1985
- [4] A.V. Radun “Design Considerations for the Switched Reluctance Motor”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 31(5):1079-1087, 1995
- [5] J.R. Cardoso, P.P. de Paula, “Design of a Switched Reluctance Motor”, *COBEP'95*, pp. 67-72, 1995
- [6] J.M.L. Nascimento, L.G.B. Rolim, et al, “Design and Simulation Aspects of a Switched Reluctance Drive”, *COBEP'95*, pp. 79-83, 1995
- [7] D.S. Schramm, B.W. Williams et al “Torque Ripple Reduction of Switched Reluctance Motors by phase Current optimal Profiling”, *PESC 92*, pp. 857-860, 1992.
- [8] J.C. Moreira, “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Via bi-cubic Spline Interpolation”, *PESC 92* pp 851-856, 1992
- [9] K. Russa, I. Husain, M.E. Elbuluk, “Torque-ripple Minimization in Switched Reluctance Machines Over a Wide Speed Range”, *IEEE Transaction on Industry Applications*, 34(5): 105-1112. 1998
- [10] P.C. Kjaer, J. J. Gribble, T.J.E. Miller, “High-grade control of Switched Reluctance Machines” *Conf. Rec. IEEE IAS Ann. Meeting*, pp. 84-91, 1996
- [11] A.M. Stankovic, G. Tadmor et al “On torque ripple reduction in current-fed switched reluctance motors”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 46(1):177-183, 1999
- [12] B.L. Amor, L.A. Dessaint et al., “Adaptive Feedback linearization for position control of a Switched Reluctance motor: Analysis and Simulation,” *Int. Journal. Adapt. Control Signal Process*, 7(2):117-136, 1993
- [13] C. Rochford, R.C. Kavanagh, et al., “Development of smooth torque in Switched Reluctance Motors using self-learning Techniques” *EPE 93* pp 14-19, 1993
- [14] N. Inanç, A. Derdiyok, et al. “Torque ripple Reduction of a Switched Reluctance Motor including Mutual Inductances” *ISIE 97 Vol 2* pp 489-492., 1997
- [15] K. Russa, I. Husain et al. “Self-tuning controller for switched reluctance motors,” *IEEE Transactions on Power Electronics*, 15(3):545-552, 2000.
- [16] I. Husain, M. Ehsani, M., “Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control” *IEEE Transaction on Power Electronics* 11(1): 83-88. 1996
- [17] Ç. Elmas, S. Sagiroglu, et al. “Modelling of a nonlinear Switched Reluctance Drive based on artificial Neural Networks” *Power Electronics and Variable Speed Drives Conference Proceedings* pp 7 – 12, 1994.
- [18] D.S. Reay, T.C.E. Green et al. “Applications of Associative Memory Neural Networks to the Control of a Switched Reluctance Motor” *IEEE Magazine of Control Systems*, Jun 1995
- [19] Ç. Elmas, O.F. Bay “Modelling and Operation of a nonlinear Switched Reluctance Motor Drive Based on Fuzzy Logic” *EPE 95* vol. 3 :592-597, 1995

- [20] S. Mir, M.E. Elbuluk, et al., "Torque-Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors Using Adaptive Fuzzy Control". *IEEE Transaction on Industry Applic.* 35(2):461-468, 1999.
- [21] S. Mir, M.E. Elbuluk, et al., "Switched Reluctance Motor with On-line Parameter Identification", *IEEE Transaction on Industry Applications* Vol. 34 no pp 776-783, 4 July/August 1998.
- [22] S. Bolognani, M. Zigliotto, "Fuzzy logic control of a switched reluctance motor drive" *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32(5):1063-1068, 1996.
- [23] M. Rodrigues, P.J. Costa Branco, W.I. Suemitsu, "Fuzzy Logic Torque Ripple Reduction by Turn-off Angle Compensation for Switched Reluctance Motors" *IEEE Transaction on Industrial Electronics* 48(3): 711-715, 2001.
- [24] L.O.A.P. Henriques, L.G. Rolim, W. I. Suemitsu, et al. "Proposition of an Offline Learning Current Modulation for Torque-Ripple Reduction in Switched Reluctance Motors: Design and Experimental Evaluation", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(3):665-676. 2002
- [25] L.O.A.P. Henriques, L.G. Rolim, W. I. Suemitsu, et al. "Torque ripple minimization in switched reluctance drive by Neuro-Fuzzy compensation", *IEEE Transactions on Magnetics*, 36(5):3592-3594, 2000.
- [26] J.J.R. Jang, "ANFIS – Adaptive-Network-based Fuzzy Inference System," *IEEE Transaction on Systems, man and Cybernetics*, 23(3):665-685, 1993.
- [27] L.O.A.P. Henriques, P.J. Costa Branco, et. al. "Automatic learning of pulse current shape for torque Ripple minimization in switched reluctance machines," *European Control Conference. (ECC2001)*, pp. 232-237, Porto – Portugal, 2001.
- [28] M.S. Islan, I. Husain, "Torque-ripple minimization with Indirect Position and Speed Sensing for SR Motors," *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 47(5):1126-1133, 2000.

DADOS BIOGRÁFICOS

Luís Oscar A. P. Henriques, nascido em 10/10/1973 em Juiz de Fora é engenheiro eletricista (1997) pela Universidade Federal de Juiz de Fora e mestre em Engenharia Elétrica (1999) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. No ano de 2001, desenvolveu doutorado sanduíche no Instituto Superior Técnico de Lisboa, Portugal.

Atualmente é estudante de doutorado na COPPE/UFRJ e professor do Centro Federal de Ensino Tecnológico Celso Suckow da Fonseca (CEFET-RJ). Suas áreas de interesse são: Acionamentos de máquinas elétricas e técnicas inteligentes de controle.

Luís Guilherme B. Rolim, nascido em 1966 em Niteroi, é engenheiro eletricista (1989) e mestre em Engenharia Elétrica (1993) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e Dr.-Ing pela Universidade Técnica de de Berlim em 1997. Desde 1990 é professor do departamento de Eletrotécnica da Escola Politécnica da UFRJ e onde conduz pesquisa em eletrônica de potência e acionamentos elétricos.

Walter I. Suemitsu, é engenheiro eletricista (1975) pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, mestre em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Rio de Janeiro e doutor em engenharia elétrica pelo Institut National Polytechnique de Grenoble na França. É professor do Departamento de Eletrotécnica desde 1977, sendo que atualmente ocupa o cargo de Professor Adjunto. Desde 1986 também é Professor Adjunto do Programa de Engenharia Elétrica da COPPE.

Suas áreas de interesse são os acionamentos de máquinas elétricas e as aplicações dos conversores de eletrônica de potência nesses acionamentos. Seus principais trabalhos estão concentrados nas aplicações de controles digitais utilizando DSPs e nas técnicas de controle utilizando metodologias baseadas em aprendizado, tais como lógica fuzzy, redes neurais e métodos neuro-fuzzy aplicadas ao controle do motor de relutância chaveado.

Paulo J. Costa Branco, é engenheiro eletricista (1988) e mestre em Engenharia Elétrica (1991) pela Universidade Federal do Rio de Janeiro. Doutor (1998) pelo Instituto Superior Técnico de Lisboa. Atualmente é professor assistente da secção de máquinas elétricas e eletrônica de potência do Instituto Superior Técnico de Lisboa (IST) Lisboa, Portugal. Suas áreas de interesse incluem técnicas avançadas de controle de sistemas eletromecânicos.