

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA**

HIGOR MARQUES SAMPAIO

**ESTUDO COMPARATIVO DA COMPENSAÇÃO DE
REALIMENTAÇÃO INTERNA DO MOTOR DE
INDUÇÃO E COMANDO DIRETO DE TORQUE**

**VIÇOSA
2013**

HIGOR MARQUES SAMPAIO

**ESTUDO COMPARATIVO DA COMPENSAÇÃO DE
REALIMENTAÇÃO INTERNA DO MOTOR DE
INDUÇÃO E COMANDO DIRETO DE TORQUE**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. André Gomes Tôrres.

VIÇOSA
2013

HIGOR MARQUES SAMPAIO

**ESTUDO COMPARATIVO DA COMPENSAÇÃO DE
REALIMENTAÇÃO INTERNA DO MOTOR DE INDUÇÃO E
COMANDO DIRETO DE TORQUE**

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas da Universidade Federal de Viçosa, para a obtenção dos créditos da disciplina ELT 490 - Monografia e Seminário e cumprimento do requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em 30 de AGOSTO de 2013.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. André Gomes Tôrres - Orientador
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. José Tarcísio de Resende - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Prof. Dr. Tarcísio de Assunção Pizziolo - Membro
Universidade Federal de Viçosa

Dedico esse trabalho aos meus pais Dagualberto e Selma, à minha irmã Camille e ao meu avô Osmar.

Agradecimentos

Em primeiro lugar agradeço a Deus, por abrir as portas para que conseguisse chegar ao final dessa caminhada.

Agradeço aos meus pais Dagualberto e Selma pelo apoio, pela dedicação, por todo esforço para me ajudar na realização desse sonho. Agradeço pela confiança e por embarcarem junto a mim na busca por esse objetivo. A vitória nunca seria alcançada sem essa dedicação. Amo muito vocês!!!

A minha irmã Camille, sempre na torcida que as coisas se desenvolvessem da melhor forma, sempre apoiando e dando força em todas as situações. Aos familiares que sempre apoiaram e esperaram tanto pelo desfecho dessa jornada. Ao meu avô Osmar, sempre orando e dando todo o apoio possível.

Ao meu orientador André Gomes Torres, pela dedicação e orientação nesse trabalho.

Aos amigos de república Spelunka presentes em todos os momentos, desde os churrascos e almoços dos finais de semana aos momentos tensos de desavenças e pequenos problemas. Passamos por bons momentos juntos. Sem dúvida é uma das melhores partes da graduação.

Aos amigos que caminharam ao meu lado, vivendo o dia a dia durante toda a jornada, e que colaboraram para a realização desse trabalho. Ao grande amigo Jason, que sua ajuda foi fundamental para o desenvolvimento do trabalho. Aos amigos de futebol de quinta feira, proporcionando momentos de descontração e alegria. Deixarão saudade.

Muito Obrigado!

*“O êxito da vida não se mede pelo caminho que você conquistou, mas sim pelas
dificuldades que superou no caminho.”*

Abraham Lincoln

Resumo

No controle vetorial, as correntes do rotor e do estator são divididas em vetores fasoriais, de eixo direto e eixo de quadratura. O controle vetorial pode ser feito de forma direta e indireta. A diferença entre os dois tipos de controle é dada pela presença de sensores para a medição de alguns parâmetros dinâmicos do motor de indução. Na ausência desses sensores, esses parâmetros são estimados. Esse trabalho será desenvolvido baseado em um outro trabalho realizado, sendo esse último baseado no controle indireto de campo orientado, onde o fluxo desejado é calculado em função do escorregamento da máquina. O controle do fluxo do rotor é feito através da corrente de eixo direto do estator, e a corrente de quadratura do estator é usada para controlar o torque e a velocidade do rotor. No trabalho utilizado como base, foram utilizados métodos de identificação de sistemas para obter os modelos matemáticos do motor de indução estudado. Esses modelos foram utilizados para ajustar os parâmetros dos controladores utilizados. Com o levantamento dos modelos feitos, foram feitos testes para observar o comportamento do motor em diferentes situações de operação. Feito isso, foi alcançado o objetivo do trabalho, que era o estudo das malhas de controle de corrente e torque. No presente trabalho, o objetivo será fazer a compensação de realimentação interna do motor de indução e o comando direto do torque. Depois de feito isso, será feito um comparativo com o método adotado no trabalho de referência. Será utilizado o mesmo motor utilizado no trabalho base, com os mesmos parâmetros, e serão realizadas simulações para a validação do sistema proposto. Para fazer a compensação de realimentação interna do motor de indução, será utilizado o método de controladores síncronos. Esse método possui uma característica interessante onde um sinal proveniente da corrente de eixo de quadratura do estator é utilizado como realimentação de um sinal proveniente da corrente de eixo direto do estator e vice versa. Algumas consequências dessa característica são que dessa forma uma corrente não seguirá apenas a um comando no seu eixo, esse sinal dependerá também da compensação do outro eixo. Será feito também um controle de velocidade, uma vez que a corrente é controlada e já foi feito o controle do torque da máquina, conseguindo assim fazer um estudo melhor do comportamento da máquina de indução em diferentes condições de operação, como no caso da adição e rejeição de carga. Com o controlador implementado, foram feitas comparações através de gráficos e da análise do erro médio quadrático, e através dessas análises foi concluído que o controlador síncrono apresentou ação de controle melhor que o controlador implementado em [1].

Sumário

Lista de Figuras

Lista de Tabelas

1	Introdução	11
1.1	Revisão Bibliográfica	12
1.1.1	Controle Vetorial	12
1.1.2	Controladores	15
1.1.2.1	Controladores Básicos	15
1.1.2.2	Controladores de Estado Estacionário e Síncrono	16
1.1.2.3	Método de Compensação por Alimentação	18
1.1.2.4	Controladores Avançados	19
1.2	Objetivo Geral	19
1.2.1	Objetivos Específicos	20
2	Materiais e Métodos	21
2.1	Implementação do controlador síncrono	25
2.2	Controle de Velocidade	26
2.3	Estudo de Adição e Rejeição de Carga	27
3	Resultados e Discussões	28
3.1	Resultados Obtidos com o Controlador Síncrono	28
3.2	Controlador Síncrono com Controle de Velocidade	30

3.3	Estudo de Adição e Rejeição de Carga	33
3.3.1	Estudo de Adição e Rejeição de Carga em [1]	33
3.3.2	Estudo de Adição e Rejeição de Carga com Controlador Síncrono .	36
4	Conclusões	43
	Referências	45

Lista de Figuras

1	Circuito equivalente utilizando correntes complexas de estado permanente d,q.	13
2	Diagrama vetorial com relação entre as correntes de estado permanente. .	14
3	Diagrama do controlador de corrente síncrono com comparador de rampa.	16
4	Transformação do estado Estacionário para Síncrono.	17
5	Controlador por Compensação de Alimentação.	18
6	Controlador Síncrono combinado com Método Alimentado.	19
7	Modelo da máquina de indução.	22
8	Corrente referência e corrente controlada de eixo direto com eixo de rotação travado.	22
9	Corrente referência e corrente controlada de eixo de quadratura com eixo de rotação travado.	23
10	Corrente referência e corrente controlada de eixo direto com eixo de rotação em movimento.	23
11	Corrente referência e corrente controlada de eixo de quadratura com eixo de rotação em movimento.	24
12	Torque da máquina com eixo de rotação travado.	24
13	Torque da máquina com eixo de rotação em movimento.	24
14	Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd}	29
15	Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq}	29
16	Comportamento do torque da máquina devido a ação de controle de corrente.	30
17	Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd}	31

18	Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq}	31
19	Conjugado do motor com velocidade controlada em $1100RPM$	32
20	Relação entre a velocidade controlada do motor e a velocidade de referência.	33
21	Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd}	34
22	Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq}	34
23	Conjugado do motor com velocidade controlada com estudo de adição e rejeição de carga.	35
24	Velocidade controlada do motor com adição e retirada de carga.	36
25	Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd}	37
26	Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq}	38
27	Conjugado do motor com estudo de adição e rejeição de carga.	38
28	Velocidade controlada do motor com adição e retirada de carga.	39
29	Erro de corrente i_{sd} do controlador [1] no estudo de adição e rejeição de carga.	41
30	Erro de corrente i_{sq} do controlador [1] no estudo de adição e rejeição de carga.	41
31	Erro de corrente i_{sd} do controlador síncrono no estudo de adição e rejeição de carga.	42
32	Erro de corrente i_{sq} do controlador síncrono no estudo de adição e rejeição de carga.	42

Lista de Tabelas

1	Características da máquina.	21
2	Comparação dos erros entre o controlador de [1] e o controlador síncrono com eixo de rotação em movimento.	40
3	Comparação dos erros entre o controlador de [1] e o controlador síncrono para o estudo de adição e rejeição de carga.	40

1 *Introdução*

Há algum tempo, devido às características de desempenho superiores, os motores síncronos e de indução substituíram os motores de corrente contínua na quase que sua totalidade. Além do melhor desempenho, os motores síncronos e de indução apresentam algumas vantagens em relação aos motores de corrente contínua, exemplos disso, são que esses possuem maior limite máximo de velocidade, maior limite máximo de tensão e menor risco de incêndio na presença de gases devido ao faiscamento das escovas e elevada inércia do motor. Em contrapartida o motor CC possui a característica de permitir o desacoplamento entre as componentes de corrente associadas ao fluxo magnético e ao conjugado. Por essa característica, é possível fazer um paralelo entre o princípio físico do controle de torque em máquinas CC e controladores CA. Dessa forma, os conceitos básicos para o controle de torque e orientação de campo são introduzidos para máquinas síncronas e de indução baseados nas considerações de estado permanente. [2]

Por muito tempo foi utilizado um método de controle simples de malha aberta de corrente, o método de controle escalar, onde o controle é feito através da relação tensão/frequência. Esse tipo de controle ainda é bastante utilizado para sistemas de baixo desempenho e baixa potência, devido à simplicidade. Nesse método de controle, polos e zeros da função de transferência da máquina variam com cada ponto de operação devido a não linearidade do modelo da máquina e o efeito de acoplamento inerente entre o eixo de quadratura e o eixo direto. Para alto desempenho, será utilizada a técnica de controle vetorial ou técnica de campo orientado, que é utilizada para eliminar os problemas de acoplamento entre os eixos d e q, assim a máquina CA irá se comportar como uma máquina CC excitada separadamente, e dessa forma obterá uma resposta transitória rápida [3]. Essa técnica é chamada de controle vetorial, pois permitem o controle da amplitude e fase da excitação CA.

Há pouco tempo, as técnicas de controle eram poucas, pois eram caros os elementos analógicos destinados a esse fim. Com o avanço da tecnologia digital, começou a utilização de elementos eletrônicos digitais, utilização de métodos de processamento de sinais,

o que levou ao desenvolvimento de técnicas de controle que permitiram obter elevadas características de funcionamento do motor.

Nos sistemas de acionamento controlados por velocidade e torque, o controle de malha fechada é baseado na medida de velocidade e posição do motor usando codificador no eixo. Mas isso muitas vezes é de difícil aplicação ou extremamente caro. Dessa forma a eliminação desses sensores diminui os custos do sistema e aumenta a confiabilidade e robustez do sistema. Nesse tipo de controle, onde não há utilização de sensores, a velocidade do motor é estimada e usada como sinal de realimentação na malha fechada de controle de velocidade. [3]

Existem dois tipos de controle vetorial. O primeiro é o controle direto de campo orientado (DFOC) ou método de realimentação. Essa técnica usa medição direta do vetor do fluxo no entreferro por sensores. A aplicação dessa técnica é limitada por causa da colocação do sensor de fluxo na máquina e por causa do efeito prejudicial de ruído harmônico no sinal processado, tornando o método difícil de ser usado em velocidade próxima a zero. Essa técnica também possui qualidades, como a precisão e insensibilidade para variações nos parâmetros da máquina. O outro tipo de controle vetorial é o controle indireto de campo orientado (IFOC) ou método orientado. O fluxo do estator é estimado a partir do vetor de voltagem do estator, vetor de corrente, velocidade do rotor e parâmetros da máquina. Esse método é mais sensível a variações nos parâmetros da máquina. Para obter a dissociação entre o fluxo do rotor e a componente de corrente do torque, é necessário saber com boa precisão os parâmetros da máquina, como a constante de tempo do rotor. Pois em algumas técnicas de controle vetorial indireto, essa constante de tempo do rotor é estimada e usada como sinal de realimentação para o controle de velocidade de malha fechada. [3]

1.1 Revisão Bibliográfica

1.1.1 Controle Vetorial

É de nosso conhecimento que os conceitos básicos para controle de torque e orientação de campo são introduzidos para máquinas síncronas e de indução com base em considerações de estado permanente [2]. Dessa forma o controle de torque da máquina de indução pode ser aproximado a partir da perspectiva de como o controle vetorial da corrente do estator poder ser empregado para controlar diretamente o torque.

Em [1], foi mostrada a similaridade na produção de torque entre a máquina CC e a máquina de indução, e foram introduzidos os conceitos básicos para o controle de torque e orientação de campo com base no estado permanente. Foi demonstrado como é feita a separação das componentes da corrente em duas, uma responsável pelo controle do torque e outra responsável pelo controle do fluxo do rotor. Foi demonstrado também como se chegou a uma expressão do torque em função das componentes de corrente responsáveis pelo fluxo do rotor e torque.

Também em [1], mostra que apesar de todas as demonstrações dos modelos para representar o controle da máquina de indução, o modelo mais comumente utilizado é o modelo d, q. Modelo esse que usa uma rotação sincronizada com o eixo-d fixado para o fluxo do rotor. A Figura 1 representa um diagrama do circuito representando essas quantidades CC citadas anteriormente nos eixos d e q.

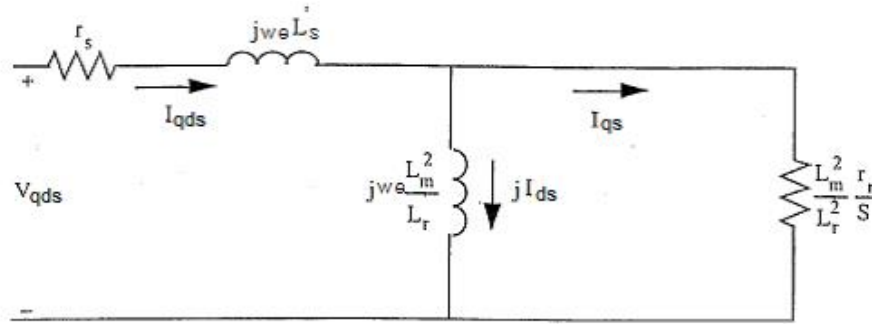


Figura 1: Circuito equivalente utilizando correntes complexas de estado permanente d,q.

O diagrama representado na Figura 1 é um diagrama de um circuito vetorial complexo representando as relações entre as quantidades CC no eixo d e q. Esse é, geralmente, um conceito muito mais utilizado, já que esses circuitos podem ser diretamente associados com os sinais de controle CC por I_{ds} e I_{qs} que são envolvidos na implementação do controle vetorial [1].

Na Figura 2, é demonstrado o diagrama vetorial com as quantidades CC, mostrando as relações entre as quantidades I_{ds} e I_{qs} com as quantidades demonstradas nos modelos em [1].

Os conceitos citados anteriormente e apresentados em [1] para o estado permanente, foram transferidos e desenvolvidos para o estado dinâmico, utilizando como referência o modelo de eixo d,q. A diferença entre os dois estados, permanente e dinâmico, é a existência de um atraso na resposta do fluxo para o seu comando.

Através de demonstrações feitas em [1], encontrou-se as seguintes equações que des-

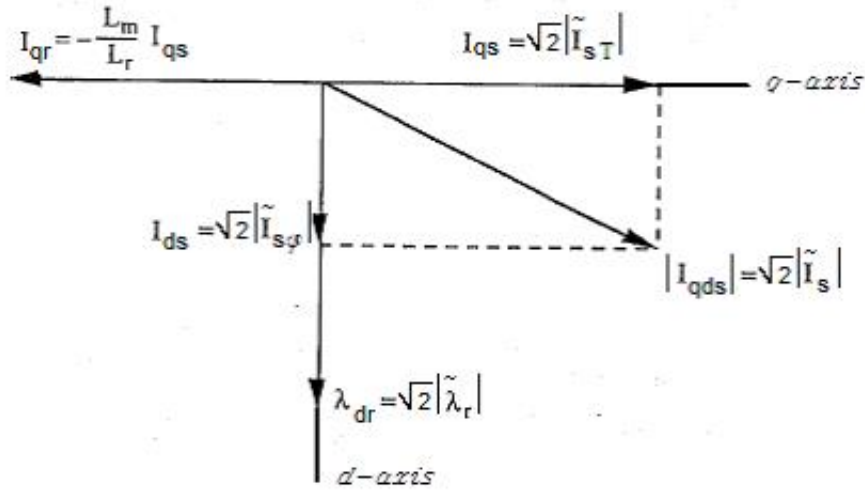


Figura 2: Diagrama vetorial com relação entre as correntes de estado permanente.

crevem o processo dinâmico da máquina de indução:

$$0 = r_r \cdot i_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr} \quad (1.1)$$

$$0 = r_r \cdot i_{dr} + \rho \lambda_{dr} \quad (1.2)$$

$$\lambda_{qr} = L_m \cdot i_{qs} + L_r \cdot i_{qr} \quad (1.3)$$

$$T_e = 3 \cdot (P/2) (L_m/L_r) \cdot (\lambda_{dr} \cdot i_{qs}) \quad (1.4)$$

Essas equações descrevem a resposta dinâmica da orientação de campo da máquina de indução. A Equação 1.4 demonstra a propriedade de controle de torque. Fornecendo um torque proporcional a corrente comandada i_{qs} .

Segundo [1] mantendo o comando de fluxo constante, uma mudança em i_{qs} é seguida instantaneamente por uma correspondente mudança em i_{qr} . O resultado é uma mudança instantânea no torque. Quando há mudança no comando de fluxo, torna-se mais complexo. Uma mudança em i_{ds} induz uma corrente em estado transiente no rotor i_{dr} que subsequentemente decai com o circuito aberto do rotor numa constante de tempo L_r/r_r . A corrente induzida impede qualquer mudança instantânea no fluxo e o fluxo altera para o novo valor exponencialmente com uma constante de tempo de L_r/r_r .

1.1.2 Controladores

Conversores de potência CA em alta performance funcionam como amplificadores de potência, reproduzindo sinais de controle de baixo nível gerados no controlador de campo orientado para sinais de nível apropriados para a máquina controlada. Normalmente, a entrada desse conversor é trifásica com frequência e tensão fixas. A saída deve ter frequência e tensão variadas e atender as faixas de alcance da máquina. No presente, os conversores usados em altas performances são inversores CC. Apesar de ser possível o comando de tensão através dos controladores de campo orientado, muitos sistemas fornecem comandos de corrente e requerem conversores de potência com a função de fontes controladas de corrente.

A razão básica para a seleção de corrente como a variável controlada na máquina CA é a mesma razão da seleção de corrente para a máquina CC, efeitos de resistência, indutância e força eletromagnética induzida são eliminados. Dessa forma, a ordem do sistema é reduzida e a complexidade do controlador é reduzida. Reguladores de corrente para sistemas CA são mais complexos do que sistemas CC, porque reguladores de corrente CA devem controlar tanto amplitude quanto fase da corrente do estator. Como as correntes no estado permanente são CA e não CC, a aplicação convencional do controlador proporcional-integral (PI) como feito no sistema CC não terá o mesmo resultado no sistema CA. Assim como no sistema CC, no sistema CA o controlador de corrente funciona como realimentação do sistema. Esse sistema deverá ter maior largura de banda e erro estacionário zero ou próximo de zero. [4]

1.1.2.1 Controladores Básicos

O primeiro e mais simples tipo de controlador de corrente a ser implementado é o controlador por histerese. O conceito básico é que o controlador aplica o sinal de erro de corrente ao elemento de histerese, a saída fornece o sinal lógico alternando para positivo ou negativo para o elemento de comutação do inversor. Um circuito de bloqueio é normalmente incorporado para permitir que o inversor tenha um tempo de recuperação nas trocas e evitar curtos-circuitos através do sistema CC. Esse sistema é muito simples e fornece uma boa amplitude de corrente, porém esse sistema possui uma grande desvantagem de produzir uma taxa de PWM variável de comutação. [4]

O controlador por comparação de rampa é simples. O erro de corrente processado é comparado a uma onda de forma triangular e se esse erro amplificado na saída for maior ou

menor que uma onda de forma triangular o inversor é chaveado positiva ou negativamente. O inversor chaveia na frequência da onda triangular e produz uma voltagem de saída proporcional ao sinal de erro amplificado na saída. [4]

1.1.2.2 Controladores de Estado Estacionário e Síncrono

Os controladores de estado estacionário são baseados no estado estacionário do modelo de variáveis d,q. Esse controlador emprega simples controladores PI (proporcional-integral) implementados a partir da experiência com a máquina CC. Esse sistema de controle apresenta alguns problemas quando comparado ao sistema de controle empregado nas máquinas CC. No caso da máquina CC, a resposta de estado estacionário é caracterizada por ter erro de corrente nulo, já no caso da máquina CA, a condição de estado estacionário depende de uma saída senoidal na frequência de referência, e o controlador PI produz erro de corrente, diferente de zero, por causa dessa dependência da frequência. [4]

Existem muitos problemas no controle de sinais CA no estado estacionário. Quando um controlador é usado em diferentes referências, ele pode apresentar características diferentes. Um exemplo disso é quando a frequência da corrente está em outra referência diferente da referência do sistema, o regulador pode apresentar problemas na sua performance (quando esse depende da frequência). O regulador síncrono é apropriado desde que as correntes de estado estacionário sejam CC e um simples controlador PI resulte numa corrente de estado estacionário nula.

Na Figura 3, é mostrado o diagrama do controlador de corrente síncrono com comparador de rampa usando controladores PI.

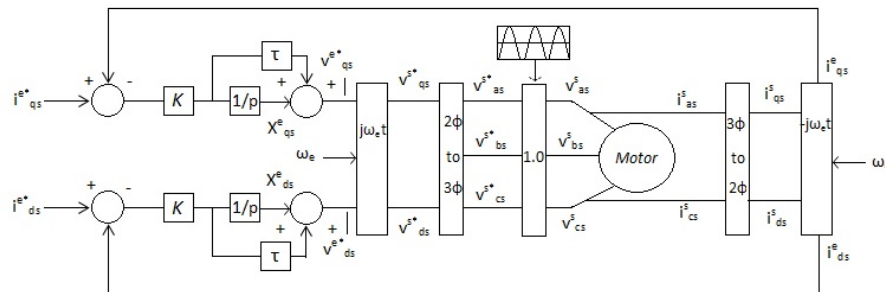


Figura 3: Diagrama do controlador de corrente síncrono com comparador de rampa.

Esse sistema é muito complexo e requer o uso de ferramentas computacionais para a sua implementação. Isso ocorre porque é preciso transformar a corrente medida para o

estado síncrono e depois transformar o erro amplificado na saída de volta para o estado estacionário e usar esse erro no controlador de comparação de rampa. Essas transformações requerem um conhecimento da frequência ω_e .

Para analisar a diferença entre o controlador síncrono e o controlador de estado estacionário, é conveniente transformar o controlador de estado estacionário no controlador síncrono. Essa transformação é mostrada na Figura 4, onde é ilustrado o controlador original e a representação do controlador síncrono.

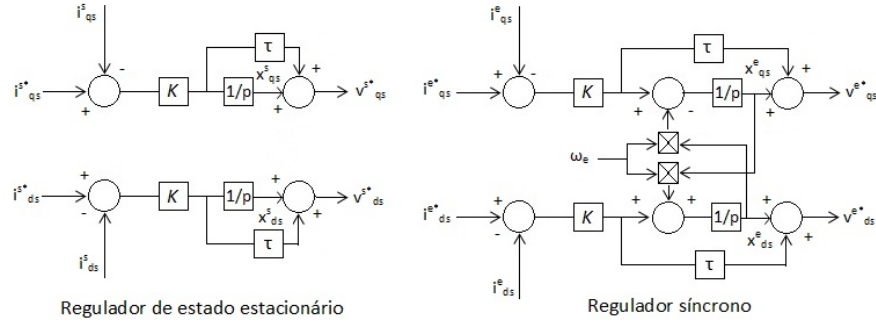


Figura 4: Transformação do estado Estacionário para Síncrono.

A transformação do controlador de estado estacionário para o controlador síncrono começa a partir das equações do controlador de estado estacionário, conforme a seguir:

$$V_s^{s*} = k\tau(i_s^{s*} - i_{qs}^s) + x_s^s \quad (1.5)$$

$$px_s^s = k(i_s^{s*} - i_s^s) \quad (1.6)$$

Usando a equação de transformação da referência estacionária para a referência síncrona, as variáveis estacionárias serão:

$$f_s^s = e^{j\omega_e t} \cdot f_s^e \quad (1.7)$$

Fazendo essa transformação do modelo do controlador de estado estacionário para o controlador síncrono, obtém-se as seguintes equações:

$$V_s^{e*} = k\tau(i_s^{e*} - i_s^e) + x_s^e \quad (1.8)$$

$$x_s^e = 1/p[k(i_s^{e*} - i_s^e) - j\omega_e x_s^e] \quad (1.9)$$

O aspecto mais óbvio do modelo síncrono equivalente em relação ao modelo de estado estacionário é a existência de uma frequência dependente do acoplamento cruzado entre os eixos q e d. Se o controlador síncrono for construído conforme a Figura 3, não existe o acoplamento cruzado. Existem alguns efeitos importantes produzidos pelo acoplamento cruzado. A corrente no eixo q não será zero mesmo que o comando no eixo q for zero se um comando diferente de zero for dado no eixo d. Uma corrente no eixo q, não seguirá apenas ao comando do eixo q. E como o último efeito desse acoplamento cruzado, é que existe a possibilidade de ocorrer o fenômeno de ressonância. Dessa forma, o desempenho do controlador síncrono, é bem superior ao controlador de estado estacionário em todos os aspectos.

1.1.2.3 Método de Compensação por Alimentação

Os métodos de controle vistos até agora, são métodos de controle por compensação em série ou compensação por realimentação. Um novo método é o método de compensação por alimentação. É um método de controle de circuito aberto desde que a quantidade controlada não seja medida ou realimentada pela entrada. Essa compensação por alimentação é usada para estimar um sinal de tensão. Esse tipo de compensação ajuda a diminuir erros aleatórios e ruídos, além de melhorar a precisão do controlador. A Figura 5, mostra um esquema de um controlador por compensação de alimentação.

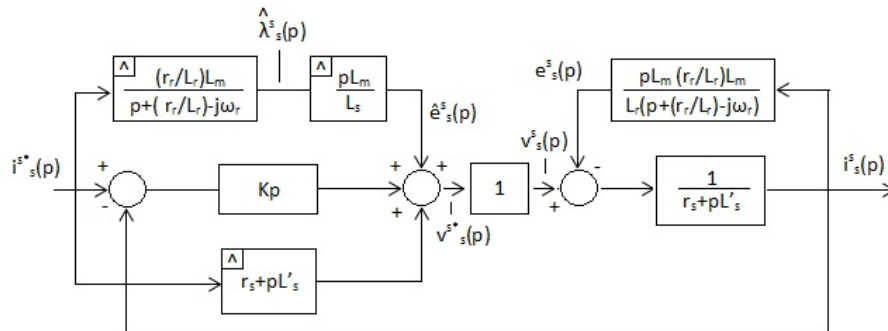


Figura 5: Controlador por Compensação de Alimentação.

É possível também combinar o controlador síncrono, com acoplamento cruzado, com o método alimentado proposto anteriormente. Um exemplo desse método pode ser visto na Figura 6.

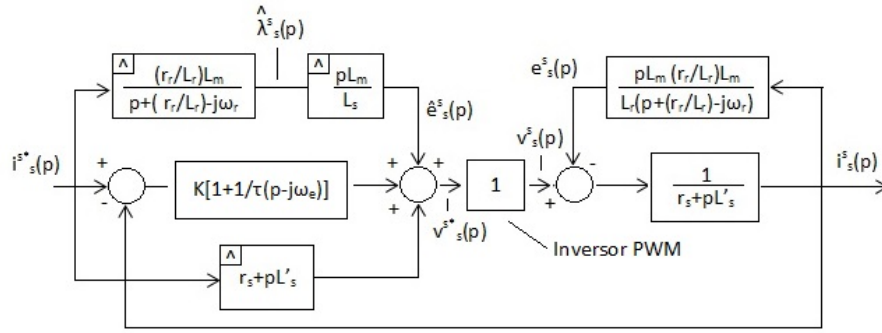


Figura 6: Controlador Síncrono combinado com Método Alimentado.

1.1.2.4 Controladores Avançados

Recentemente, processadores digitais de sinais de potência começaram a ter seu custo competitivo em relação aos circuitos de controle analógicos convencionais. No presente momento, esses processadores são lentos em relação aos métodos de histerese e comparação por rampa, porém, no futuro esse método será muito utilizado, pois esse avanço depende do desenvolvimento das tecnologias destinadas a esse fim. O uso desses processadores permite o cálculo do estado do circuito e permite a seleção de estratégias ideais.

Além dos métodos estudados, estão em estudo também métodos mais avançados, como o uso de redes neurais e o emprego de tecnologias mais avançadas para a regulação de corrente.

1.2 Objetivo Geral

Esse trabalho tem como objetivo principal a implementação de um controlador síncrono para um motor de indução. O estudo das malhas de controle de corrente de eixo direto e de eixo de quadratura do motor, é necessário juntamente com a sintonia dos controladores, para o controle do conjugado do motor de indução em várias condições de operação desse motor.

Com o controle síncrono implementado, e com os controladores ajustados, serão analisadas várias condições de operação do motor, e levantados os resultados dessas análises. Em posse disso será feita uma comparação com o controle feito em [1], comparação essa feita visualmente, através de gráficos, e também uma comparação através da análise do erro médio quadrático.

1.2.1 Objetivos Específicos

- Ajustar os parâmetros do controlador síncrono. Comparar os resultados obtidos com esse controlador com os resultados obtidos em [1].
- Construir uma malha de controle de velocidade para o controlador síncrono.
- Fazer o estudo da adição e rejeição de carga para o modelo controlado em [1] e para o controlador síncrono. Comparar os resultados das análises.

2 *Materiais e Métodos*

Partindo do princípio que o objetivo desse trabalho é implementar um controlador síncrono para que esse seja comparado com um controlador já implementado em [1], todo o estudo será feito em cima de um motor de indução com as características conforme a Tabela 1, o mesmo motor utilizado em [1].

Tabela 1: Características da máquina.

$R_s(\Omega)$	3.85
$R_r(\Omega)$	3.77
$L_{ls}(mH)$	8.53
$L_{lr}(mH)$	12.7
$L_m(mH)$	237
$J(Kg.m^2)$	$16.e^{-3}$
$D(Ns/rad)$	$5.e^{-3}$
Polos	4
Velocidade Nominal (RPM)	1715
Conjugado Nominal (N.m)	8.3
Potência (Cv)	2
Tensão Nominal (V/fase)	220
Corrente Nominal (A)	4.9

Conhecendo as características da máquina, em [1] foi feito um modelo, que representa uma máquina real. Para o controle desejado, foi utilizado o modelo de orientação de eixos d, q. Como o modelo da máquina de indução tem orientação de eixos a, b, c, foi preciso manipular as variáveis de entrada e saída.

Na Figura 7, é mostrado o modelo da máquina de indução conforme citado anteriormente.

Em [1], foi simulado primeiro o motor com o eixo de rotação travado, ou seja, com a velocidade nula. Foram geradas as curvas de tensão de eixo direto e de quadratura, e correntes de eixo direto e de quadratura. Com essas curvas e com o uso de métodos determinísticos de identificação de sistemas [5], foram obtidos modelos que descrevessem o

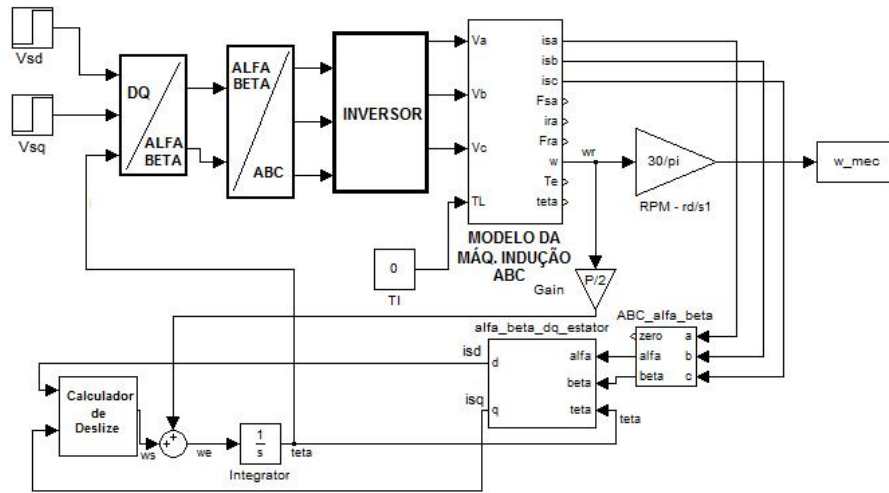


Figura 7: Modelo da máquina de indução.

comportamento da máquina. De posse de tudo isso, foram obtidas funções de transferência que descrevem o sistema. Com o eixo de rotação travado, foram obtidas as características transitórias do motor de indução.

Foram também ajustados os ganhos dos controladores utilizados para a realização do controle das correntes do motor de indução. Esses controladores foram inseridos com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema. Nesse caso, foram implementados controladores PID. Para esses controladores, o ganho derivativo (k_d), foi ajustado para zero, para evitar respostas inconvenientes no sistema. A partir da inserção dos controladores PI, foram geradas novas funções transferência para descrever o sistema [6].

Com o eixo de rotação travado, método utilizado para obter as características transitórias do motor e ajustar os controladores PI, foram obtidas as curvas de referência de corrente de eixo direto e corrente controlada de eixo direto, conforme visto na Figura 8.

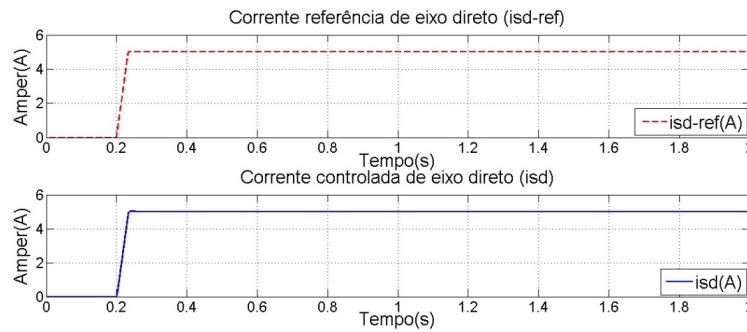


Figura 8: Corrente referência e corrente controlada de eixo direto com eixo de rotação travado.

Com o eixo travado, também obteve-se as curvas de corrente de referência de eixo de

quadratura e corrente controlada de quadratura, conforme Figura 9.

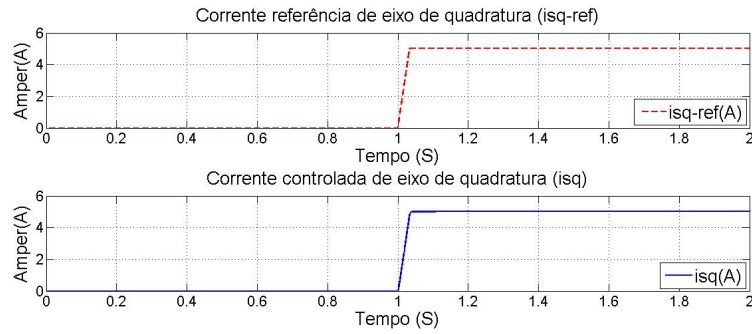


Figura 9: Corrente referência e corrente controlada de eixo de quadratura com eixo de rotação travado.

Depois de implementados os controladores com o eixo de rotação do motor de indução travado, velocidade nula, foram feitas simulações com o eixo de rotação em movimento. O objetivo é comparar com o controle conseguido anteriormente com o eixo travado. Esses testes eram feitos com o objetivo de verificar se as curvas obtidas através das correntes controladas no sistema seguiam as curvas de referência das correntes.

Com o eixo de rotação do motor em movimento, foi possível observar a corrente de referência e corrente controlada de eixo direto, conforme visto na Figura 10.

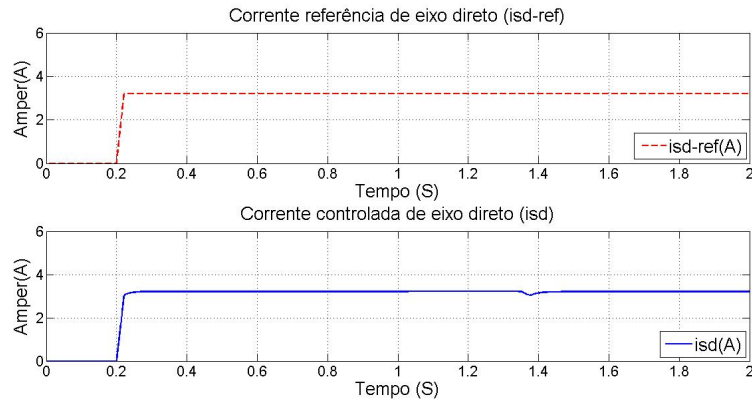


Figura 10: Corrente referência e corrente controlada de eixo direto com eixo de rotação em movimento.

Na Figura 11, pode ser observado o comportamento da corrente de eixo de quadratura. Pode ser feita a comparação entre a curva de referência da corrente e o resultado obtido com o controlador.

Uma vez que as correntes da máquina foram controladas, é possível fazer o controle do torque. A Figura 12 mostra a curva que representa o torque com o eixo de rotação da

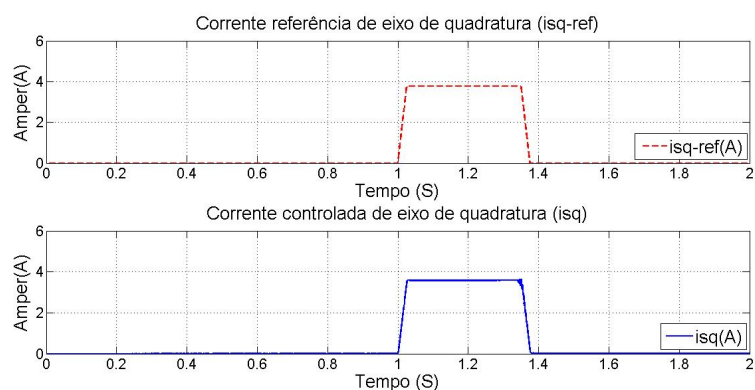


Figura 11: Corrente referência e corrente controlada de eixo de quadratura com eixo de rotação em movimento.

máquina travado. A Figura 13 apresenta o torque da máquina com os testes feitos com o eixo de rotação em movimento.

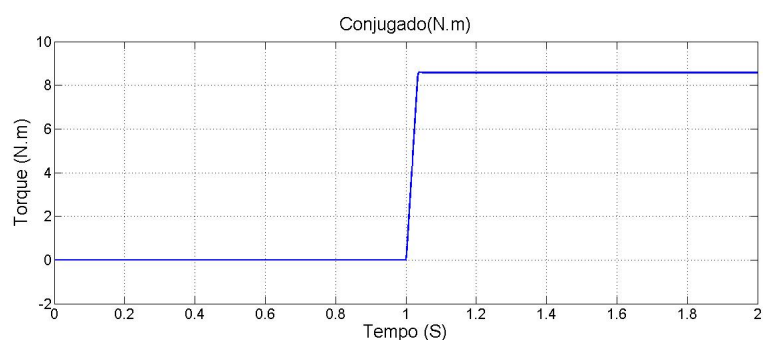


Figura 12: Torque da máquina com eixo de rotação travado.

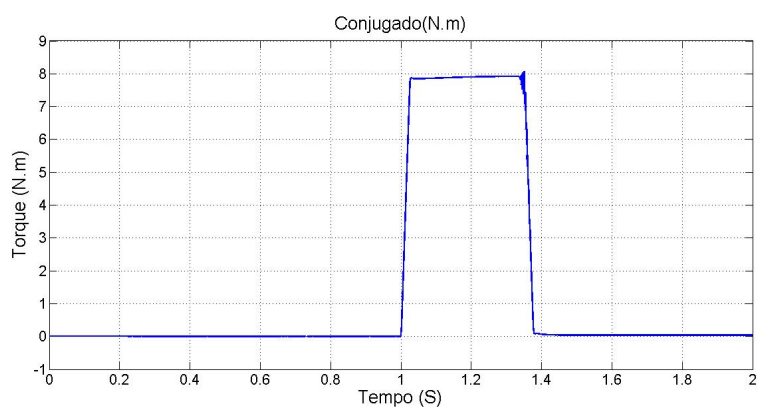


Figura 13: Torque da máquina com eixo de rotação em movimento.

Com os resultados obtidos através da implementação do controlador PI, serão feitas comparações entre esses resultados com os resultados obtidos através da implementação de um outro tipo de controlador. O controlador síncrono.

2.1 Implementação do controlador síncrono

Para implementar o controlador síncrono, foi utilizado o modelo do motor de indução conforme mostrado na Figura 7. A partir desse modelo, foi adicionado nesse o modelo de controlador conforme mostrado na Figura 4, apresentado na revisão bibliográfica. Esse controlador foi implementado conforme as equações descritas na revisão bibliográfica e as seguintes equações:

$$V_{ds} = i_{ds} + e_{ds} - \omega_e \cdot L'_s \cdot i_{qs} + R_s \cdot i_{ds} \quad (2.1)$$

$$V_{qs} = i_{qs} + e_{qs} + \omega_e \cdot L'_s \cdot i_{ds} + R_s \cdot i_{qs} \quad (2.2)$$

Onde as parcelas e_{ds} e e_{qs} representam as compensações internas existentes no controlador síncrono [7]. Essas parcelas são dadas por:

$$e_{ds} = (i_{ds} \cdot s \cdot \omega_e \cdot L_r - i_{qs} \cdot R_r) \cdot (\omega_e \cdot (L_m^2 / L_r) \cdot R_r) / (R_r^2 + s \cdot \omega_e^2 \cdot L_r^2) \quad (2.3)$$

$$e_{qs} = (i_{qs} \cdot s \cdot \omega_e \cdot L_r - i_{ds} \cdot R_r) \cdot (\omega_e \cdot (L_m^2 / L_r) \cdot R_r) / (R_r^2 + s \cdot \omega_e^2 \cdot L_r^2) \quad (2.4)$$

Como mencionado anteriormente, pode ser observado através dessas equações que uma parcela de uma corrente de um dos eixos serve como realimentação no outro eixo.

Como pode ser visto na Figura 4, a qual ilustra o controlador síncrono, existe um bloco K. Para efeito de comparação com o controlador já implementado em [1], nesse bloco K, faremos o uso do mesmo controlador PI utilizado em [1]. Podendo assim comparar as curvas de corrente fornecidas com o uso de cada controlador, verificando assim o desempenho de cada um. Como visto em [1], os parâmetros do controlador de eixo direto, eixo d, foram ajustados para $Kp = 100V/A$ e $Ki = 5000V/(A/s)$. No eixo de quadratura, eixo q, os parâmetros do controlador PI foram ajustados para $Kp = 15V/A$ e $Ki = 7000V/(A/s)$.

Uma forma de comparar os resultados obtidos através do controle feito com o controlador síncrono com o controlador implementado em [1], é comparar o erro médio quadrático obtido das curvas de corrente. É o erro calculado entre a curva de referência e a curva da corrente controlada. Em [1], o erro obtido da corrente i_{ds} , corrente de eixo direto para o

motor operando em vazio e como eixo de rotação em movimento é de 0,9%. Para a curva de eixo de quadratura, i_{qs} , o erro obtido foi de 0,8%.

O erro médio quadrático calculado para as correntes controladas através do controlador síncrono é dado pela equação:

$$E = \Sigma(x - x_{ref})^2/n \quad (2.5)$$

No caso desse estudo, x é dado pela curva de corrente controlada, x_{ref} é dado pela curva de referência de corrente e n é dado pelo número de pontos utilizados nos cálculos. Lembrando que essas relações são feitas analisando ponto a ponto.

Além da comparação através do cálculo do erro médio quadrático, é feita também a comparação visual, feita através da análise das curvas obtidas.

2.2 Controle de Velocidade

Com o controlador implementado para o motor operando em vazio, foi feito um controle de velocidade para o modelo com o controlador síncrono afim de verificar e confirmar os resultados encontrados anteriormente. Foi realizado um controle de velocidade com através de um controlador PI, com $k_p = 5A/RPM$ e $k_i = 0.1A/(RPM/s)$. Com esse controle feito observou-se um comportamento diferente da corrente controlada e do torque de [1] em relação ao controlador síncrono.

Esse controlador foi ajustado para que a velocidade do motor estabilizasse em $1100RPM$, dessa forma podemos verificar o comportamento do torque e da corrente controlada, e comparar visualmente com a corrente e o torque em [1].

Após verificar o controle feito através do controlador síncrono, com o motor operando em vazio, sem carga, foi feito um estudo das correntes controladas agora adicionando uma carga ao motor quando o torque está estável, e com o torque do motor estável, retira-se essa carga para analisar o comportamento do motor. Dessa forma, foi feito um estudo para adição e rejeição de carga.

2.3 Estudo de Adição e Rejeição de Carga

Esse estudo de adição e rejeição de carga foi feito da seguinte forma. Uma vez que a velocidade foi estabilizada em $1100RPM$, foi adicionada uma carga de torque de $5N.m$. Após o motor trabalhar um tempo com essa carga, essa carga foi retirada e o motor voltou a operar em vazio. Feito isso, foram obtidas as curvas de corrente e torque.

Esse estudo de adição e rejeição de carga foi realizado para o motor controlado pelo controlador síncrono, e foi realizado também para o motor controlado através do controlador implementado em [1].

Para realizar esse estudo de adição e rejeição de carga, além do controlador síncrono ou no caso de [1], o controlador implementado no estudo, existiu a necessidade de fazer uma malha de controle de velocidade. Isso ocorreu, pois foi preciso estabilizar a velocidade para adicionar e remover a carga no motor. Foi implementado um controlador PI, com $Kp = 5A/RPM$, e $Ki = 0.1A/(RPM/s)$. Em [1], não existia controle de velocidade, então para comparar os resultados do controlador síncrono com o controlador implementado em [1], foi feito uma malha de controle de velocidade nas simulações utilizadas em [1]. Para efeito de comparação, os mesmos parâmetros do controlador PI, foram utilizados nas duas simulações.

3 *Resultados e Discussões*

Da mesma forma que em [1], nesse trabalho o motor foi estudado através da resposta a entrada em degrau. Para comparar com os resultados obtidos em [1], foi implementado um controlador, conhecido por controlador síncrono. Foram feitas malhas de controle de velocidade no controlador síncrono e no controlador implementado em [1]. A seguir, seguem os resultados obtidos através das análises realizadas.

3.1 Resultados Obtidos com o Controlador Síncrono

Uma vez que o objetivo do trabalho é fazer a comparação entre os resultados em [1] e o controlador síncrono, implementado nesse trabalho, segue na Figura 14, o gráfico que representa as curvas de corrente de referência i_{sd} , mostrada pontilhada e em vermelho e a curva da corrente i_{sd} controlada pelo controlador síncrono em azul. Nessa primeira parte, os resultados apresentados serão todos para a máquina de indução operando a vazio.

Como pode ser visto, a corrente controlada acompanha bem a corrente de referência, é quase que imperceptível a diferença entre as duas, assim como no caso do controlador implementado em [1]. Lembrando que a corrente i_{sd} é a corrente de eixo direto, que é do ramo da máquina que é responsável pela magnetização da mesma. Para efeito de comparação, a ação de controle de corrente foi obtida com um erro médio quadrático de 0.005%.

A Figura 15, mostra as curvas da corrente de referência i_{sq} em pontilhado de vermelho em comparação com a corrente i_{sq} controlada em azul, através do controle realizado pelo controlador síncrono.

Nesse caso, a corrente controlada também acompanha bem a referência, porém é possível ver uma pequena diferença entre as duas correntes. Podendo assim afirmar que a corrente foi devidamente controlada. Para essas correntes foi obtido através da ação de controle, um erro médio quadrático de 0.05%.

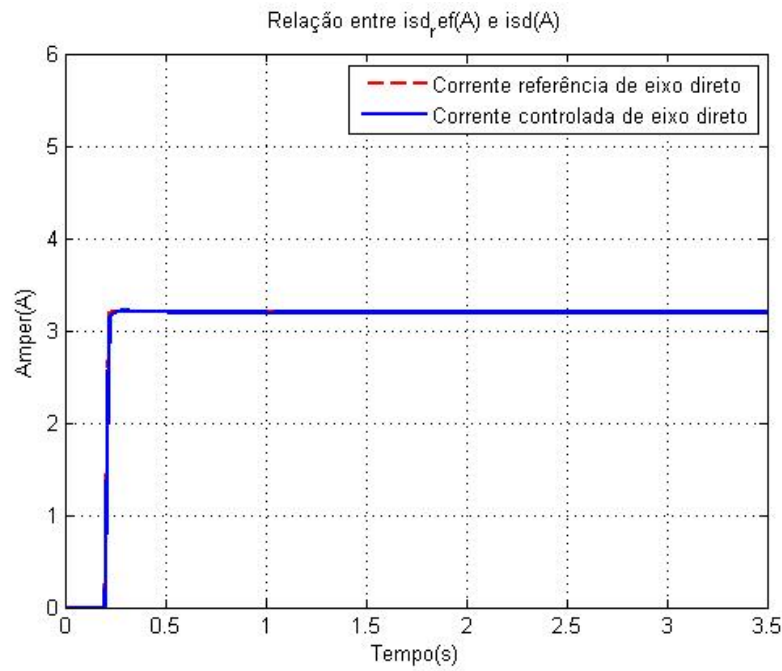


Figura 14: Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd} .

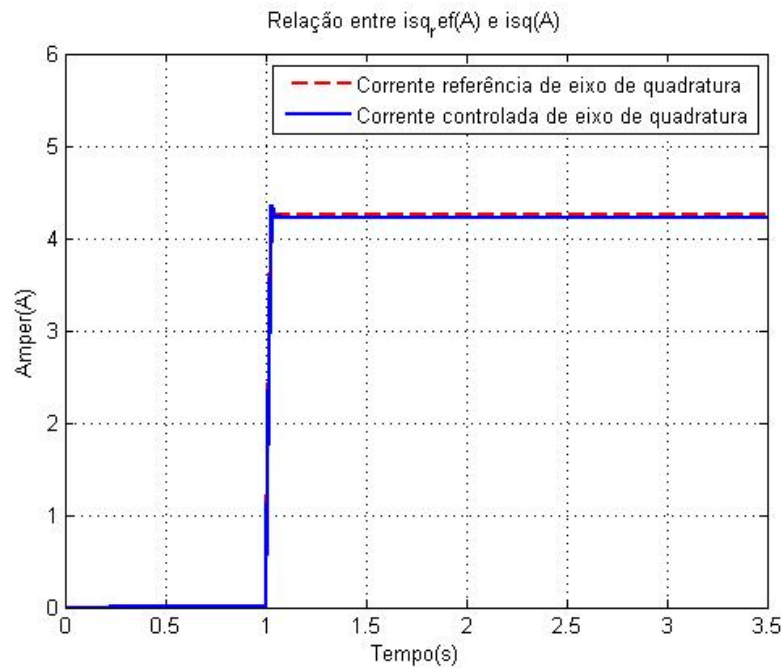


Figura 15: Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq} .

Através das simulações, é possível analisar também o que ocorre no conjugado da máquina devido a ação de controle da corrente i_{sq} , uma vez que essa corrente é responsável pelo ramo responsável pelo torque da máquina. Na Figura 16, é possível observar o comportamento do torque.

Como pode ser observado, há uma relação de proporcionalidade entre a corrente de

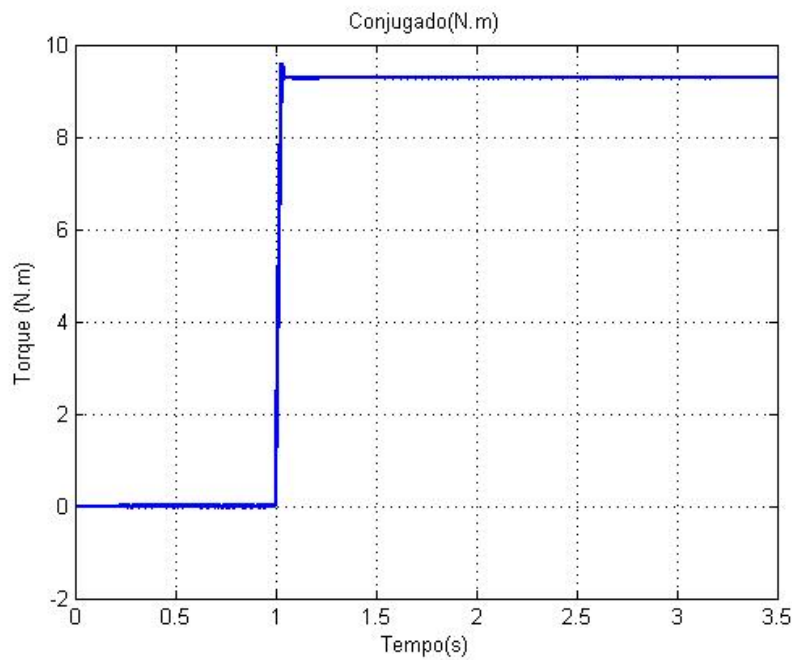


Figura 16: Comportamento do torque da máquina devido a ação de controle de corrente.

eixo de quadratura i_{sq} e o conjugado da máquina. Isso ocorre porque a corrente i_{sq} como já mencionado, é responsável pelo torque da máquina.

É possível observar também, analisando as curvas levantadas em [1], vistas na metodologia do presente trabalho, que em [1] o torque volta a zero depois de um período de tempo, e com o controlador síncrono isso não ocorre. O porque disso não ocorrer nesse controle, é que a velocidade não estabiliza quando atinge um certo ponto, o motor continua acelerando necessitando assim de corrente para conseguir manter o torque enquanto o motor acelera. Como o modelo não possui controle de velocidade, o motor continua acelerando e dispara.

3.2 Controlador Síncrono com Controle de Velocidade

Para confirmar o que foi dito anteriormente, foi feito um controle de velocidade, através de um controlador PI. A Figura 17 mostra a relação entre a corrente controlada i_{sd} e a corrente de referência i_{sd}^* com a velocidade do motor controlada.

Mais uma vez, não foi possível observar diferença entre a corrente controlada e a corrente de referência. Mostrando que o controle foi eficiente. O erro médio quadrático obtido através desse controle foi de 0.0047%.

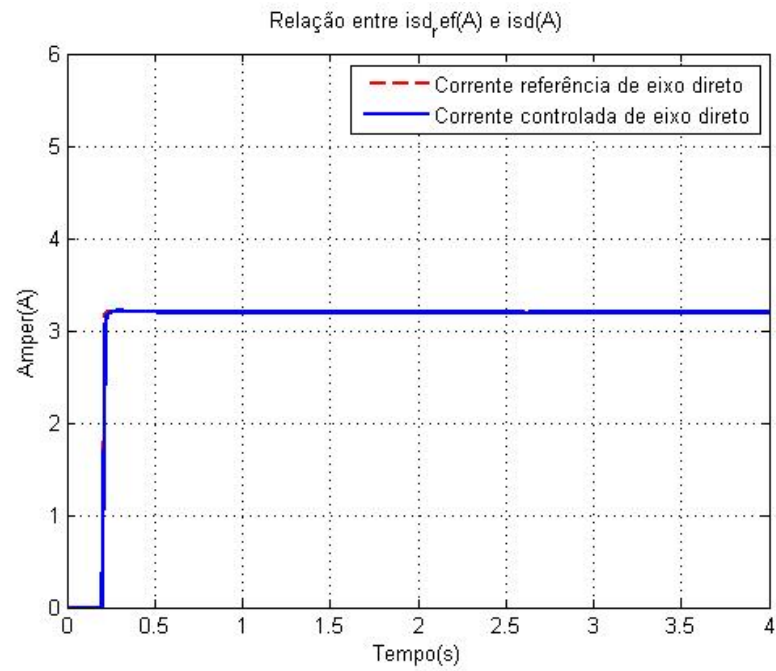


Figura 17: Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd} .

A Figura 18 mostra a relação entre a corrente controlada i_{sq} e a corrente de referência i_{sq} com a velocidade do motor controlada.

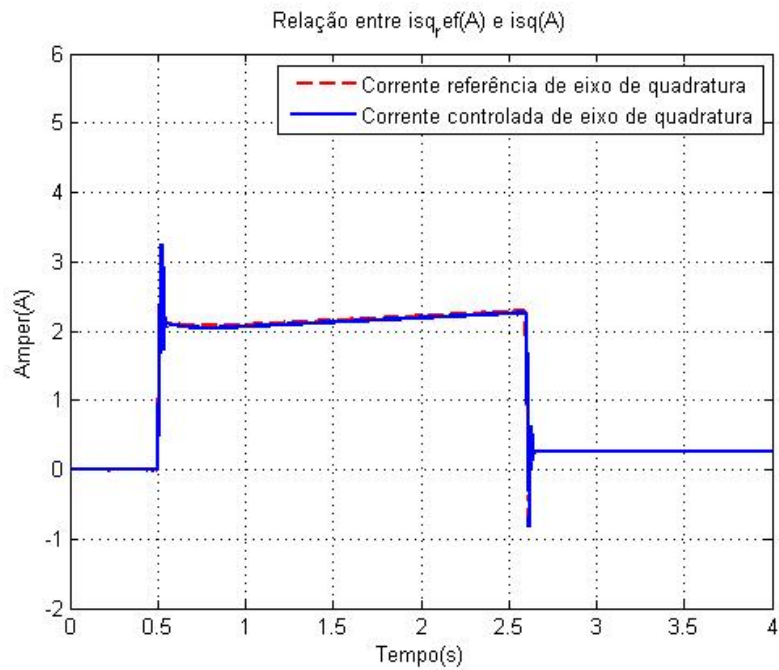


Figura 18: Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq} .

Através da curva, pode-se observar que a ação de controle nesse caso foi satisfatória, pois a curva da corrente controlada acompanha bem a curva de referência. Através dessa

ação de controle, foi obtido um erro médio quadrático de 0.0694%.

A Figura 19 mostra o conjugado da máquina com a velocidade da mesma controlada em 1100RPM.

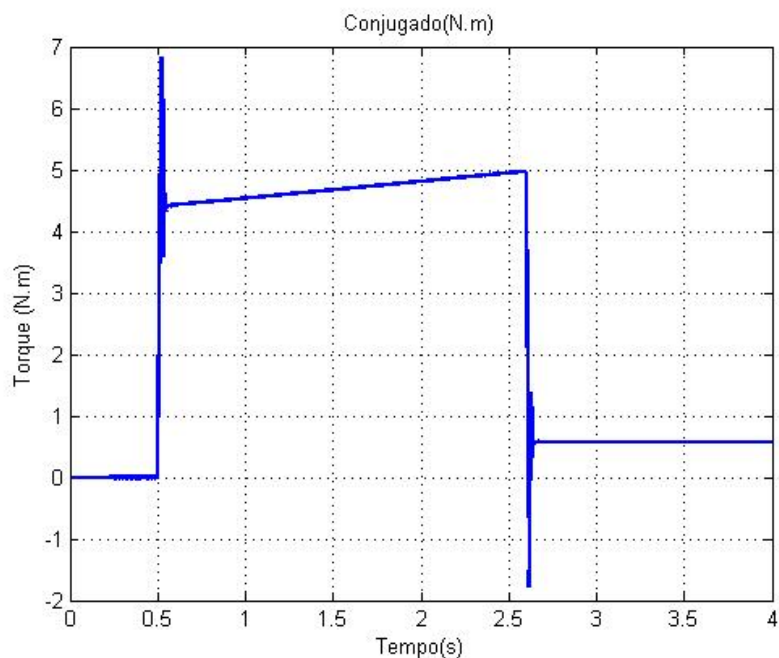


Figura 19: Conjugado do motor com velocidade controlada em 1100RPM.

Como pode ser observado nas Figuras 18 e 19, o conjugado da máquina acompanha bem a corrente controlada da máquina. Isso ocorre, pois como já citado anteriormente, a corrente de eixo de quadratura, i_{sq} , é a corrente do ramo responsável pelo controle do torque. Na partida do motor, o torque é zero, e aumenta gradativamente quando o motor começa a acelerar e aumenta até o motor alcançar a velocidade de 1100RPM. Quando alcança a velocidade de 1100RPM, a corrente de eixo de quadratura cai, o que faz o torque diminuir, e permanecer em um valor baixo mantendo-se nesse valor apenas para suprir as perdas da máquina. A velocidade permanece nesse valor de referência, até que algo faça essa velocidade cair.

A Figura 20 mostra a velocidade de referência, pontilhada, e a velocidade controlada, linha contínua. Essa figura ilustra o controle de velocidade citado, mostrando através do gráfico, sua eficiência.

Como pode ser observado, não é possível ver diferença entre a curva pontilhada, velocidade de referência e a velocidade controlada, a linha contínua. No caso desse controle, a velocidade acompanha perfeitamente a referência, sem que haja diferença alguma.

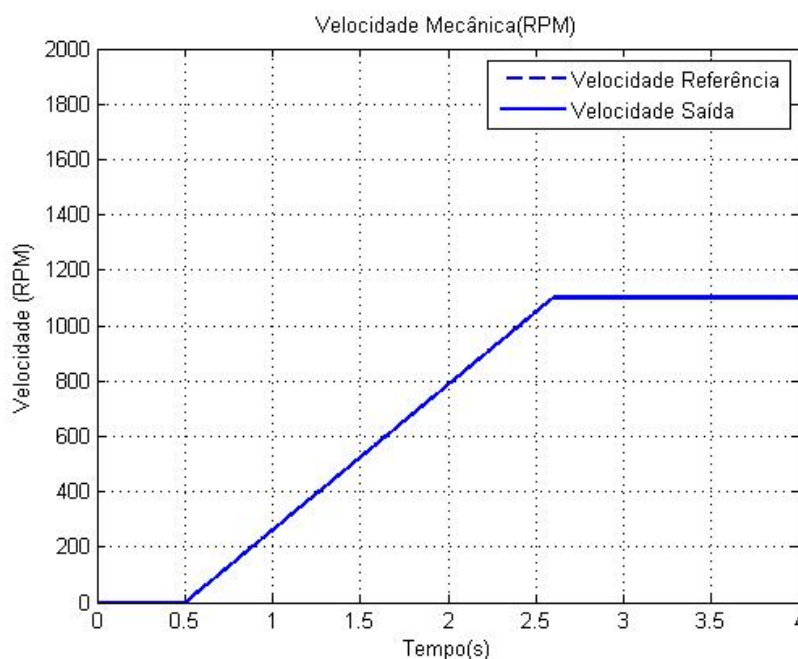


Figura 20: Relação entre a velocidade controlada do motor e a velocidade de referência.

3.3 Estudo de Adição e Rejeição de Carga

Após realizados os estudos feitos através da implementação do controlador síncrono, e comparar com as análises feitas em [1], foi realizado um estudo de adição e rejeição de carga. Primeiro no controlador implementado em [1] e depois no controlador síncrono.

3.3.1 Estudo de Adição e Rejeição de Carga em [1]

A Figura 21 traz a relação entre a corrente controlada i_{sd} e a corrente de referência i_{sd}^* . A corrente de referência é a corrente pontilhada em vermelho, e a corrente azul é a corrente controlada. Esse primeiro estudo é feito a partir do estudo do controlador implementado em [1].

Nessa curva é possível observar algumas perturbações, apesar de poder ser observado que a curva de corrente controlada acompanha bem a curva de corrente de referência. Essa perturbação observada próximo a 3 segundos ocorre por que nesse ponto a velocidade se estabiliza em 1100RPM, tendo uma diminuição na corrente de eixo de quadratura e consequentemente no torque. A perturbação em 4 segundos, ocorre quando acontece a adição de carga no motor. Já a perturbação que ocorre próximo a 7 segundos acontece quando há a retirada da carga do motor e esse volta a operar a vazio. Pela análise do erro médio quadrático, obtemos um erro de 0.0118%.

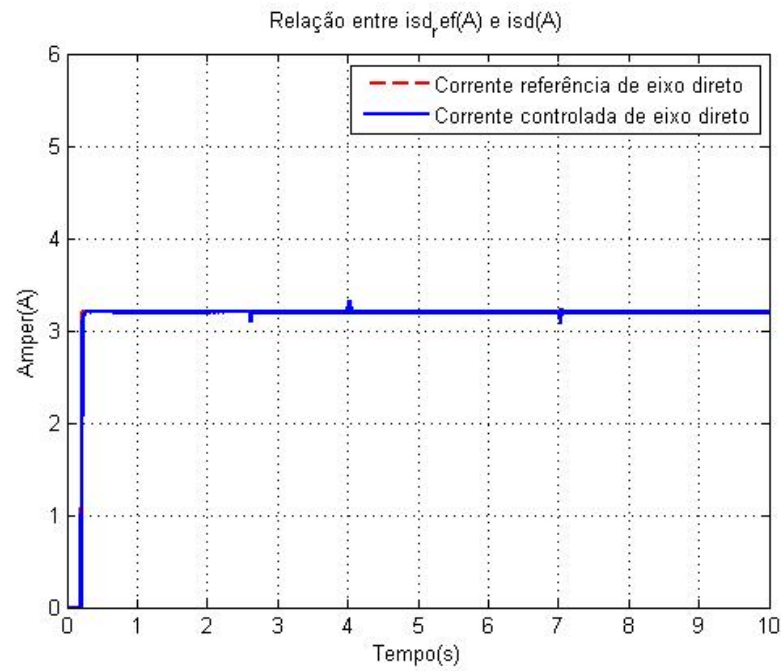


Figura 21: Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd} .

Na Figura 22, conseguimos observar o comportamento da curva da corrente controlada i_{sq} em relação a curva de referência da corrente i_{sq} .

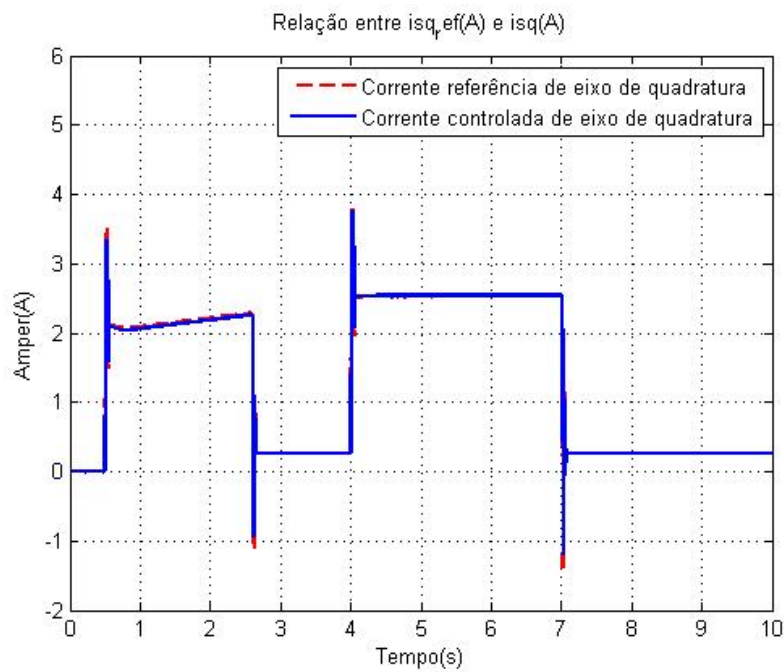


Figura 22: Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq} .

Como pode ser observado na Figura 22, a curva da corrente controlada i_{sq} acompanha bem a curva de referência da corrente i_{sq} . A corrente aumenta enquanto o motor acelera, e

quando a velocidade se estabiliza, fica no motor apenas uma corrente para manter o torque suprindo as perdas do motor. Essa corrente fica estável até que uma carga de $5N.m$ é inserida no motor, e nesse ponto a corrente aumenta, pois o motor precisa de mais torque para manter a velocidade com a carga inserida no motor. Próximo aos 7 segundos, a corrente cai novamente, quando a carga é retirada do motor e esse volta a operar a vazio. Pela análise de erro médio quadrático, o erro obtido da relação das correntes é 0.1005%.

A Figura 23, ilustra o torque do motor. Mostra o comportamento do torque da máquina operando a vazio, adicionando e retirando carga.

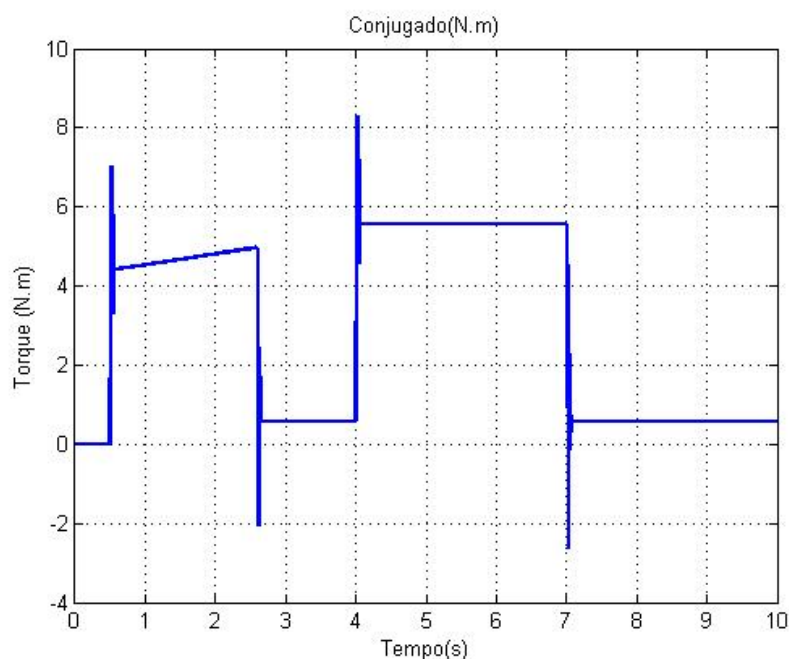


Figura 23: Conjugado do motor com velocidade controlada com estudo de adição e rejeição de carga.

Como pode ser observado na Figura 23, a curva do torque acompanhou bem a curva de corrente de eixo de quadratura i_{sq} . Esse resultado era esperado, uma vez que a corrente de eixo de quadratura é a corrente responsável pelo comando de torque da máquina. O comportamento da curva de torque pode ser explicado da seguinte forma. O torque da máquina parte de zero e chega até um valor pouco acima de $5N.m$ no sistema enquanto a máquina acelera, e estabiliza quando a velocidade estabiliza em $1100RPM$, esse torque se mantém bem baixo, apenas para suprir as perdas da máquina. Esse torque volta a subir novamente quando uma carga é inserida no motor. Dessa forma o motor trabalha com o torque mais alto e volta a cair quando a carga é retirada. Após ser retirada a carga, o torque volta a ser baixo, apenas para suprir as perdas do motor.

A Figura 24 mostra o comportamento da velocidade do motor. Como essa foi contro-

lada, é interessante visualizar o resultado desse controle e o comportamento da velocidade da máquina com a adição e rejeição de carga.

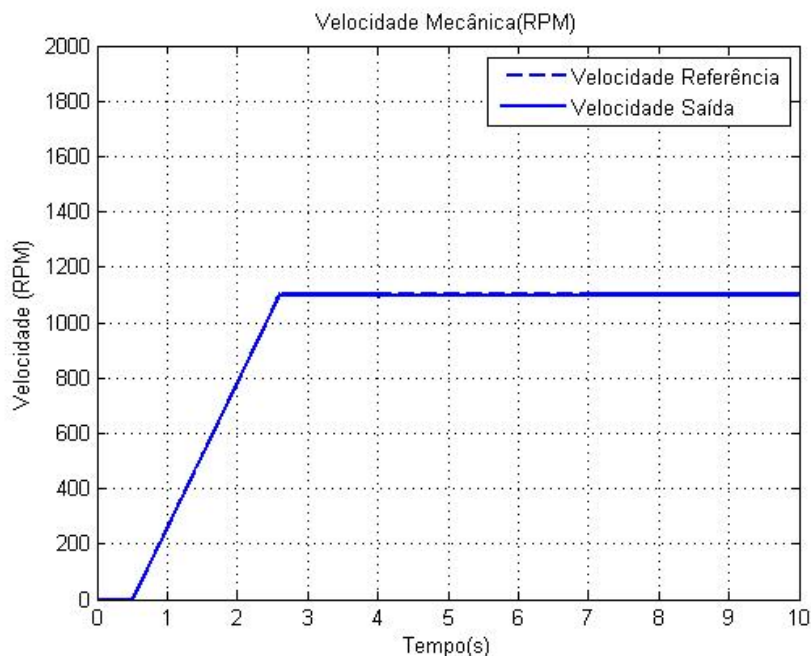


Figura 24: Velocidade controlada do motor com adição e retirada de carga.

Na Figura 24 é observado que o controle da velocidade pode ser realizado de forma satisfatória. A velocidade acompanha bem a curva de referência de velocidade, desde a partida do motor até atingir a velocidade de 1100RPM que é a velocidade de referência. Quando ocorre a adição de carga na máquina, a velocidade não acompanha a referência como acontecia quando essa se estabilizou em 1100RPM, e a velocidade só volta a acompanhar a referência, quando a carga é retirada da máquina. Essa diferença ocorre por causa dos ajustes do controlador, ou devido ao pouco tempo que a máquina teve para estabilizar a velocidade.

3.3.2 Estudo de Adição e Rejeição de Carga com Controlador Síncrono

Após o estudo realizado com a simulação feita em [1], foi feito o mesmo estudo com o controlador síncrono implementado. Os resultados desse estudo serão apresentados a seguir.

A Figura 25 mostra a curva de corrente controlada i_{sd} em relação a curva de referência de corrente i_{sd} . Esse estudo foi feito para adição de carga depois do motor ter a velocidade estável e depois a retirada dessa carga. Em vermelho e pontilhada, está a curva de

referência de corrente e em azul a curva de corrente controlada.

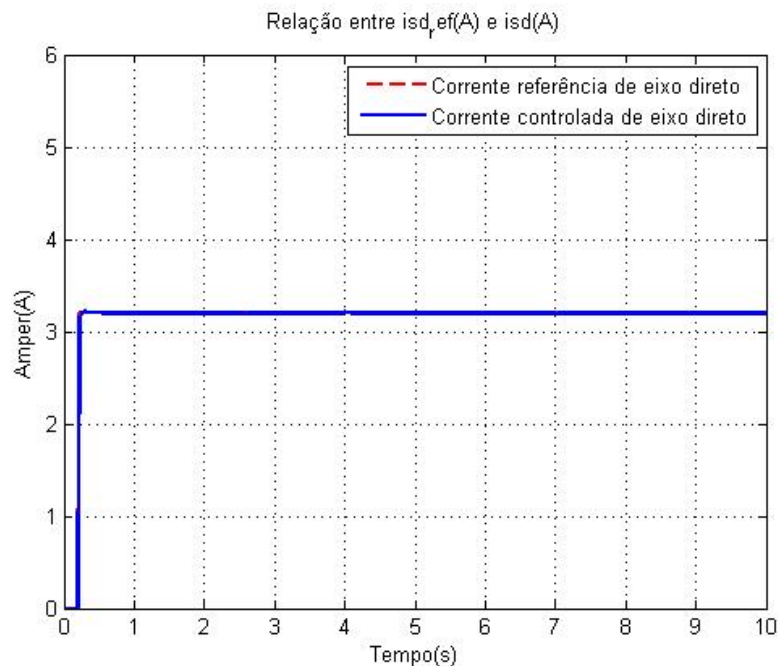


Figura 25: Relação entre a corrente i_{sd} de referência e a corrente controlada i_{sd} .

Na Figura 25, pode ser observado que a corrente controlada i_{sd} acompanha bem a curva de referência. O comportamento dessa curva é muito parecido com a curva do motor em relação ao controlador implementado em [1]. Esse fato já era esperado, uma vez que essa corrente é responsável pelo ramo de magnetização da máquina. Pela análise de erro médio quadrático, obteve-se um erro de 0.0020%.

A Figura 26 apresenta a relação entre a corrente controlada i_{sq} em linha contínua e a corrente de referência i_{sq} em linha pontilhada.

Na Figura 26, é possível ver o comportamento da corrente de eixo de quadratura controlada. Como pode ser visto, essa corrente acompanha bem a referência. Pela análise do erro médio quadrático, dessa relação obtém-se um erro médio quadrático de 0.0428%. Da mesma forma que ocorre com o comportamento das outras curvas de corrente i_{sq} , a corrente parte de zero, e aumenta até a velocidade se estabilizar. Nesse ponto, onde a velocidade é estável, a corrente cai e fica em um nível baixo apenas para suprir as perdas da máquina. Quando é adicionada uma carga no motor a corrente aumenta novamente para seu valor de máximo e volta a cair novamente quando a carga é retirada do motor. Nesse ponto, a corrente se mantém em um nível baixo novamente apenas para suprir as perdas do motor.

Através da Figura 27, observamos o comportamento da curva de torque da máquina.

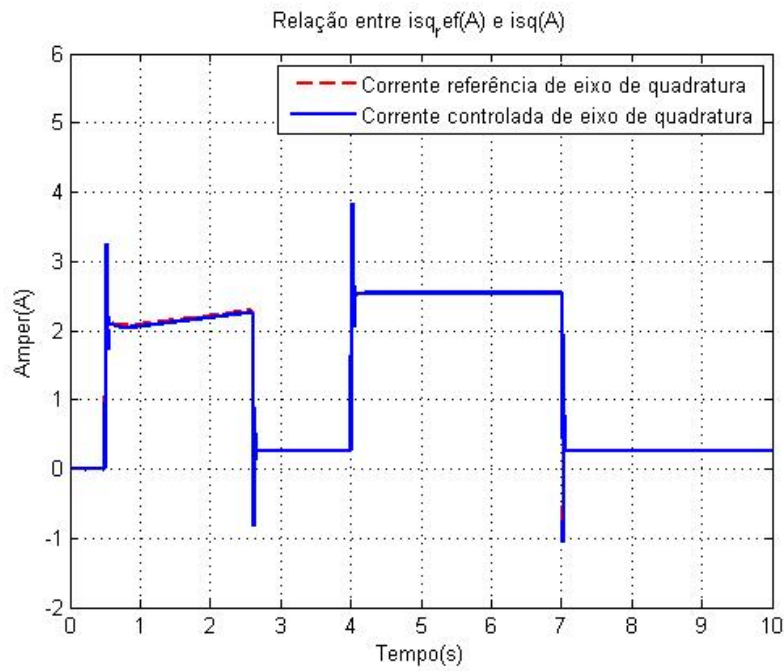


Figura 26: Relação entre a corrente i_{sq} de referência e a corrente controlada i_{sq} .

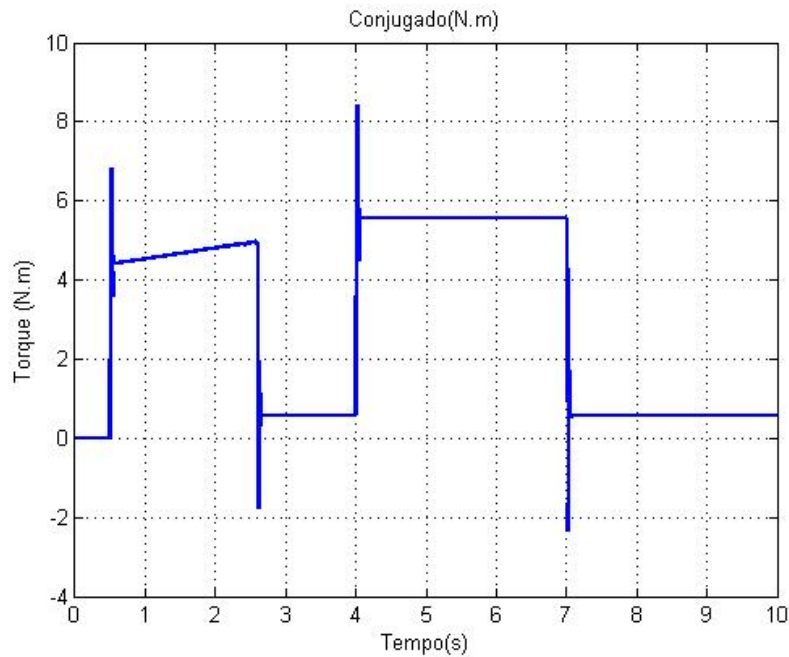


Figura 27: Conjugado do motor com estudo de adição e rejeição de carga.

Como pode ser observado, a curva do torque da máquina, conjugado, acompanha bem a curva de corrente controlada i_{sq} . Esse resultado já era esperado, uma vez que a corrente responsável pelo torque da máquina, é a corrente i_{sq} . O torque aumenta enquanto a máquina acelera. Quando a máquina chega na velocidade de $1100RPM$, o conjugado da máquina fica estável, e fica em um nível baixo, pois ele apenas supre as perdas da

máquina. Quando adiciona carga na máquina, o torque sobe novamente e se mantém no valor de um pouco mais de $5N.m$ enquanto a carga não é retirada. Após a carga ser retirada, o torque volta de novo para um valor baixo, já que nesse caso ele apenas supre as perdas da máquina.

A Figura 28 mostra como se comporta a curva de velocidade da máquina com a adição e rejeição de carga. Nessa configuração da máquina, a velocidade é controlada por um controlador PI. Na figura a curva pontilhada é a curva de referência de velocidade e a curva contínua é a curva de velocidade controlada da máquina.

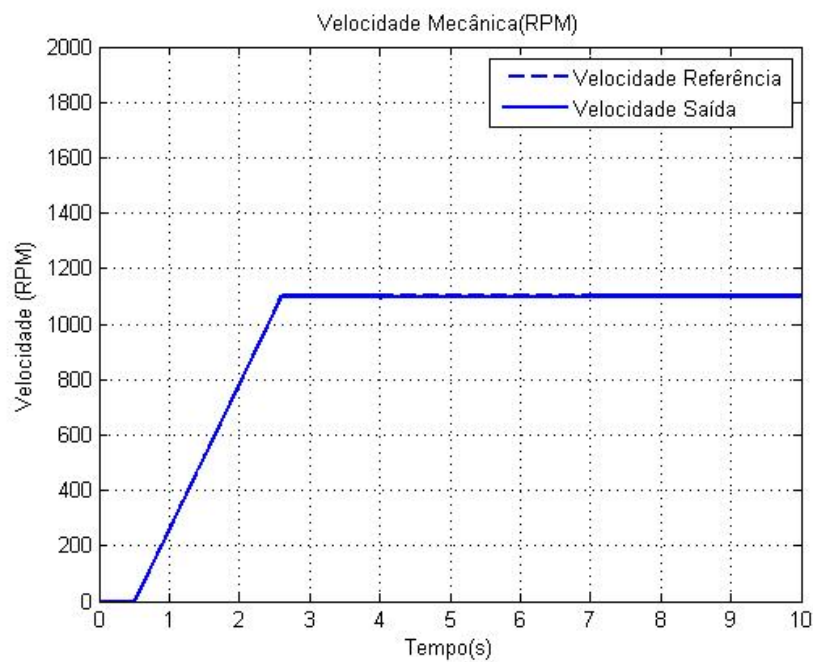


Figura 28: Velocidade controlada do motor com adição e retirada de carga.

Como pode ser visto, a velocidade estabiliza em $1100RPM$, que é onde se encontra a referência de velocidade. Ocorre uma queda na velocidade quando insere a carga na máquina, e a velocidade volta à referência quando a carga é retirada da máquina. A velocidade não volta à referência antes da retirada da carga pois não tem tempo para estabilizar, antes do tempo necessário para que ela estabilize, a carga é retirada da máquina.

Através das análises do erro médio quadrático, já mencionadas anteriormente foi gerada a Tabela 2 onde mostra o erro gerado através da ação de controle do controlador implementado em [1] e o controlador síncrono.

Como foi feito também um estudo de adição e rejeição de cargas para o controlador implementado em [1] e para o controlador síncrono, foi feita a Tabela 3 com os erros gerados pela análise do erro médio quadrático para efeito de comparação da eficiência da

Tabela 2: Comparação dos erros entre o controlador de [1] e o controlador síncrono com eixo de rotação em movimento.

Modelos de Controlador	Controlador de [1]	Controlador Síncrono
Corrente i_{ds}	0.9%	0.005%
Corrente i_{qs}	0.8%	0.05%

ação de controle dos controladores.

Tabela 3: Comparação dos erros entre o controlador de [1] e o controlador síncrono para o estudo de adição e rejeição de carga.

Modelos de Controlador	Controlador de [1]	Controlador Síncrono
Corrente i_{ds}	0.0118%	0.0020%
Corrente i_{qs}	0.1005%	0.0428%

Feitas as tabelas, fica mais fácil comparar a eficiência de um controlador em relação ao outro. É fácil perceber também que o controlador síncrono apresenta erros menores na ação de controle do que o controlador implementado em [1], confirmando que esse possui ação de controle mais eficiente que o controlador implementado em [1].

Como uma outra forma de comparar as ações de controle entre os controladores implementados e citados nesse trabalho, serão apresentados gráficos que descrevem o comportamento dos erros das correntes i_{sd} e i_{sq} .

Nas Figuras 29 e 30 são mostrados o comportamento do erro para as correntes i_{sd} e i_{sq} para o controlador implementado em [1]. Através dessas curvas é possível ver a diferença entre as correntes controladas e correntes de referência nas condições de operação do motor, que para esse caso foi para a adição e rejeição de carga.

Nas Figuras 31 e 32 são mostrados o comportamento do erro para as correntes i_{sd} e i_{sq} , agora para o controlador síncrono. Essas curvas são relacionadas aos erros de corrente no estudo de adição e rejeição de carga.

O estudo dessas curvas de erros é interessante, uma vez que, através dessas curvas é possível diagnosticar o ponto onde o erro é maior e tentar através dos ajustes dos controladores minimizar esses erros.

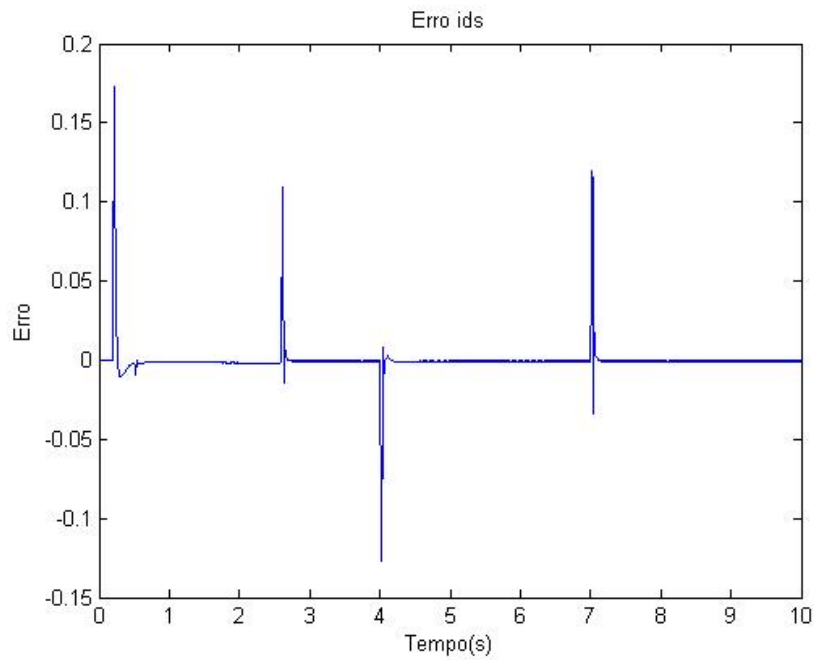


Figura 29: Erro de corrente i_{sd} do controlador [1] no estudo de adição e rejeição de carga.

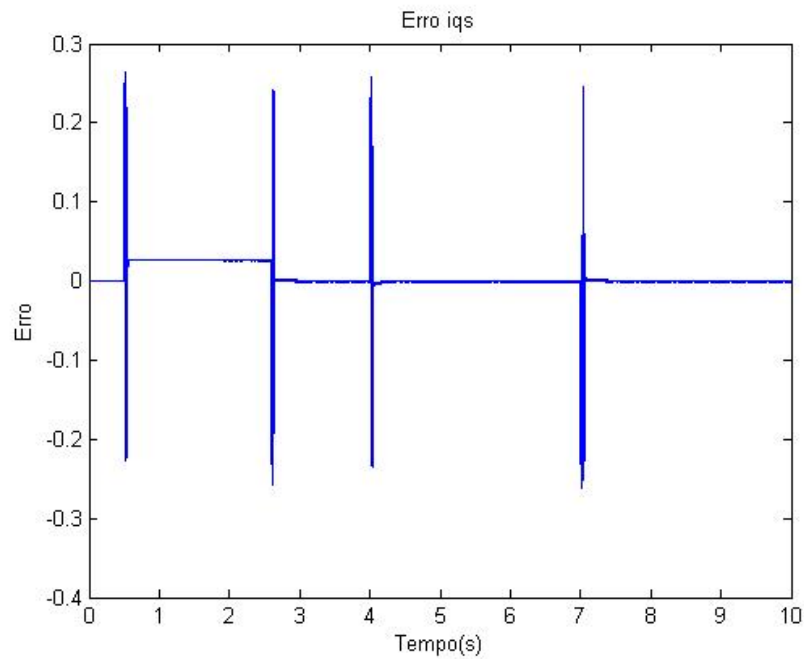


Figura 30: Erro de corrente i_{sq} do controlador [1] no estudo de adição e rejeição de carga.

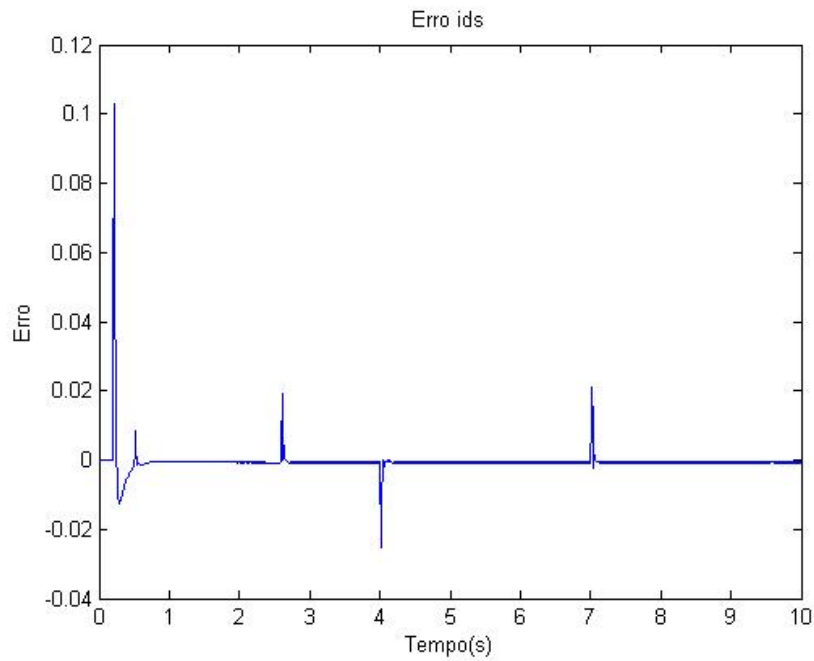


Figura 31: Erro de corrente i_{sd} do controlador síncrono no estudo de adição e rejeição de carga.

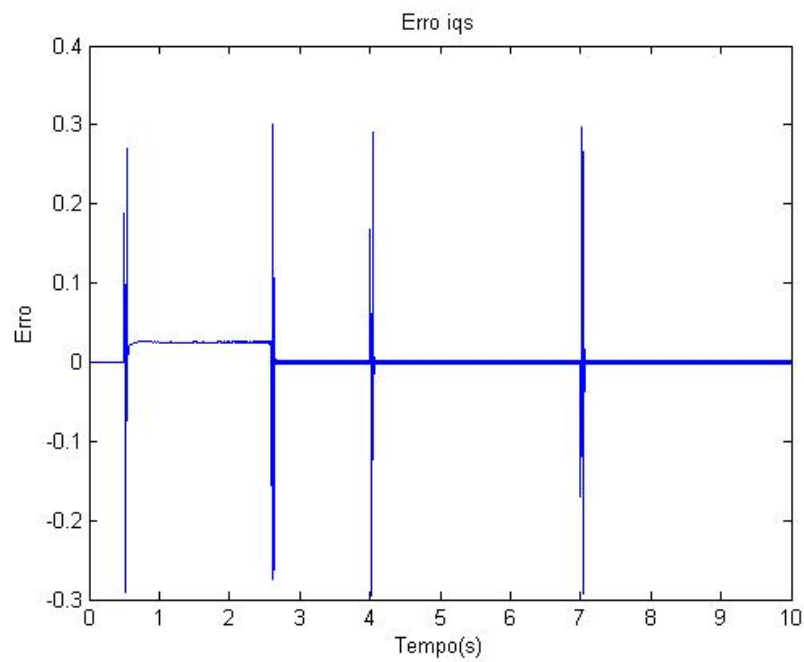


Figura 32: Erro de corrente i_{sq} do controlador síncrono no estudo de adição e rejeição de carga.

4 *Conclusões*

Partindo do modelo da máquina de indução desenvolvido e utilizado em [1], foi construído um controlador síncrono utilizando os mesmos parâmetros do controlador PI utilizados em [1].

A partir do controlador implementado, os parâmetros do mesmo ajustados, foram feitas as análises dos resultados das simulações, e através das análises dos resultados foi possível concluir que o resultado obtido com esse controlador foi satisfatório. As correntes controladas acompanharam bem as curvas de referência, e através das análises do erro médio quadrático foram obtidos resultados de erros de 0.005% para a corrente i_{sd} e 0.05% para a corrente i_{sq} . Comparando esses resultados com os resultados obtidos em [1], onde os erros obtidos através da análise de erro médio quadrático foram de 0.9% para i_{sd} e 0.8% para i_{sq} , por essa primeira análise conclui-se que o controlador síncrono teve desempenho melhor que o controlador implementado em [1].

Após essa primeira análise, foi realizado um controle de velocidade para o modelo do motor com o controlador síncrono, e com esse controle de velocidade implementado juntamente com o controle síncrono, foi observado que o resultado é satisfatório. Essa análise pode ser feita graficamente, através da análise dos gráficos gerados e também através da análise do erro médio quadrático, obtendo valores de erro de 0.005% para a corrente i_{sd} e 0.077% para a corrente i_{sq} , mostrando que o controlador síncrono teve um controle satisfatório quando feito o controle de velocidade.

Quando feito o estudo de adição e rejeição de carga tanto para o controlador implementado em [1] quanto para o controlador síncrono, obtivemos o resultado esperado, uma vez que as curvas de corrente controlada acompanham bem as curvas de referência. Graficamente não consegue-se encontrar muita diferença entre as curvas de corrente controladas. Pela análise do erro médio quadrático, obteve-se um erro de 0.0118% para i_{sd} e 0.1005% para i_{sq} , erros esses para o controlador implementado em [1]. Para o controlador síncrono, através da análise de erro médio quadrático, obteve-se erros de 0.0020% para i_{sd}

e 0.0428% para i_{sq} , mostrando que a ação de controle realizada pelo controlador síncrono foi melhor que a ação de controle realizada por [1].

Baseado nas conclusões das análises feitas das simulações das diferentes situações de operação do motor, como o motor operando com carga e sem carga, pode-se concluir que o controlador síncrono tem um desempenho melhor que o controlador implementado em [1]. Isso pode ser afirmado, pois as análises de erro médio quadrático provam que a ação de controle realizada pelo controlador síncrono é mais eficiente que o controle realizado em [1].

Referências

- [1] PEREIRA, F. R. F. *Estudo sobre as malhas de controle das correntes do motor de indução com orientação de campo*. [S.l.], 2012.
- [2] LEONHARD, W. *Control of Electrical Drives*. [S.l.]: Springer, 2001.
- [3] DEHKORDI, B. M. A new observer for speed and rotor time constant estimation of an induction machine in vector control method. 2007.
- [4] NOVOTNY, D. W.; LIPO, T. A. *Vector Control and Dynamics of AC Drives*. [S.l.]: Oxford University Press USA, 1996.
- [5] AGUIRRE, L. A. *Introdução à Identificação de Sistemas: Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas reais*. [S.l.]: Editora UFMG, 2004.
- [6] DORF, H. R. B. C. R. *Sistemas de controle modernos*. [S.l.]: Editora LTC, 1998.
- [7] TORRES, A. G. *Técnicas de Comando de Fluxo em Altas velocidades*. Dissertação (Mestrado) — Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.