

**FILIPPE ABDALLA TEIXEIRA NETO**

**GERAÇÃO DE PERFIS DE CARGAS  
INDUSTRIAIS MEDIANTE O CONTROLE  
PWM DA TENSÃO DE CAMPO DO  
GERADOR DE CORRENTE CONTÍNUA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado  
à Escola de Engenharia de São Carlos, da  
Universidade de São Paulo.

Curso de Engenharia Elétrica com ênfase  
em Eletrônica.

Orientador: Prof. Dr. Ivan Nunes da Silva

São Carlos

2010

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Tratamento  
da Informação do Serviço de Biblioteca – EESC/USP

T266g

Teixeira Neto, Filipe Abdalla

Geração de perfis de cargas industriais mediante o controle PWM da tensão de campo do gerador de corrente contínua / Filipe Abdalla Teixeira Neto ; orientador Ivan Nunes da Silva -- São Carlos, 2010.

Monografia (Graduação em Engenharia Elétrica com ênfase em Eletrônica) -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2010.

1. Máquinas CC. 2. Cargas industriais. 3. Motor de indução. 4. Controle de torque. I. Título.

“Porque *Dele* e por meio *Dele*, e para Ele, são todas as coisas. Glória, pois a *Ele* eternamente.

Amém.”

Romanos 11:36



---

## AGRADECIMENTOS

---

Agradeço ao professor Dr. Ivan Nunes da Silva pela orientação no desenvolvimento do projeto.

Ao Marcelo Suetake pelo auxílio e designação das etapas durante todo o projeto, bem como a todo o pessoal do LAIPS (Laboratório de Automação Inteligente de Processos e Sistemas).

Ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) pelo apoio financeiro.

A minha família que sempre forneceu o suporte e o apoio necessários durante todo o período de graduação.

Agradeço também aos meus colegas de classe por me apoiarem e ajudarem tanto no desenvolvimento quanto na descontração.



---

## SUMÁRIO

---

LISTA DE FIGURAS .....	iii
LISTA DE TABELAS .....	v
LISTA DE SIGLAS .....	vii
RESUMO .....	ix
<i>ABSTRACT</i> .....	xi
1. INTRODUÇÃO .....	1
1.1 Considerações Iniciais.....	1
1.2 Objetivos do Projeto .....	3
1.3 Metodologia Utilizada .....	4
1.4 Organização da Monografia.....	5
2. ESTUDO DA BANCADA EXPERIMENTAL .....	7
2.1 Introdução .....	7
2.2 Bancada Experimental.....	8
2.2.1 Quadro de Comando .....	9
2.2.2 Excitação do Enrolamento de Campo do GCC .....	10
2.2.3 Circuito de Carga na Armadura do GCC.....	12
2.2.4 Sensor Hall de Corrente e Tensão.....	12
2.2.5 <i>Enconder</i> Óptico Incremental .....	14
2.2.6 Sistema de Aquisição de Dados .....	16
3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM GCC .....	19
3.1 Introdução .....	19
3.2 Modelagem Matemática do Gerador de Corrente Contínua (GCC).....	20

4.	PRINCIPAIS TIPOS DE CARGAS ACOPLADAS AO MIT .....	25
4.1	<i>Introdução</i> .....	25
4.2	<i>Carga Constante</i> .....	25
4.3	<i>Carga Linear</i> .....	26
4.4	<i>Carga Quadrática</i> .....	27
4.5	<i>Carga Inversa</i> .....	28
4.6	<i>Cargas que não Solicitam Conjugado</i> .....	28
5.	ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE TORQUE E SIMULAÇÕES .....	31
5.1	<i>Introdução</i> .....	31
5.2	<i>Resultados de Simulações Computacionais</i> .....	31
5.2.1	Ensaio de Degrau de Referência de Carga.....	31
5.2.2	Ensaio de Rampa de Referência de Carga.....	35
5.2.3	Ensaio de Carga Constante com a Velocidade .....	38
5.2.4	Ensaio de Carga Linear com a Velocidade .....	41
5.2.5	Ensaio de Carga Quadrática com a Velocidade.....	45
5.3	<i>Acionamento Chaveado do GCC</i> .....	48
6.	CONCLUSÃO GERAL E ETAPAS FUTURAS .....	55
6.1	<i>Conclusão Geral</i> .....	55
6.2	<i>Sugestões de Trabalhos Futuros</i> .....	55
7.	PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS .....	57
7.1	<i>Introdução</i> .....	57
7.2	<i>Publicações Científicas</i> .....	57
7.2.1	Publicações em Congressos Internacionais.....	57
7.2.2	Publicações em Congressos Nacionais .....	58
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	59
	APÊNDICE: PARÂMETROS DA MCC .....	63



## LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.1 – Esquema Geral do Laboratório de Ensaios de Máquinas Elétricas.</i>	7
<i>Figura 2.2 – Visão Geral da Estrutura da Bancada de Ensaios.</i>	8
<i>Figura 2.3 – Descrição do Quadro de Comando</i>	9
<i>Figura 2.4 – Fonte de Alimentação de Campo.</i>	10
<i>Figura 2.5 – Variador de Tensão Monofásico.</i>	11
<i>Figura 2.6 – Carga Resistiva para o Enrolamento de Armadura.</i>	12
<i>Figura 2.7 – Sensores Hall de Corrente</i>	13
<i>Figura 2.8 – Sensores Hall de Tensão</i>	14
<i>Figura 2.9 – Funcionamento do Encoder Óptico Incremental.</i>	15
<i>Figura 2.10 – Encoder Óptico Incremental T8-5800.</i>	15
<i>Figura 2.11 – Placa de Aquisição de Dados NIDAQmx PCIe-6259.</i>	16
<i>Figura 2.12 – Bloco de Conexões SCB-68.</i>	17
<i>Figura 3.1 – Representação esquemática de uma MCC.</i>	20
<i>Figura 3.2 – Circuito equivalente de armadura de uma MCC.</i>	21
<i>Figura 3.3 – Diagrama de blocos do modelo do GCC para o controle de torque mediante a variação de tensão de Campo.</i>	23
<i>Figura 3.4 – Diagrama do sistema de controle da tensão de campo para a geração de perfis de cargas industriais.</i>	24
<i>Figura 4.1 – Conjugado de Carga Constante.</i>	26
<i>Figura 4.2 – Conjugado de Carga Linear.</i>	27
<i>Figura 4.3 – Conjugado de Carga Quadrática.</i>	27
<i>Figura 4.4 – Conjugado de Carga Inversa.</i>	28
<i>Figura 5.1 – Diagramas de blocos dos Simulink para o ensaio de degrau de referência de torque.</i>	32
<i>Figura 5.2 – Desempenho do controle de geração de carga frente aos degraus de referência de torque.</i>	33
<i>Figura 5.3 – Tensão de acionamento do enrolamento de campo ao longo do ensaio.</i>	33
<i>Figura 5.4 – Corrente de campo e de armadura ao longo do ensaio.</i>	34
<i>Figura 5.5 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.</i>	35
<i>Figura 5.6 – Desempenho da geração de carga frente às rampas de referência de torque.</i>	36
<i>Figura 5.7 – Desempenho Correntes de armadura e de campo ao longo do ensaio.</i>	37
<i>Figura 5.8 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.</i>	37
<i>Figura 5.9 – Diagramas de blocos do Simulink para o ensaio de carga constante com a velocidade.</i>	38

<i>Figura 5.10 – Degrau de variação de velocidade para o ensaio de torque de carga constante. ....</i>	<i>39</i>
<i>Figura 5.11 – Torque eletromagnético. ....</i>	<i>40</i>
<i>Figura 5.12 – Correntes de campo e armadura ao longo do ensaio. ....</i>	<i>41</i>
<i>Figura 5.13 – Diagramas de blocos do Simulink para o ensaio de lineares com a velocidade. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.14 – Gráfico do perfil linear de carga empregado na simulação computacional. ....</i>	<i>42</i>
<i>Figura 5.15 – Desempenho do controle de geração de carga para cargas lineares. ....</i>	<i>43</i>
<i>Figura 5.16 – Correntes de armadura e de campo ao longo do ensaio. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.17 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio. ....</i>	<i>44</i>
<i>Figura 5.18 – Perfil de carga quadrática com a velocidade. ....</i>	<i>45</i>
<i>Figura 5.19 – Desempenho do controle de geração de carga para cargas quadráticas. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.20 – Correntes de armadura e de campo. ....</i>	<i>46</i>
<i>Figura 5.21 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio. ....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 5.22 – Adição dos blocos PWM e Universal Bridge para simulação. ....</i>	<i>48</i>
<i>Figura 5.23 – Comportamento do módulo gerador do pulso PWM. ....</i>	<i>49</i>
<i>Figura 5.24 – Resposta para cargas quadráticas com acionamento chaveado. ....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 5.25 – Resposta para cargas lineares com acionamento chaveado. ....</i>	<i>51</i>
<i>Figura 5.26 – Curvas de <math>I_a</math> e <math>I_f</math> com o chavemanento. ....</i>	<i>52</i>
<i>Figura 5.27 – Curva de velocidade angular no eixo do MIT. ....</i>	<i>52</i>

---

## LISTA DE TABELAS

---

<i>Tabela 1.1 – Cronograma de Execução. ....</i>	<i>4</i>
--------------------------------------------------	----------



---

## LISTA DE SIGLAS

---

**PWM:** *Pulse Width Modulation.*

**MIT:** Motor de Indução Trifásico.

**MCC:** Máquina de Corrente Contínua.

**GCC:** Gerador de Corrente Contínua.

**FMM:** Força Magnetomotriz.

**IGBT:** *Insulated Gate Bipolar Transistor*



---

## RESUMO

---

### **Geração de Perfis de Carga mediante o Controle PWM da Tensão de Campo do Gerador de Corrente Contínua.**

A crescente necessidade de busca por processos mais racionais e econômicos no que tange à utilização eficiente da energia elétrica tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização das técnicas de manufatura, os quais visam também à adequada conservação da energia elétrica. Dentro deste contexto, os motores elétricos tornaram-se elementos indispensáveis na maioria dos processos que envolvem os setores produtivos, pois o mesmo se destaca como o principal elemento de conversão de energia elétrica em mecânica motriz. Como consequência, essas máquinas elétricas e seus acionamentos passaram, e tendem a continuar passando, por melhorias que atendem as necessidades emergentes dos processos produtivos por sua importância energética dentro do cenário nacional.

Neste trabalho é proposto um sistema que permite simular os perfis de cargas industriais acoplados em motores de indução trifásicos. A principal finalidade de aplicação reside no aprimoramento de uma bancada que permita realizar ensaios experimentais preliminares antes de inserir o motor de indução em estudo no processo industrial. Para tanto, um gerador de corrente contínua é acoplado ao eixo do motor de indução, cuja carga imposta é gerada mediante o controle PWM da tensão do enrolamento de campo do gerador. Simulações computacionais são apresentadas com o intuito de analisar e validar o desempenho do sistema proposto.

Palavras-chave: Máquinas CC, Cargas Industriais, Motor de Indução, Controle de Torque.





---

## ABSTRACT

---

### ***Industry Load Profile Generation through Voltage PWM Control of DC Current Machine***

*Electric motors are widely applied in several fields of industrial sectors which consist of the indispensable elements for the conversion of electric to electromechanical energy. Electric motors therefore fulfill an important role of driving a diversity of loads presented in industrial processes.*

*Knowing the features of the loads imposed to the electric motor rotor shaft is very important for proper motor dimensioning and for performance analysis of control algorithms. The main focus of this work is therefore to build an experimental test bench that aims at simulating, experimentally, the most common loads found in industrial fields, such as linear, quadratic, inverse and constant loads.*

*Consequently, it makes possible to analyze control algorithms performance, dimensioning motors drive suitable for specific application and acquiring data to be used for related works such as load torque estimation. Furthermore, such tasks can be carried out through an experimental test bench before inserting the studied machine in the industrial fields, which allows better project design for a specific application and reduces the experimental tests needed to adjust particular parameters. These features are advantageous since the motor and its drive dimensioning becomes faster and less costly.*

*The proposed experimental test bench is composed of a Direct Current (DC) generator connected to a Three-phase Induction Motor (TIM) rotor shaft through a torque meter. The industrial load torque profile is generated by controlling the field winding voltage of DC generator with PWM techniques.*

**Keywords:** *DC Machines, Industrial Loads, Induction Motors, Torque Control.*



---

# 1. INTRODUÇÃO

---

## 1.1 Considerações Iniciais

---

A crescente necessidade de busca por processos mais racionais e econômicos no que tange à utilização eficiente da energia elétrica tem implicado na realização de estudos detalhados para a otimização das técnicas de manufatura, os quais visam também à adequada conservação da energia elétrica. Dentro deste contexto, os motores elétricos tornaram-se elementos indispensáveis na maioria dos processos que envolvem os setores produtivos, pois o mesmo se destaca como o principal elemento de conversão de energia elétrica em mecânica motriz. Como consequência, essas máquinas elétricas e seus acionamentos passaram, e tendem a continuar passando, por melhorias que atendem as necessidades emergentes dos processos produtivos por sua importância energética dentro do cenário nacional. Em um levantamento realizado pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), cerca de 40% da energia elétrica produzida no Brasil é destinada ao setor industrial e a projeção de demanda para os próximos anos é de considerável crescimento neste setor (EPE, 2009; EPE, 2008).

Conforme a avaliação realizada pelo Coppe (Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia), no Programa de Planejamento Energético, ganhos em conservação de eletricidade podem ser atingidos com a substituição de motores mal dimensionados. Uma amostra de motores usados no país mostrou que apenas um terço deles trabalha na faixa ideal, acima de 75% de sua carga nominal. A substituição de motores antigos por outros de alto rendimento, com potência adequada à carga acionada, prevista na Lei de Eficiência Energética, trará uma economia estimada de 1,1% da energia usada por tais motores (COPPE, 2008).

Os Motores de Indução Trifásicos (MIT) são amplamente utilizados em diversos setores da indústria. Tal destaque foi alcançado em virtude de sua robustez, simplicidade e baixo custo.

Verifica-se que em setores industriais há uma grande diversidade de tipos de carga imposta ao eixo de máquinas de indução trifásica. Estas são de extrema relevância, tanto para a análise de desempenho e dimensionamento, quanto para inúmeras aplicações e projetos desenvolvidos (Silva et al., 2008; Minotti et al., 2007; Goedel et al., 2007a). Como exemplo, são propostas em

Goedtel et al. (2006a) e Goedtel et al. (2007b) metodologias para estimar o conjugado nos eixos dos motores de indução por meio de redes neurais artificiais.

Considerando-se a importância do dimensionamento adequado dos motores industriais, a proposta deste trabalho se baseia na utilização de uma Máquina de Corrente Contínua (MCC) atuando como gerador, cujo eixo é acoplado ao MIT por meio de um torquímetro girante, com o objetivo de compor uma bancada de ensaios experimentais que visa desenvolver perfis de cargas industriais.

A MCC foi uma das primeiras máquinas utilizadas em meios industriais, sendo considerada bastante versátil em virtude de sua facilidade de controle (Hubert, 1991). Desta forma, emprega-se neste trabalho a MCC operando como um Gerador de Corrente Contínua (GCC) com o intuito de proporcionar um torque resistente e controlado ao eixo do MIT mediante a variação de tensão do enrolamento de campo (Goedtel et al., 2006b). Assim, é possível atribuir ao eixo do MIT conjugados de cargas do tipo constante, linear, quadrática ou inversa, os quais são mais comumente encontrados em aplicações industriais. A eficácia do uso de controle do torque no tratamento de um motor de indução é apresentada em trabalhos recentes (Nied et al., 2008).

Com a simulação de cargas industriais em um ambiente de teste, torna-se possível o dimensionamento de um MIT, antes de inseri-lo diretamente no processo para o qual foi designado. Além dos ganhos no uso da energia de modo mais eficaz, evita-se assim a utilização de torquímetros girantes que são caros e cuja instalação necessita o deslocamento físico longitudinal entre o motor e a máquina. Outro aspecto relevante é que os torquímetros girantes devem ser alinhados cuidadosamente ao eixo do motor para que não sofram flexões, as quais podem comprometer a sua vida útil. Assim sendo, a instalação deste sistema torna-se normalmente moroso e caro (Brito, 1994).

## 1.2 Objetivos do Projeto

---

O presente projeto de pesquisa possui como objetivo principal o desenvolvimento de um sistema que possibilite a simulação de diversos perfis de cargas industriais a partir de uma máquina de corrente contínua devidamente controlada. Simulação esta, sem a utilização de torquímetros, os quais, como dito na seção anterior, acarretam uma série de complicações no que tange a funcionalidade e praticidade do dimensionamento dos motores de indução trifásicos.

Para que o objetivo principal seja alcançado, inicialmente se fez necessário o estudo da bancada de ensaios experimentais e a verificação das principais características dos componentes envolvidos na mesma. Em seguida, realizou-se um estudo detalhado da modelagem matemática de uma MCC atuando como gerador (Gerador de Corrente Contínua - GCC). Um estudo dos principais tipos de cargas acopladas a um motor de indução também foi efetuado, devido à necessidade dessas informações nas etapas do projeto.

Simulações computacionais são também apresentadas, as quais objetivam validar o modelo de geração de perfis de carga proposto, demonstrando a reposta do sistema para os diversos tipos de cargas que podem ser comumente encontradas acopladas ao eixo de um Motor de Indução Trifásico.

Assim sendo, o resultado final esperado pelo desenvolvimento deste projeto de pesquisa consiste na produção de conhecimento científico e tecnológico, os quais serão moldados pelo desenvolvimento de métodos, técnicas e ferramentas que permitem representar, analisar, projetar e implementar soluções automatizadas que visam otimizar o processo relacionado com o dimensionamento de motores elétricos e seus métodos de controle.

Complementarmente, objetiva-se ainda uma maior integração no cenário da pesquisa científica, permitindo o contato com tecnologias recentes de automação de processos industriais e contribuindo nos seguintes aspectos da formação:

- Agregação de conhecimento para sua formação no curso de Engenharia Elétrica/Eletrônica.
- Introdução nas fases envolvidas com a metodologia científica.
- Participação e divulgação dos resultados da pesquisa em eventos científicos.

### 1.3 Metodologia Utilizada

---

A metodologia que foi utilizada para a execução do projeto é composta de três módulos que comportaram toda a estrutura desenvolvida. Estes módulos são especificados a seguir.

#### **Módulo 1 :: Estudo da Bancada Experimental e aos Aspectos Relativos à Mesma**

O objetivo deste módulo é o estudo detalhado da bancada experimental e dos principais componentes da estrutura do laboratório, os quais estão envolvidos no processo de aquisição de dados experimentais e que serão utilizados para o estudo e modelagem do sistema de simulação de cargas industriais, além de contribuir para o desenvolvimento de trabalhos paralelos desenvolvidos pelos integrantes do grupo de pesquisa.

#### **Módulo 2 :: Modelagem Matemática de um GCC e Estudo dos Principais Tipos de Cargas Acopladas ao MIT**

A finalidade deste módulo é o desenvolvimento do modelo matemático de uma máquina de corrente contínua atuando como gerador e também o estudo dos principais tipos de cargas que na prática são acopladas a um motor de indução. Esses estudos são essenciais para o desenvolvimento do projeto apresentado.

#### **Módulo 3 :: Estratégia de Controle do Torque da MCC**

Neste módulo, uma possibilidade de controle do torque de uma MCC foi estudada, e por meio de modelos, simulada e aprimorada (via Simulink®), com a finalidade de definir o sistema mais adequado para implementação em bancada.

A Tabela 1.1, mostrada a seguir, resume o cronograma das etapas que foram apresentadas com os devidos prazos de realização.

**Tabela 1.1 – Cronograma de Execução.**

	1º Semestre		2º Semestre	
	1º Trimestre	2º Trimestre	1º Trimestre	2º Trimestre
<b>Módulo 1</b>				
<b>Módulo 2</b>				
<b>Módulo 3</b>				

## 1.4 Organização da Monografia

---

A organização desta monografia de Trabalho de Conclusão de Curso está dividida em sete capítulos como descrito brevemente a seguir:

No **Capítulo 2** apresentam-se os aspectos relativos à bancada experimental, os principais componentes envolvidos e a estrutura geral do laboratório que foram estudados.

No **Capítulo 3** descrevem-se os aspectos referentes à modelagem matemática de uma máquina de corrente contínua com excitação independente, atuando como GCC.

No **Capítulo 4** apresentam-se os aspectos referentes aos tipos de cargas comumente acopladas ao MIT, bem como as principais aplicações de cada carga.

No **Capítulo 5** é descrita uma estratégia de controle de torque e são apresentadas simulações para mostrar a validade desse controle, utilizando a modelagem do sistema apresentada também neste trabalho.

No **Capítulo 6** as conclusões gerais e etapas futuras das atividades de pesquisa são abordadas.

No **Capítulo 7** são apresentadas as principais publicações em congressos, as quais mostram resultados advindos do desenvolvimento do presente projeto.





## 2. ESTUDO DA BANCADA EXPERIMENTAL

### 2.1 Introdução

Nesta seção será dada a descrição dos principais componentes da estrutura do laboratório envolvidos no processo de aquisição de dados experimentais. Esses componentes têm sido aplicados no estudo e modelagem do sistema de geração de perfis de carga, além de contribuir para o desenvolvimento de trabalhos paralelos desenvolvidos pelos integrantes do grupo de pesquisa.

A Figura 2.1 ilustra de maneira genérica a forma em que o laboratório de ensaios de máquinas elétricas está estruturado.

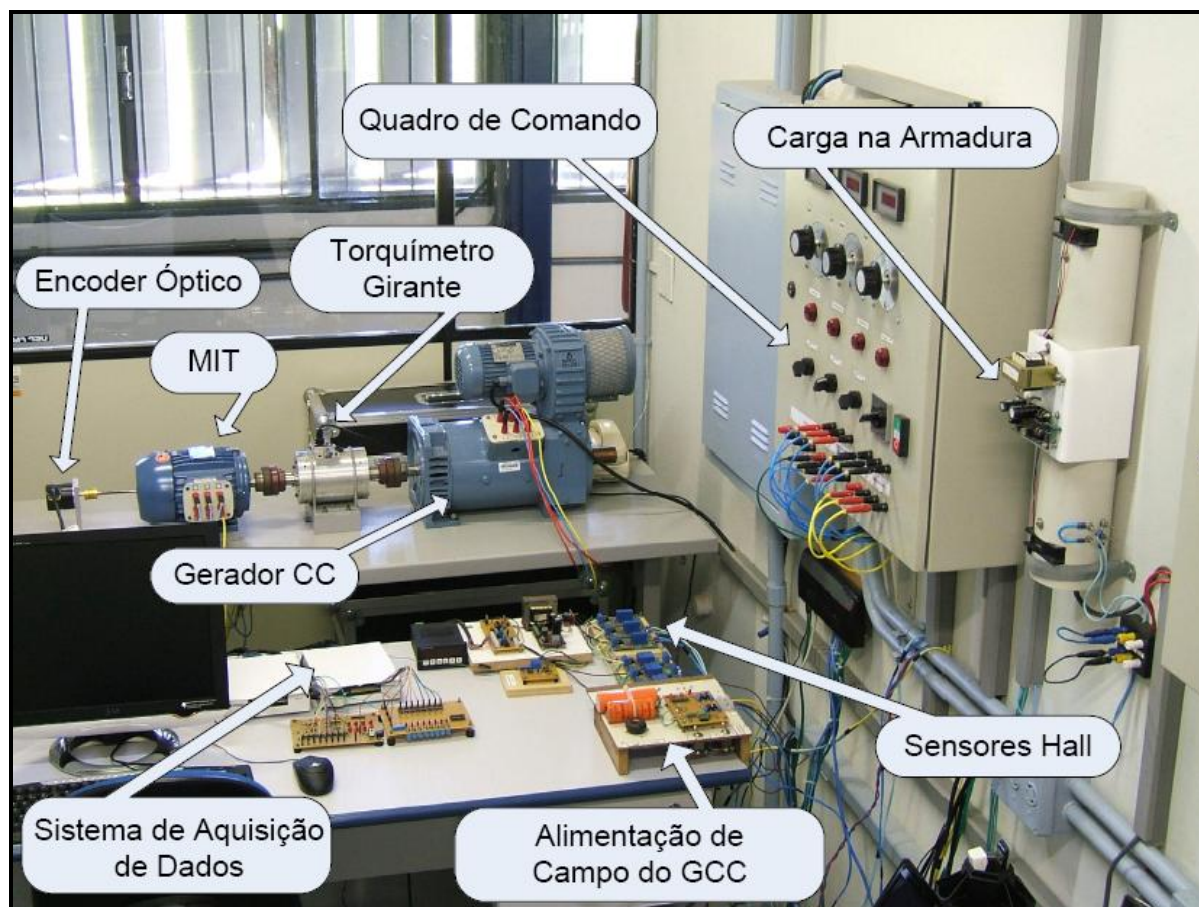


Figura 2.1 – Esquema Geral do Laboratório de Ensaios de Máquinas Elétricas.

A estrutura do laboratório de pesquisa consiste de uma bancada de ensaios, na qual se situa a máquina de indução trifásica, a máquina de corrente contínua, *encoder* e torquímetro; um quadro de comando no qual podem ser realizados o ajuste da tensão aplicada no motor e a maneira em que a mesma é alimentada; um circuito de alimentação da bobina de campo do gerador de corrente contínua, cuja carga é conectada à bobina de armadura; os circuitos aplicados para o condicionamento dos sinais dos sensores para a placa de aquisição de dados localizada no computador.

Nas seções seguintes serão discutidos com mais detalhes os principais itens do laboratório de pesquisa que foram estudados. Deve-se também registrar que as seções deste capítulo foram inspiradas a partir dos trabalhos de Goedtel (2007) e Suetake (2008).

## 2.2 Bancada Experimental

A bancada de ensaios é composta basicamente pela máquina de corrente contínua, motor de indução, torquímetro e *encoder*. A máquina de corrente contínua é utilizada como gerador, cujo eixo é acoplado ao MIT do tipo Gaiola de Esquilo por meio de um torquímetro girante. O gerador de corrente contínua (GCC) objetiva simular uma determinada carga acoplada ao eixo do MIT, pois o torque resistente imposto pelo gerador pode ser controlado conforme a sua carga acoplada no enrolamento de armadura ou mediante a variação de tensão do enrolamento de campo (Goedtel, 2007). Desta forma, é possível atribuir um torque resistente no eixo do MIT de forma a produzir conjugados de cargas do tipo constante, linear, quadrática ou inversa, as quais são mais comumente encontradas em aplicações industriais.

A Figura 2.2 ilustra a foto da bancada de ensaios.

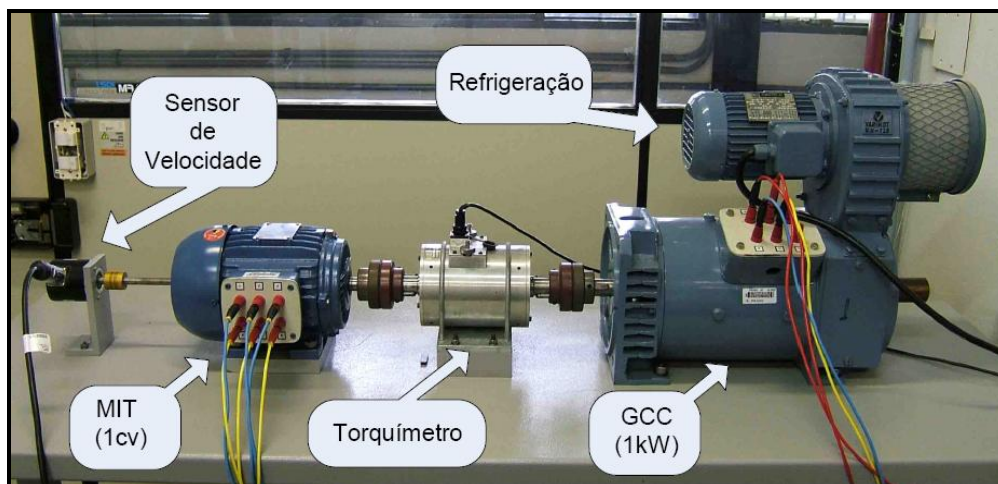


Figura 2.2 – Visão Geral da Estrutura da Bancada de Ensaios.

O bloco de refrigeração é composto por um motor de indução trifásico de 1/3 de cv, no qual está acoplado um ventilador. A entrada de ar é filtrada por meio de fibra sintética. Este dispositivo tem por finalidade o arrefecimento do calor gerado na MCC. O seu acionamento é obtido de forma independente com uma chave no painel de comando, tendo como inconveniente o ruído gerado em ensaios de longo prazo.

### 2.2.1 Quadro de Comando

O quadro de comando é responsável pelo controle de modo que a máquina de indução possa ser acionada. A Figura 2.3 ilustra os principais componentes do quadro de comando, o qual constitui de chave geral, displays de informações, variadores de tensão, luzes de sinalizações, chaves seletoras, saídas trifásicas, conexões com o inversor e conexões com o motor de indução e chaves seletoras entre as conexões estrela-triângulo.

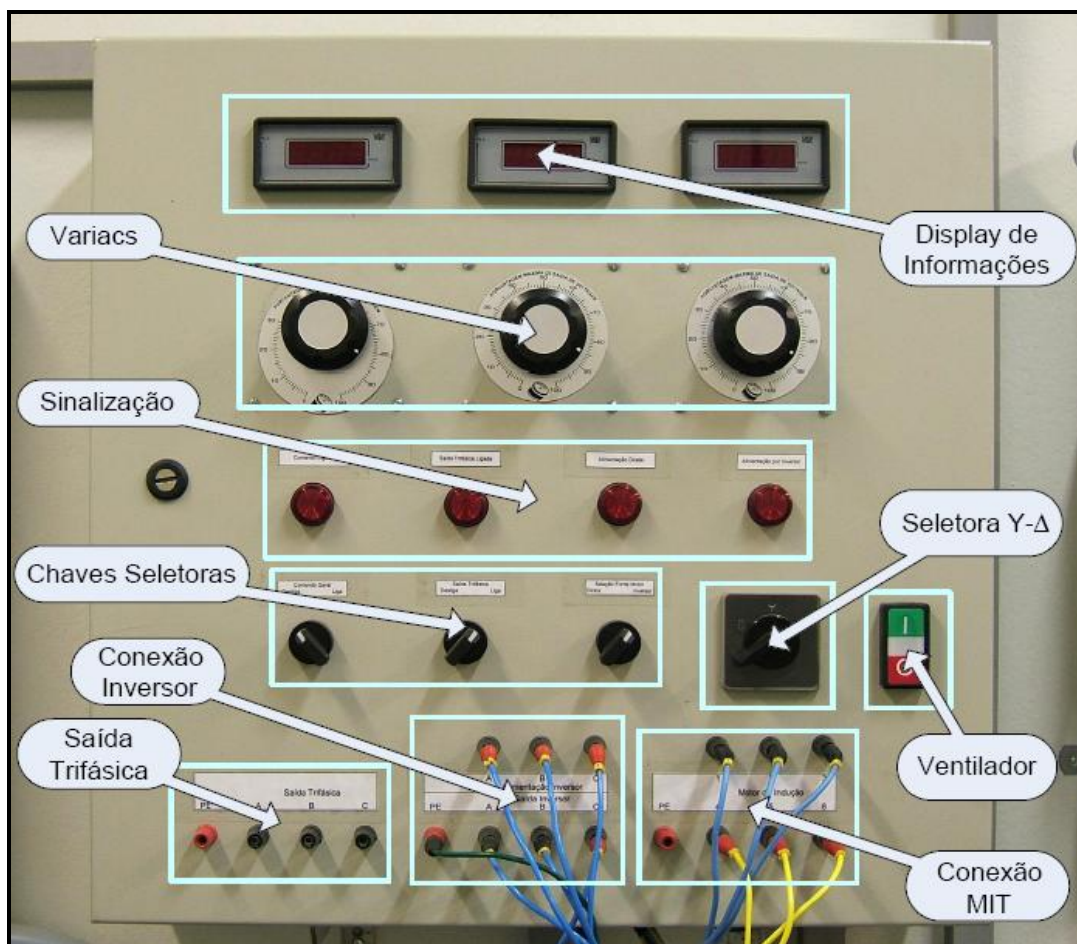


Figura 2.3 – Descrição do Quadro de Comando

Nos *displays* de informações serão apresentados os valores da tensão de cada fase que são ajustadas pelos variadores de tensão localizados logo abaixo.



As chaves seletoras fornecem opções de ligar/desligar o comando geral, se a saída trifásica é ativada ou não, e se a fonte de alimentação do motor de indução será efetuada diretamente das fases ou pelo inversor de frequência.

As luzes de sinalização indicam ao operador as opções descritas pela chave seletora e se o quadro de comando está energizado ou não. Estas sinalizações são importantes para alertar o operador para que não efetue conexões equivocadas ou até mesmo evitar acidentes de trabalho.

A característica atraente do quadro de comando reside no fato de que, caso o operador decida mudar o modo de operação da máquina de indução, não há a necessidade de rearranjar todas as conexões. Por exemplo, a mudança de conexões de acionamento da máquina de indução de estrela para triângulo é realizada por meio de uma simples mudança na chave seletora, pois essas conexões são feitas internamente ao quadro de comando.

### 2.2.2 Excitação do Enrolamento de Campo do GCC

A fonte de corrente contínua empregada para alimentar o enrolamento de campo consiste de uma estrutura composta por quatro diodos (6 A – 600 V), dois capacitores de 350  $\mu\text{F}$  x 400V e 250  $\mu\text{F}$  x 450V, e um filtro  $\pi$  formado por um indutor enrolado em um núcleo toroidal (Goedtel, 2007), conforme ilustrada na Figura 2.4.

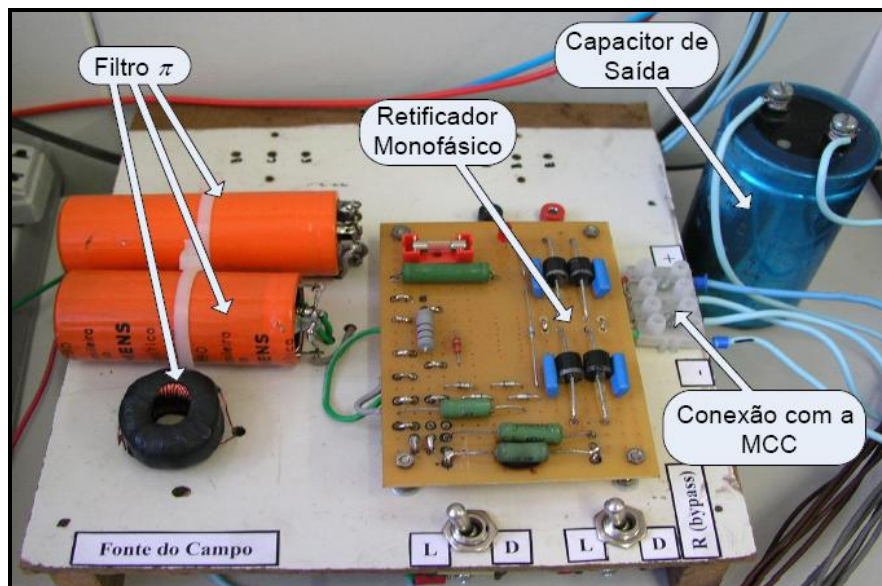
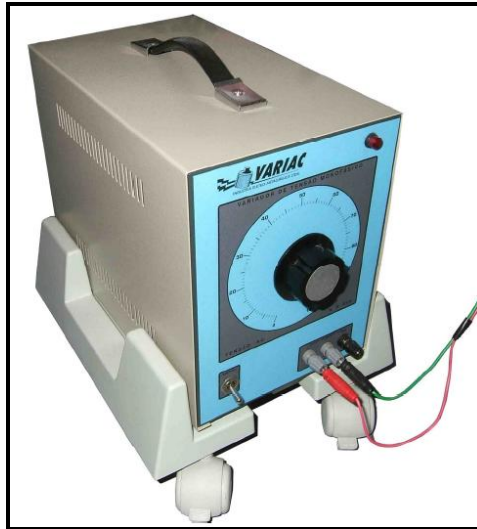


Figura 2.4 – Fonte de Alimentação de Campo.

Um filtro capacitivo no valor de 400  $\mu\text{F}$  x 200 V foi inserido na saída da ponte retificadora com o intuito de reduzir o *ripple* de tensão a um valor adequado para a alimentação do enrolamento de campo da máquina.

O valor da tensão de saída pode ser regulado por meio de um variador de tensão monofásico conectado na entrada da ponte retificadora. O variador de tensão, ilustrado na Figura 2.5, quando alimentado por tensões alternadas de 220 Vrms, pode ser ajustado para produzir uma faixa de tensão de até 240 Vrms. A potência do equipamento é de 1800 W, sendo suficiente para realização de diversos tipos de ensaios experimentais de trabalhos desenvolvidos no grupo de pesquisa.



**Figura 2.5 – Variador de Tensão Monofásico.**

O variador de tensão monofásico desempenha um papel relevante para efetuar a variação da tensão de alimentação do enrolamento de campo, e conseqüentemente, proporcionar a variação do torque eletromagnético desenvolvida pelo GCC que será imposta ao eixo do MIT.

### 2.2.3 Circuito de Carga na Armadura do GCC

A carga conectada no enrolamento de armadura do GCC é composta por uma resistência de chuveiro alocada no interior de um tubo de PVC, conforme ilustrada na Figura 2.6.

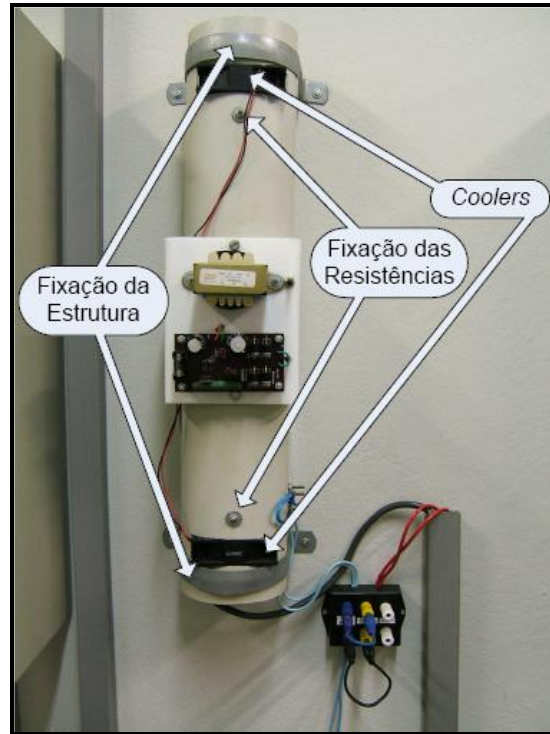


Figura 2.6 – Carga Resistiva para o Enrolamento de Armadura.

### 2.2.4 Sensor Hall de Corrente e Tensão

O sensor Hall é um transdutor que se baseia na variação da sua tensão de saída em resposta às mudanças na densidade de fluxo magnético. Estes são comumente aplicados em sistemas de posicionamento, detecção de velocidade, medição de tensão e corrente elétrica. A capacidade de medir corrente contínua ou alternada com grande precisão a uma ampla largura de banda é a atraente característica na sua aplicação.

- **Sensor Hall de Corrente**

O sensor Hall de corrente utilizado na bancada de experimentos (Goedtel, 2007) é o LAH-25 NP do fabricante LEM. A corrente nominal deste dispositivo é de 25A. O condicionamento de sinal é realizado utilizando-se o amplificador operacional TL081 com ajuste de offset.

Durante o processo de desenvolvimento da placa, foram realizados a calibragem e o ajuste fino do desvio do dispositivo, e após a montagem completa com todos os elementos soldados, efetuaram-se testes para a determinação da precisão dos sensores. Como não há controle de ganho na saída dos sensores, não há controle sobre o erro de cada sensor. Entretanto, a

correção é realizada via software, a qual é uma técnica muito utilizada em equipamentos industriais e que apresenta um baixo custo de condicionamento de sinal.

A Figura 2.7 representa um esquema ilustrativo dos sensores Hall de corrente presente no laboratório.

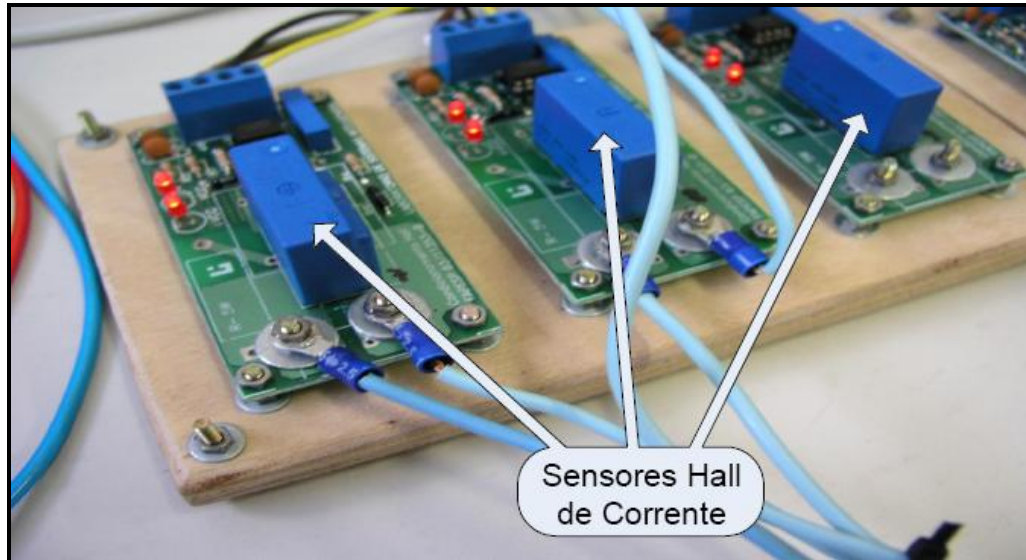


Figura 2.7 – Sensores Hall de Corrente

- **Sensor Hall de Tensão**

O sensor Hall de tensão utilizado é o LV-20P do fabricante LEM. Assim como descrito no sensor Hall de corrente, utilizou-se uma placa responsável pelo condicionamento de sinal dos sensores Hall. A mesma placa é adaptada para receber os sinais dos sensores Hall tanto de corrente quanto de tensão, já que, desta forma, o custo de fabricação dos sensores seria reduzido. Esta metodologia é aplicada na indústria eletro-eletrônica com bastante frequência.

Embora os dois sensores sejam diferentes, o seu princípio de funcionamento é semelhante. Em virtude disso, os mesmos ensaios realizados com o sensor Hall de corrente foram realizados com o sensor Hall de tensão com o intuito de se determinar a precisão e a confiabilidade do equipamento.

A Figura 2.8 representa um esquema ilustrativo dos sensores Hall de tensão presente no laboratório de pesquisa.

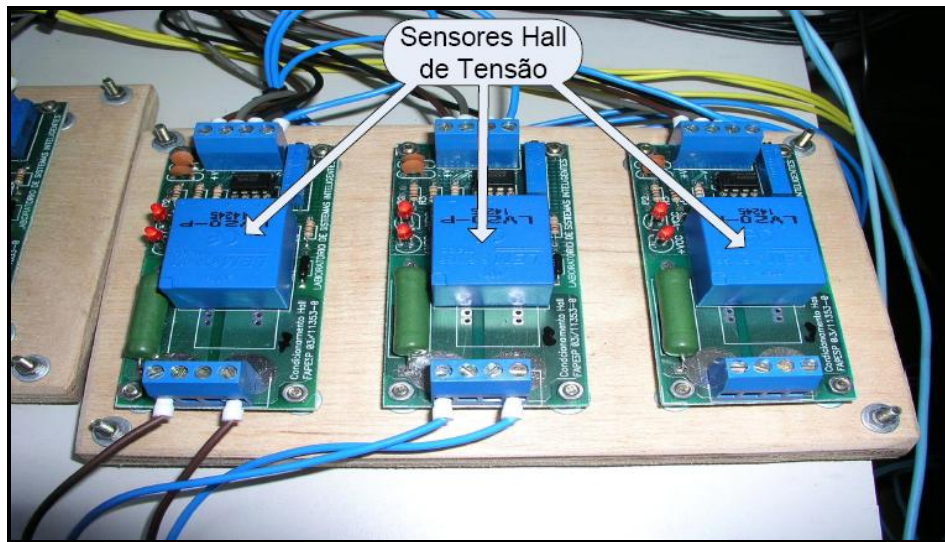


Figura 2.8 – Sensores Hall de Tensão.

### 2.2.5 Encoder Óptico Incremental

Os *encoders* ópticos são dispositivos eletromecânicos que convertem o movimento ou posição angular em uma série de pulsos gerados por meio de feixes de luzes que atravessam o encoder para iluminar fotossensores individuais. Basicamente, existem dois tipos de configurações: *encoders* ópticos lineares e *encoders* ópticos rotativos, sendo este último o mais usualmente aplicado na prática.

Dentre os *encoders* ópticos rotativos, podem ser encontrados dois tipos: o absoluto e o incremental. No primeiro, uma palavra ou seqüência de bits corresponde univocamente a uma posição do eixo em relação a uma determinada referência. Já no segundo, é produzida uma seqüência de pulsos cuja frequência varia de forma proporcional à velocidade de rotação do eixo, motivo pelo qual este é o tipo aplicado neste trabalho, uma vez que há a necessidade de se medir a velocidade no eixo do motor de indução trifásico.

A Figura 2.9 representa o diagrama esquemático do funcionamento do encoder óptico incremental. Observa-se que os pulsos gerados pelo canal A são 90 graus defasado em relação ao canal B, cujo propósito consiste na determinação do sentido de rotação do eixo, a qual é realizada mediante a detecção de bordas de transição de níveis. O sentido de rotação será direto caso os pulsos do canal A passam do nível baixo para o nível alto antes que os pulsos do canal B. Caso contrário, determina-se que o sentido de rotação é inverso. O último canal representado pela letra Z sinaliza a indicação de uma volta completa. Este sinal é utilizado principalmente em medições de posição angular.



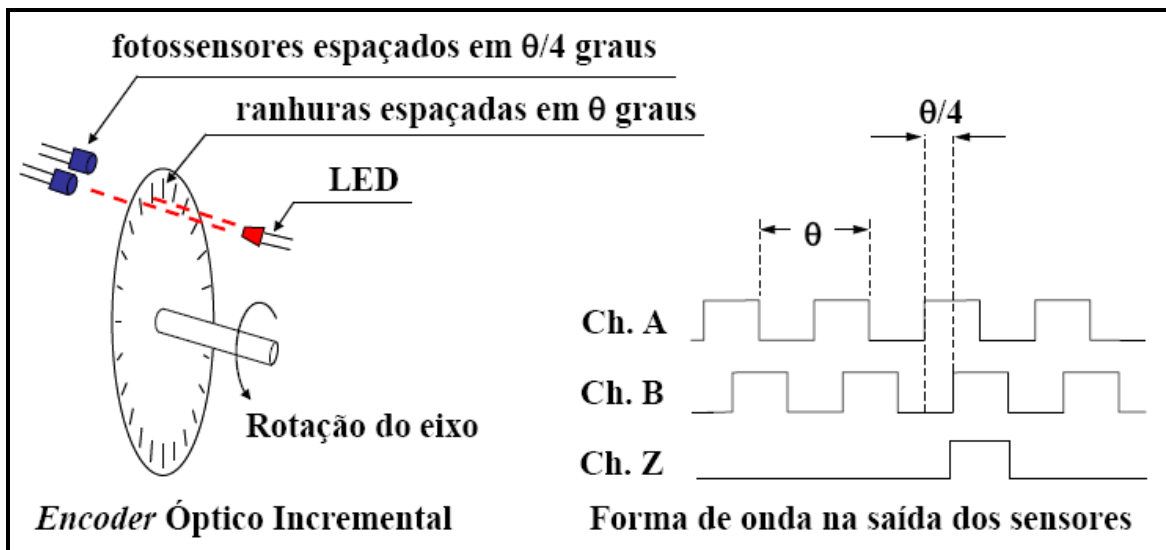


Figura 2.9 – Funcionamento do *Encoder Óptico Incremental*.

Figura 2.10 ilustra a foto do *encoder* óptico incremental do laboratório de pesquisa.

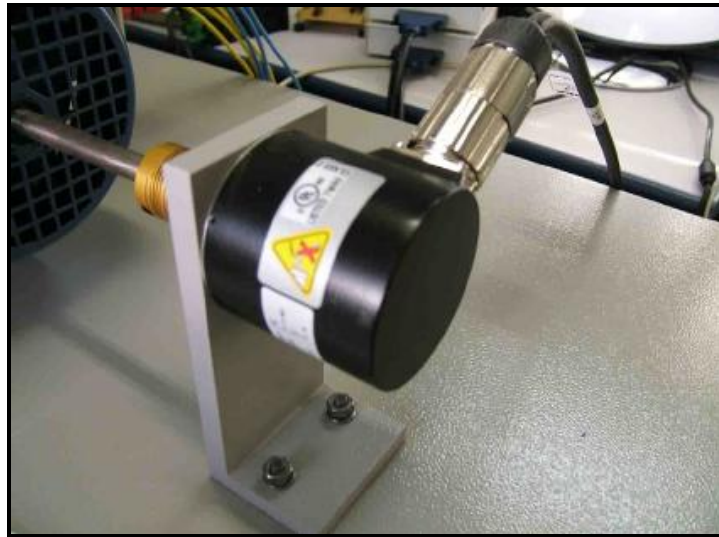


Figura 2.10 – *Encoder Óptico Incremental T8-5800*.

O modelo do *encoder* óptico utilizado neste trabalho consiste no T8-5800, cujas principais características consistem na tolerância a grandes esforços axiais e radiais, o que propicia uma maior vida útil do dispositivo; e a saída do tipo *push-pull*, o que aumenta a imunidade ao ruído. O *encoder* utilizado desenvolve 2000 pulsos por rotação com saída A.A', B.B', Z.Z'.

Como exemplo, seja uma máquina de indução trifásica de 4 pólos com rotação síncrona de 1800 rpm, o que equivale a 30 rotações por segundo. Isso produziria 60.000 pulsos por segundo (60 kHz) em um *encoder* de 2000 pulsos por rotação.

### 2.2.6 Sistema de Aquisição de Dados

O sistema de aquisição de dados é de suma importância para efetuar análises e validação dos ensaios experimentais. O laboratório de pesquisa é equipado por uma placa de aquisição de dados da *National Instruments* do modelo NIDAQmx PCIe-6259 que dispõe de uma quantidade de canais analógicos suficientes para aferir diversos sinais.

As principais características da placa de aquisição de dados NIDAQmx PCIe-6269 consistem na presença de 32 canais analógicos de entrada de 16 bits com taxa de aquisição de 1,25 mega-amostras por segundo; 4 canais analógicos de saída de 16 bits com taxa de 2,8 mega-amostras por segundo, e 48 canais de I/O digitais com capacidade de operar na frequência de clock de até 10 MHz.

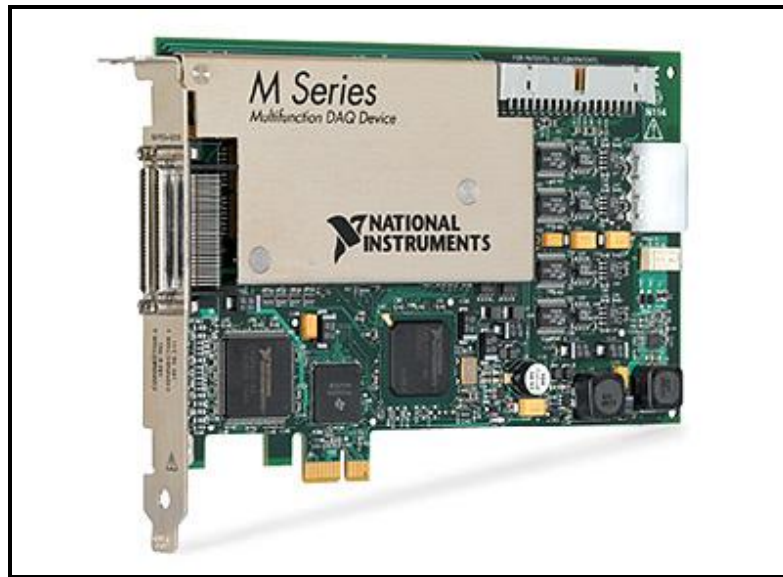


Figura 2.11 – Placa de Aquisição de Dados NIDAQmx PCIe-6259.

A placa NIDAQmx PCIe-6259 é conectada no barramento PCI-Express do computador. Desta forma, as interconexões com os dispositivos externos são realizadas por um bloco conector SCB-68 ilustrado pela Figura 2.12. Em tal bloco, além da interface de conexões relativas a todas as portas analógicas e digitais, permite-se a implementação de filtros de sinais em hardware.

Os sinais simultaneamente adquiridos pela placa de aquisição de dados consistem basicamente nas tensões e correntes das três fases do motor de indução antes do inversor trifásico, tensões e correntes de campo e armadura do gerador de corrente contínua, torque de carga mensurada pelo torquímetro, e finalmente a velocidade angular aferida pelo *encoder* óptico incremental.



**Figura 2.12 – Bloco de Conexões SCB-68.**



---

## 3. MODELAGEM MATEMÁTICA DE UM GCC

---

### 3.1 Introdução

---

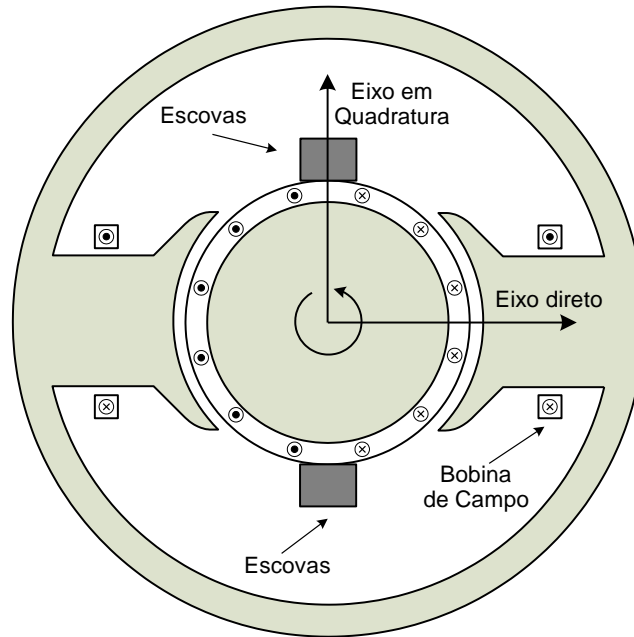
As Máquinas de Corrente Contínua (MCC) foram muito populares em diversas aplicações industriais ao longo do passado por apresentarem uma grande versatilidade. Tipicamente, as MCC são caracterizadas pelo desenvolvimento de um torque nominal em todas as velocidades, desde o rotor bloqueado até a velocidade nominal (Hubert, 1991). Em virtude de sua facilidade de controle, as mesmas são freqüentemente utilizadas em aplicações que exigem uma ampla faixa de velocidade ou controle preciso (Fitzgerald et al., 2006).

Embora o avanço da eletrônica de potência aplicada em dispositivos de acionamento de máquinas de corrente alternada venha substituindo as máquinas de corrente contínua, a sua versatilidade combinada com a relativa simplicidade dos seus sistemas de acionamento assegura o seu uso continuado em uma ampla variedade de aplicações (Fitzgerald et al., 2006).

Tipicamente, uma máquina de corrente contínua é composta por dois tipos de enrolamento: o enrolamento de campo e o enrolamento de armadura. O enrolamento de campo é alimentado por fontes de tensão contínua, sendo responsável pela geração de fluxo eletromagnético que atravessa o enrolamento de armadura acoplado no rotor. No caso em que a máquina opera como motor, o enrolamento de armadura também é alimentado por tensão contínua gerando um fluxo eletromagnético. Este procura se alinhar com o fluxo produzido pelo enrolamento de campo, desenvolvendo-se então o torque eletromagnético e o giro do rotor. Por outro lado, quando a máquina opera como gerador, o movimento do rotor devido a uma fonte de energia mecânica fará com que circule uma corrente no sentido de anular o fluxo produzido pelo enrolamento de campo, desenvolvendo-se assim uma força contra-eletromotriz no enrolamento de armadura.

O diagrama esquemático denotado pela Figura 3.1 descreve a representação de uma máquina de corrente contínua. O estator apresenta pólos salientes excitados por bobinas de campo gerando uma distribuição simétrica no entreferro com relação ao eixo direto. A tensão alternada gerada no enrolamento de armadura é retificada e convertida em tensão contínua por

meio de comutadores mecânicos e de escovas situadas em sua extremidade, na qual se conecta a carga.



**Figura 3.1 – Representação esquemática de uma MCC.**

O posicionamento das escovas é realizado de tal forma para que a comutação ocorra no momento em que os lados da bobina em comutação estejam na zona neutra, ou seja, a meio caminho entre os pólos de campo. Conseqüentemente, o eixo da onda de FMM de armadura estará em quadratura com o eixo dos pólos de campo (na direção das escovas), conforme ilustrado na Figura 3.1 (Fitzgerald et al., 2006).

As MCCs podem ser projetadas mediante diversas combinações de enrolamentos (série, derivação e excitação independente) de forma que haja uma ampla variedade de característica tensão-corrente ou velocidade-conjugado para uma operação dinâmica e em regime permanente (Fitzgerald et al., 2006).

### 3.2 Modelagem Matemática do Gerador de Corrente Contínua (GCC)

O circuito equivalente de um gerador de corrente contínua se constitui de uma tensão  $e$  induzida, um enrolamento de armadura de resistência  $R_A$  e indutância  $L_A$ , e uma resistência de carga  $R_L$ , conforme ilustrado pelo circuito da Figura 3.2. Considerando que o enrolamento de campo esteja acionado, uma determinada velocidade mecânica  $\omega_m$  desenvolve uma tensão

induzida no circuito de armadura e, conseqüentemente, a corrente de armadura. Em oposição ao movimento, é gerado um torque eletromagnético no eixo do gerador de corrente contínua.

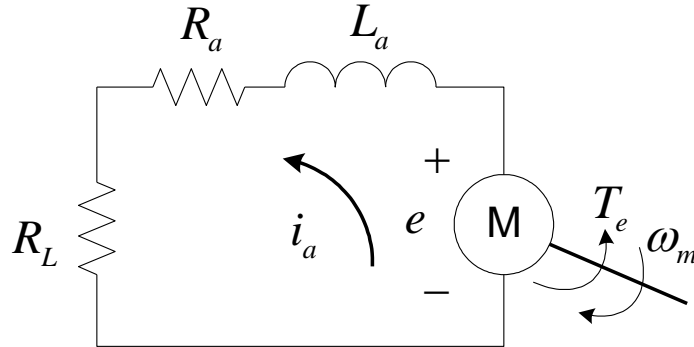


Figura 3.2 – Circuito equivalente de armadura de uma MCC.

Considerando-se o circuito equivalente de armadura ilustrado na Figura 3.2, a relação terminal para uma máquina de corrente contínua atuando como gerador, cuja energia de entrada é mecânica e a de saída é elétrica, pode ser expressa como (Krishnan, 2001):

$$e = (R_a + R_L) \cdot i_a + L_a \frac{di_a}{dt} \quad (3.1)$$

A tensão induzida gerada nos terminais basicamente pode ser determinada mediante o produto da velocidade angular mecânica ( $\omega_m$ ) de entrada por uma constante de força contra-eletromotriz ( $K_e$ ) (Krishnan, 2001).

$$e = K_e \omega_m \quad (3.2)$$

O torque eletromagnético imposto ao movimento é determinado por meio da seguinte expressão (Krishnan, 2001):

$$\tau_{el} = K_t i_a \quad (3.3)$$

onde  $K_t$  é a constante de torque.

Conforme pode ser acompanhado nas deduções encontradas em Krishnan (2001), nota-se que a constante de torque ( $K_t$ ) e a constante de força contra-eletromotriz ( $K_e$ ) são numericamente equivalentes. Desta forma, os símbolos de ambas variáveis foram alterados para  $K_b$  e o mesmo pode ser determinado mediante a seguinte expressão:

$$K_b = M_{Af} i_f \quad (3.4)$$

em que  $M_{Af}$  é a indutância mútua entre os enrolamentos de armadura e de campo e  $i_f$  é a corrente no enrolamento de campo.

No circuito de enrolamento de campo, a relação entre a tensão de alimentação  $V_f$  do enrolamento de campo e a respectiva corrente  $i_f$  é dada por:

$$V_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \quad (3.5)$$

em que  $R_f$  e  $L_f$  são respectivamente a resistência e indutância no enrolamento de campo.

Transformando as Equações (3.1), (3.2) e (3.3), que estão no domínio do tempo, para o domínio da frequência ("s"), tem-se:

$$E(s) = (R_a + R_L) \cdot I_a(s) + sL_a I_a(s) \quad (3.6)$$

$$T_{el}(s) = M_{Af} \cdot I_a(s) \cdot I_f(s) \quad (3.7)$$

$$E(s) = M_{Af} \cdot I_f(s) \cdot \Omega_m(s) \quad (3.8)$$

$$V_f(s) = R_f \cdot I_f(s) + s \cdot L_f \cdot I_f(s) \quad (3.9)$$

Manipulando as Equações (3.6), (3.7), (3.8) e (3.9), obtêm-se as seguintes funções de transferências:

$$\frac{E(s)}{I_a} = \frac{1}{sL_a + R_a + R_L} \quad (3.10)$$

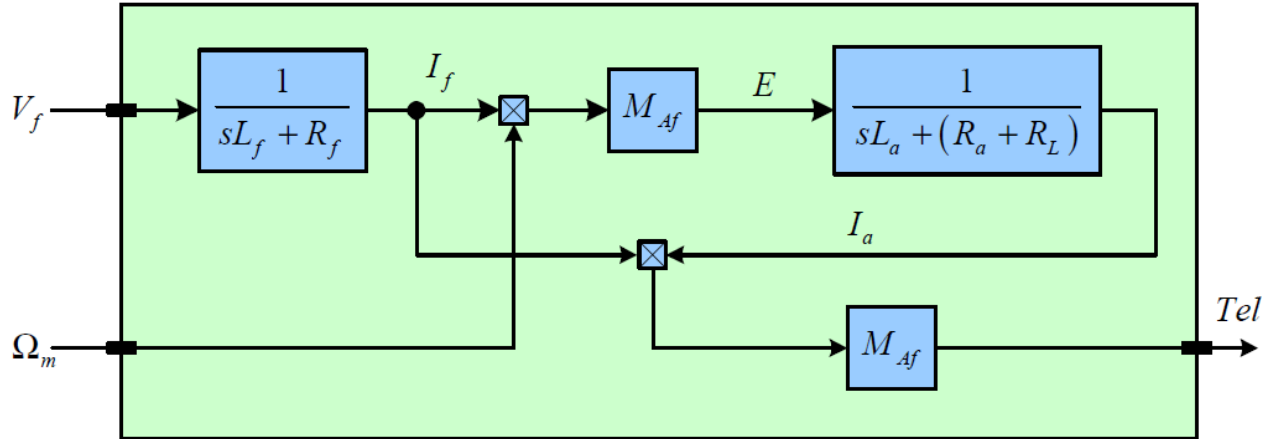
$$\frac{T_{el}(s)}{I_a(s) \cdot I_f(s)} = M_{Af} \quad (3.11)$$

$$\frac{E(s)}{I_f(s) \cdot \Omega_m(s)} = M_{Af} \quad (3.12)$$

$$\frac{I_f(s)}{V_f(s)} = \frac{1}{sL_f + R_f} \quad (3.13)$$



As Equações (3.10), (3.11), (3.12) e (3.13) representam o modelo do gerador de corrente contínua para o controle de geração de torque por meio da variação da tensão de campo. Os relacionamentos entre as equações podem ser mais bem visualizados e interpretados mediante o diagrama de blocos contido na Figura 3.3.



**Figura 3.3 – Diagrama de blocos do modelo do GCC para o controle de torque mediante a variação de tensão de Campo.**

A partir do diagrama, percebe-se que as variáveis de entrada do sistema consistem na velocidade angular do eixo e a tensão de alimentação do enrolamento de campo. Por outro lado, a variável de saída é o torque eletromagnético desenvolvido pelo GCC que se opõe ao movimento mecânico do eixo. A velocidade angular mecânica geralmente será desenvolvida pela máquina acoplada ao eixo como, por exemplo, o motor de indução trifásico. Neste contexto, tal variável não poderá ser tratada como variável de controle. Sendo assim, apenas a tensão de campo atuará no controle de geração de perfis de cargas industriais.

Nota-se ainda que a partir da Equação (3.11) e, conforme ilustrado no diagrama de blocos da Figura 3.3, o torque eletromagnético resistente ao movimento desenvolvido pelo gerador de corrente contínua pode ser obtido pelo produto da corrente de armadura, corrente de campo e da indutância mútua entre os enrolamentos de armadura e campo. Na prática, então, o torque pode ser determinado a partir da medição das correntes de campo e armadura realizadas por meio de sensores Hall.

A Figura 3.4 ilustra o diagrama de blocos do sistema de controle de geração de perfis de carga. O bloco “GCC” consiste no modelo matemático do gerador de corrente contínua e sua estrutura interna é composta pelo diagrama da Figura 3.3. O torque eletromagnético gerado pelo GCC é comparado com o torque de referência. O sinal de erro é atribuído a um controlador (PI) que gera uma tensão de referência no enrolamento de campo a cada 1,0 ms. Com o intuito

de considerar as limitações práticas de acionamento, um saturador foi utilizado para limitar a tensão nominal de campo (190,0 V). Na prática a alimentação do enrolamento de campo será realizada mediante o controle da largura de pulso PWM, cujo valor está diretamente relacionado com a tensão média. Entretanto, este módulo não será considerada nesta simulação.

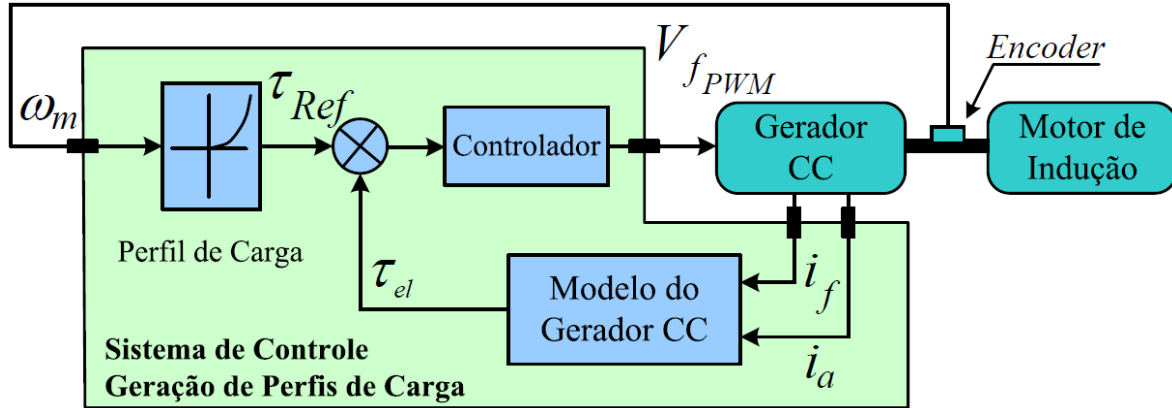


Figura 3.4 – Diagrama do sistema de controle da tensão de campo para a geração de perfis de cargas industriais.

Em virtude de inúmeras cargas industriais, tais como lineares, quadráticas e inversas serem dependentes da velocidade mecânica do eixo, o torque de referência é gerado a partir da velocidade atual, a qual pode ser mensurada por um *encoder*. Tal operação é realizada por meio do bloco "Perfil de Carga".

---

## 4. PRINCIPAIS TIPOS DE CARGAS ACOPLADAS AO MIT

---

### 4.1 *Introdução*

---

Em Dias e Lobosco (1988) é afirmado que uma carga mecânica requer uma determinada potência. De certa forma, isso equivale a afirmar que tal carga necessita de um determinado conjugado a uma dada velocidade de rotação. Ou seja, para um sistema dotado de movimento de rotação, tem-se:

$$P = C \cdot \omega \quad (4.1)$$

em que:

$P$  é a potência desenvolvida (KW).

$C$  é o conjugado desenvolvido (Nm).

$\omega$  é a velocidade angular do movimento (rad/s).

De acordo com Dias e Lobosco (1988), as cargas mecânicas podem ser divididas em cinco grupos em função de suas características de conjugado versus velocidade:

- Carga Constante;
- Carga Linear;
- Carga Quadrática;
- Carga Inversa;
- Cargas que não solicitam conjugado.

Uma breve descrição de cada uma dessas cargas será explanada nos itens subseqüentes.

### 4.2 *Carga Constante*

---

A carga constante caracteriza-se pela baixa ou nenhuma variação de conjugado resistente exigido do motor, permanecendo seu valor praticamente constante com o aumento

de velocidade. As aplicações típicas deste tipo de carga residem em guinchos, guindastes e correias transportadoras (Dias e Lobosco, 1988).

Uma carga constante pode ser representada pela seguinte expressão:

$$T(\omega) = K \quad (4.2)$$

onde  $K$  representa o valor do torque de carga. A Figura 4.1 representa a curva de carga constante utilizada para análise deste trabalho.

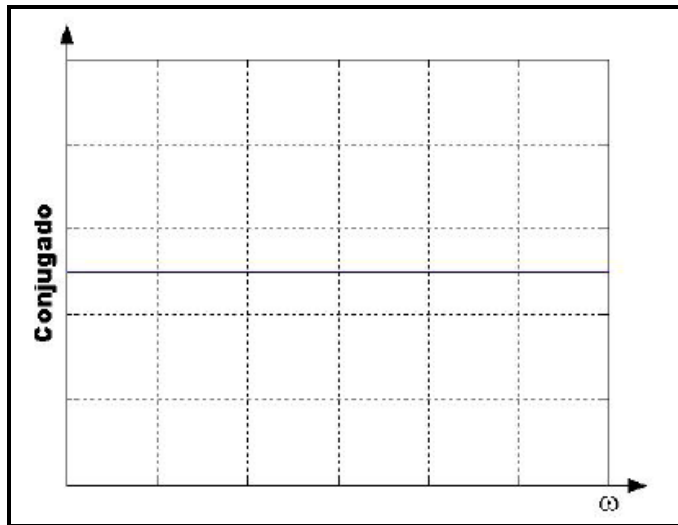


Figura 4.1 – Conjugado de Carga Constante.

### 4.3 Carga Linear

A carga linear consiste de um conjugado resistente que apresenta uma variação linear com relação à rotação do eixo do motor. Este tipo de carga se encontra em aplicações como moinho de rolos, bombas de pistão, plainas e serras para madeira (Dias e Lobosco, 1988). A carga linear pode ser representada pela seguinte expressão:

$$T(\omega) = a\omega + K \quad (4.3)$$

onde  $a$  e  $K$  estão relacionadas à inclinação e ao torque de carga inicial, respectivamente. A Figura 4.2 descreve uma curva de carga linear.

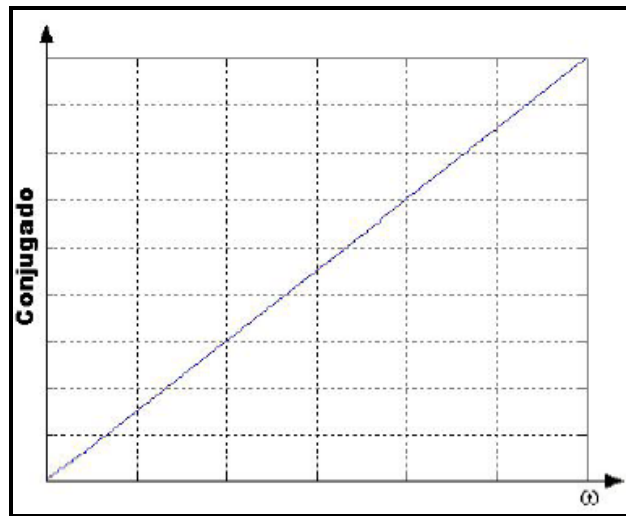


Figura 4.2 – Conjugado de Carga Linear.

#### 4.4 Carga Quadrática

A carga quadrática caracteriza-se por um conjugado resistente que varia com o quadrado da rotação. Suas principais aplicações são encontradas em ventiladores, misturadores, centrífugas, bombas centrífugas, exaustores e compressores (Dias e Lobosco, 1988). Matematicamente, esta pode ser representada pela seguinte equação:

$$T(\omega) = a\omega^2 + K \quad (4.4)$$

onde  $a$  e  $K$  estão relacionadas à concavidade da parábola e ao conjugado inicial de partida, respectivamente. A Figura 4.3 representa uma curva de torque de carga quadrática.

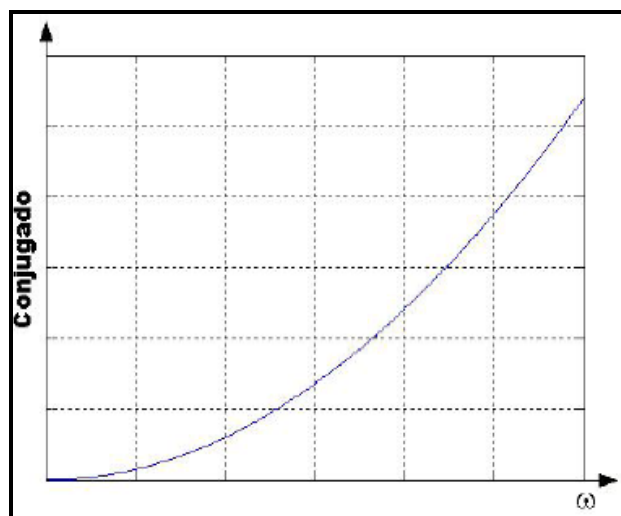


Figura 4.3 – Conjugado de Carga Quadrática.

## 4.5 Carga Inversa

Este tipo de carga se comporta de forma inversa com a velocidade de rotação do motor, ou seja, seu valor diminui com o incremento de velocidade. As principais aplicações se concentram em fresadoras e mandriladoras (Dias e Lobosco, 1988). A carga inversa pode ser determinada pela seguinte expressão:

$$T(\omega) = ae^{-b\omega} + K \quad (4.5)$$

onde  $a$  está relacionada com o valor inicial do torque e  $K$  se refere ao valor mínimo do conjugado de carga. A Figura 4.4 ilustra um conjugado de carga inverso.

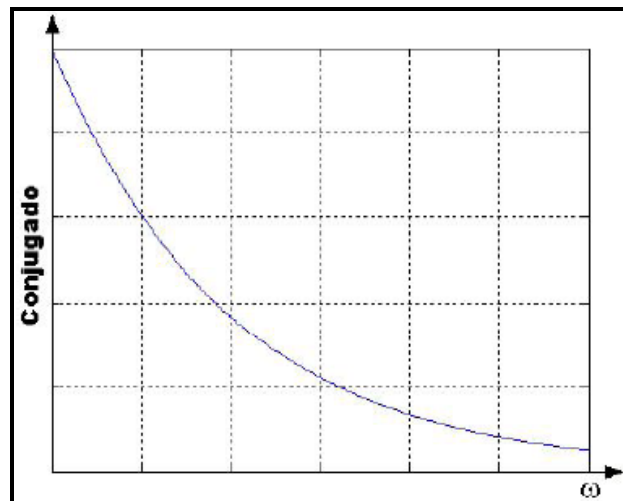


Figura 4.4 – Conjugado de Carga Inversa.

## 4.6 Cargas que não Solicitam Conjugado

As cargas que não solicitam conjugados também são denominadas de volantes e tem como propósito liberar a maior parte da energia cinética armazenada visando suprir os picos de demanda de energia por parte da máquina acionada. Desta forma, o motor atua como repositório de energia cinética entre dois picos consecutivos de demanda, vencendo apenas o conjugado resistente originado por atritos. O volante é constituído normalmente de ferro fundido, alinhado e balanceado de forma a não produzir vibração no eixo do motor (Goedtel, 2003). Como exemplos desse tipo de carga têm-se as prensas de perfuração e estampagem profundas, sendo ambas não hidráulicas (Dias e Lobosco, 1988).

Para o conjugado de carga que varia de maneira não uniforme com a rotação não se tem uma função matemática que descreva de forma satisfatória seu comportamento. De acordo com Dias e Lobosco (1988), tem-se como exemplo desse tipo de carga, fornos rotativos de grande porte.





---

## 5. ESTRATÉGIA DE CONTROLE DE TORQUE E SIMULAÇÕES

---

### 5.1 *Introdução*

---

Conforme visto no Capítulo 3, uma das formas de controle de torque para a geração dos perfis de conjugado de carga a fim de simular as cargas encontradas em indústrias é através da variação da tensão no enrolamento de campo do GCC. Neste capítulo, simulações serão apresentadas para mostrar a validade desse controle, utilizando-se a modelagem do sistema apresentada anteriormente neste trabalho.

### 5.2 *Resultados de Simulações Computacionais*

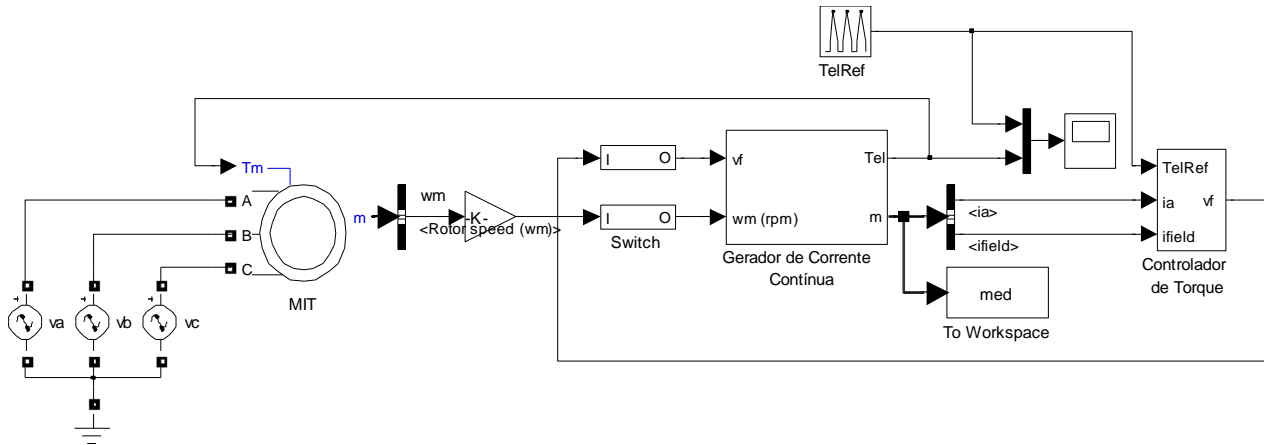
---

Na seqüência é apresentada uma série de simulações computacionais realizadas com o intuito de se obter resultados preliminares do desenvolvimento de perfis de cargas industriais. Para tanto, realizaram-se ensaios que abrangem os perfis de cargas impostas pelo usuário, tais como de degraus e rampas de referência de torque, bem como os perfis que procuram simular cargas industriais existentes como cargas lineares, quadráticas e constantes.

#### 5.2.1 *Ensaio de Degrau de Referência de Carga*

O ensaio realizado para avaliar o desempenho do controle de geração de carga frente aos degraus de referência de torque está ilustrado conforme diagrama de blocos do Simulink da Figura 5.1. Em tal ensaio, partiu-se o motor de indução trifásico com tensão e frequência nominal (220V / 60Hz) até que o mesmo atinja a velocidade de regime. Em seguida, o algoritmo de controle, cuja implementação foi realizada no bloco “Controlador de Torque”, é acionado de forma a produzir o torque de referência em degrau. Conforme pode ser observado no diagrama, a velocidade angular do MIT é multiplicada por um ganho (bloco representado por um triângulo) que consiste simplesmente na transformação de unidades de rad/s para rot/min. O bloco “Switch” apenas efetua o acionamento do algoritmo de controle após o MIT entrar em regime

permanente. Neste ensaio, procurou-se analisar apenas o desempenho do controlador frente aos degraus de torque de referência sem se preocupar com grandes variações de velocidade.



**Figura 5.1 – Diagramas de blocos dos Simulink para o ensaio de degrau de referência de torque.**

Com o intuito de tornar o sistema mais próximo da configuração à ser executada na prática, os sinais de correntes de armadura e de campo foram enviadas ao bloco “Controlador de Torque” que compõe o algoritmo de controle do tipo Proporcional e Integral (PI), cujos parâmetros foram ajustados de forma empírica até atingir resultados com baixos erros de regime (erros < 1%). Os parâmetros utilizados neste controlador são apresentados na equação 5.1. A Figura 5.2 ilustra o desempenho da simulação computacional do torque gerado pela máquina de corrente contínua.

$$G_{PI} = K_p + \frac{K_i}{s} \Rightarrow G_{PI} = 1000 + \frac{0.01}{s} \quad (5.1)$$

Em sua primeira análise, nota-se que o torque de carga gerado pelo GCC atingiu a referência de 3,0 Nm em aproximadamente 0,1 s, cujo atraso de resposta pode ser justificado devido principalmente à constante de tempo do enrolamento de campo. Neste contexto, embora o algoritmo de controle solicite a tensão máxima do barramento CC, conforme pode ser observado na Figura 5.3, a corrente de campo que produz o fluxo eletromagnético que atua na intensidade do torque resistente ao movimento consome um determinado tempo até que a mesma atinja o valor requerido.

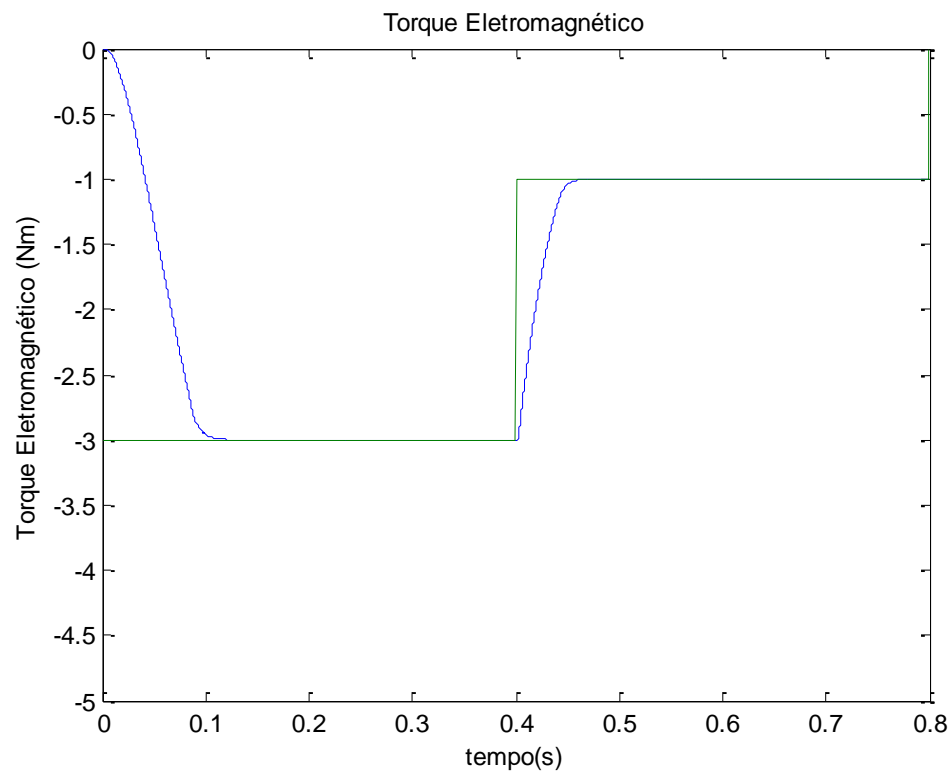


Figura 5.2 – Desempenho do controle de geração de carga frente aos degraus de referência de torque.

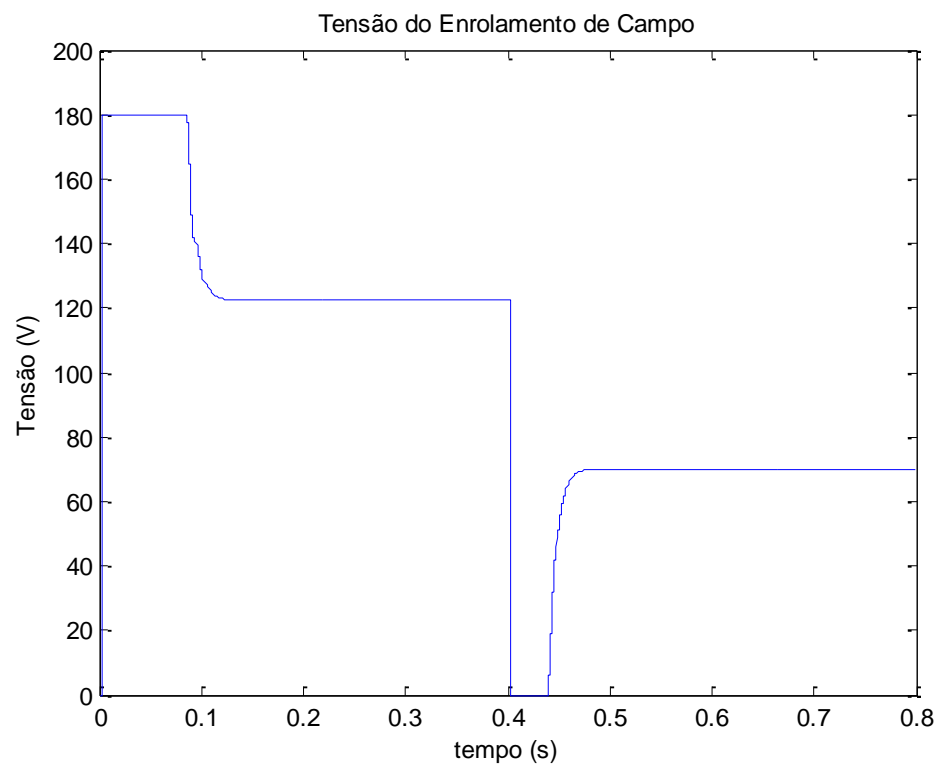
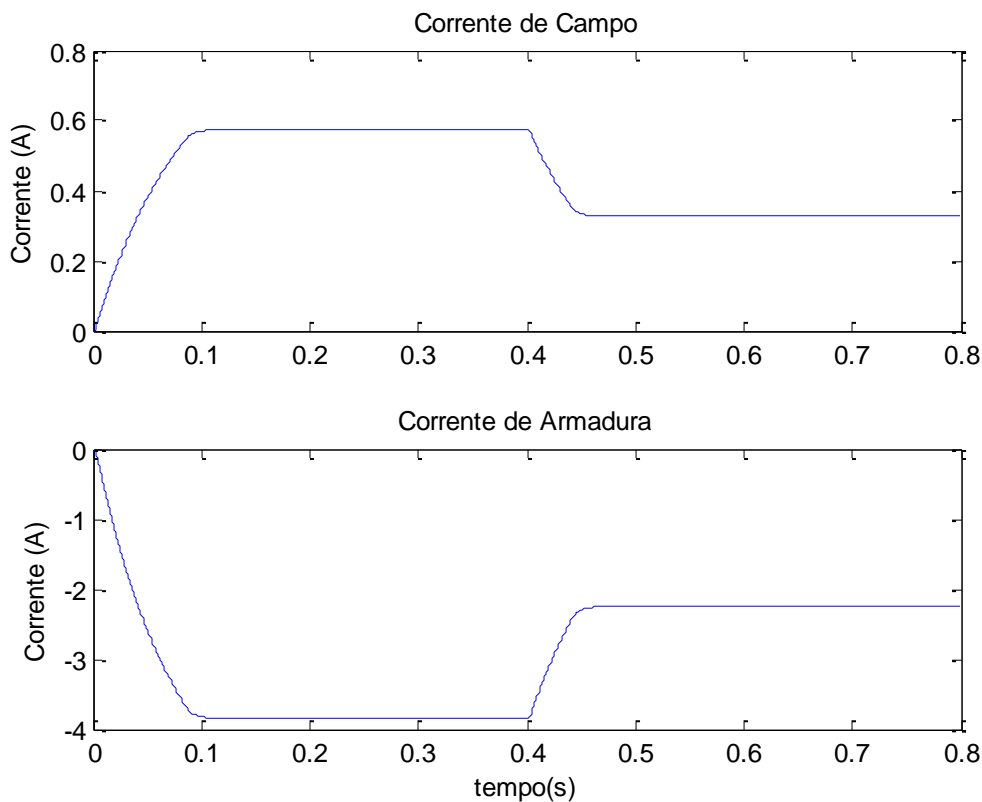


Figura 5.3 – Tensão de acionamento do enrolamento de campo ao longo do ensaio.

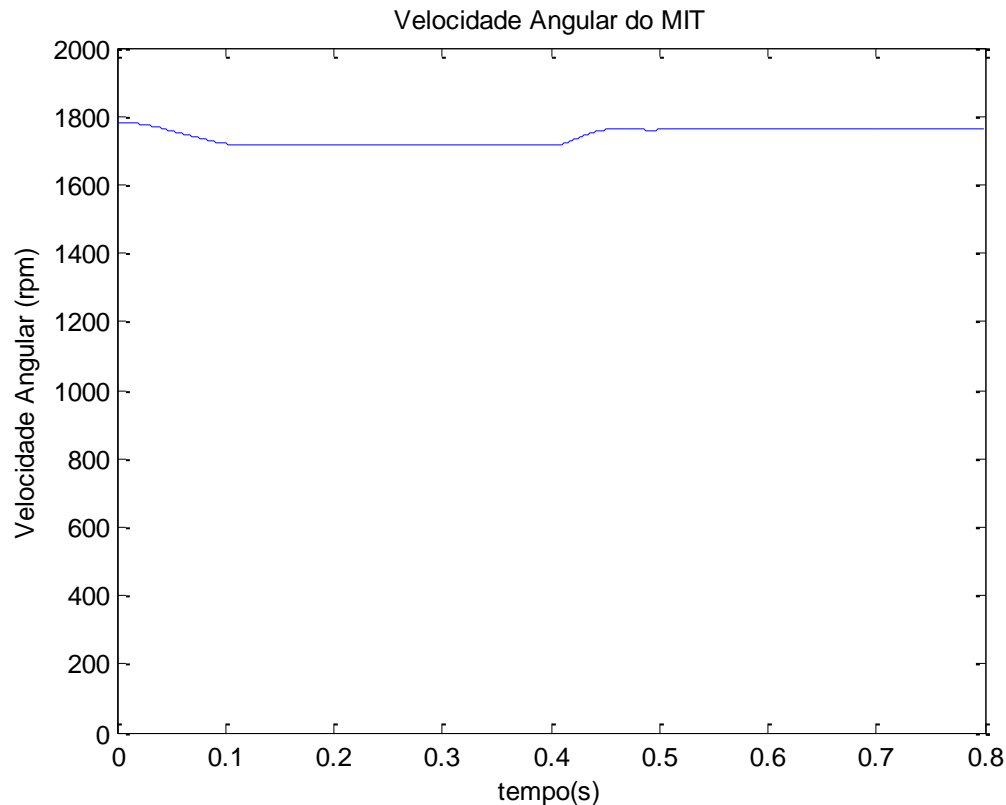
A partir desta análise, nota-se que o atraso de resposta é intrínseco ao sistema e, portanto, o controle de geração de carga, cuja referência de torque de carga seja variante no tempo e que a mesma apresente uma inclinação superior (em módulo) à curva de torque ilustrada na Figura 5.2, (3 Nm / 0.1s), torna-se impraticável.

A Figura 5.4 ilustra o gráfico das correntes de campo e de armadura ao longo do ensaio. A partir deste gráfico confirma-se que realmente a corrente de campo consome um tempo de aproximadamente 0,1 s para atingir o valor de regime, embora a tensão aplicada neste mesmo intervalo de tempo seja o valor máximo do barramento CC, conforme ilustrado na Figura 5.3.



**Figura 5.4 – Corrente de campo e de armadura ao longo do ensaio.**

Na Figura 5.5 é ilustrada a velocidade angular do eixo durante ensaio experimental. Conforme o torque de carga imposto ao motor de indução aumenta, a velocidade desempenhada pelo mesmo diminui. Entretanto, nota-se que o algoritmo de controle foi capaz de compensar a variação no torque eletromagnético devido à variação de velocidade. Cabe ressaltar que a velocidade, como pode ser visto no diagrama da Figura 3.3, consiste em uma variável de entrada do sistema, a qual afeta diretamente o sistema de controle.



**Figura 5.5 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.**

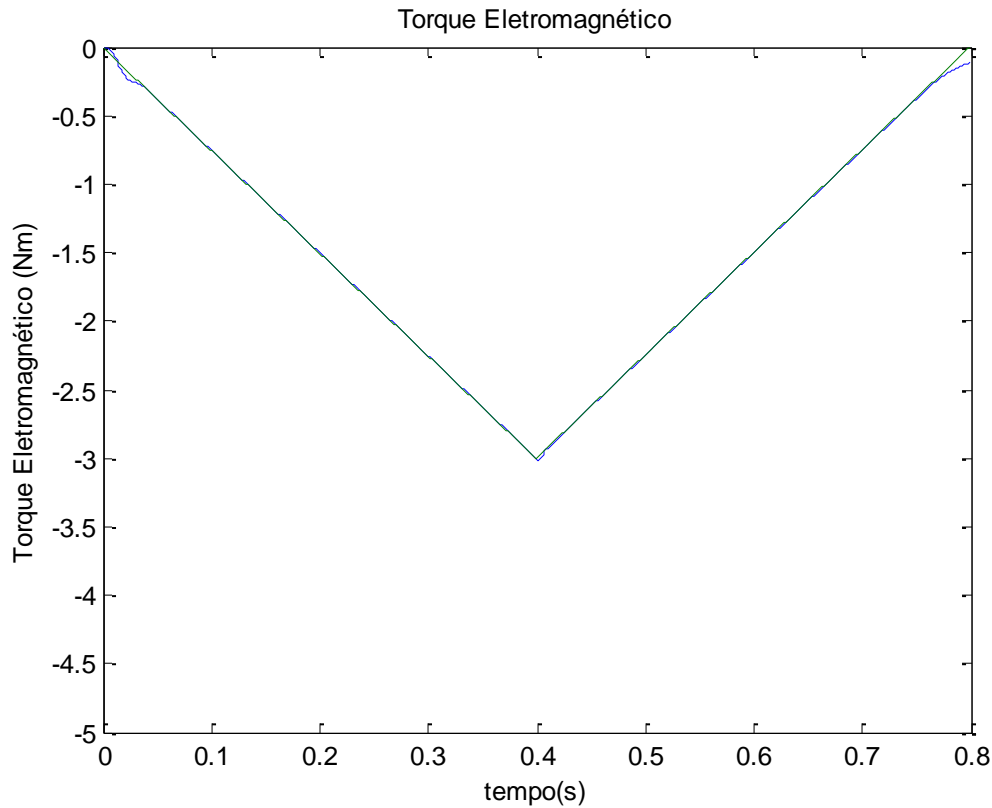
### 5.2.2 Ensaio de Rampa de Referência de Carga

O ensaio para avaliar o desempenho do controle de geração de carga frente à rampa de referência de torque foi realizado de forma semelhante ao descrito anteriormente. O diagrama de blocos implementado no Simulink apresenta a mesma estrutura da Figura 5.1, cuja diferença reside no bloco “TelRef” que se constitui de uma rampa crescente e decrescente (em módulo) ao longo do ensaio.

De forma análoga, partiu-se o MIT com tensão e frequência nominal até o instante que a velocidade atinge o seu valor de regime e, em seguida, acionou-se o algoritmo de controle para desenvolver a rampa de torque.

O desempenho da simulação computacional do torque desenvolvido pelo gerador de corrente contínua é ilustrado na Figura 5.6. As configurações internas dos parâmetros do controlador PI foram as mesmas estabelecidas no ensaio ao degrau de referência. Nota-se que ao longo do ensaio o erro apresentou valores baixos (erro < 1,0%). Entretanto, no início e no final do ensaio, observa-se uma pequena divergência entre o valor de referência e o valor desenvolvido pela máquina de corrente contínua.

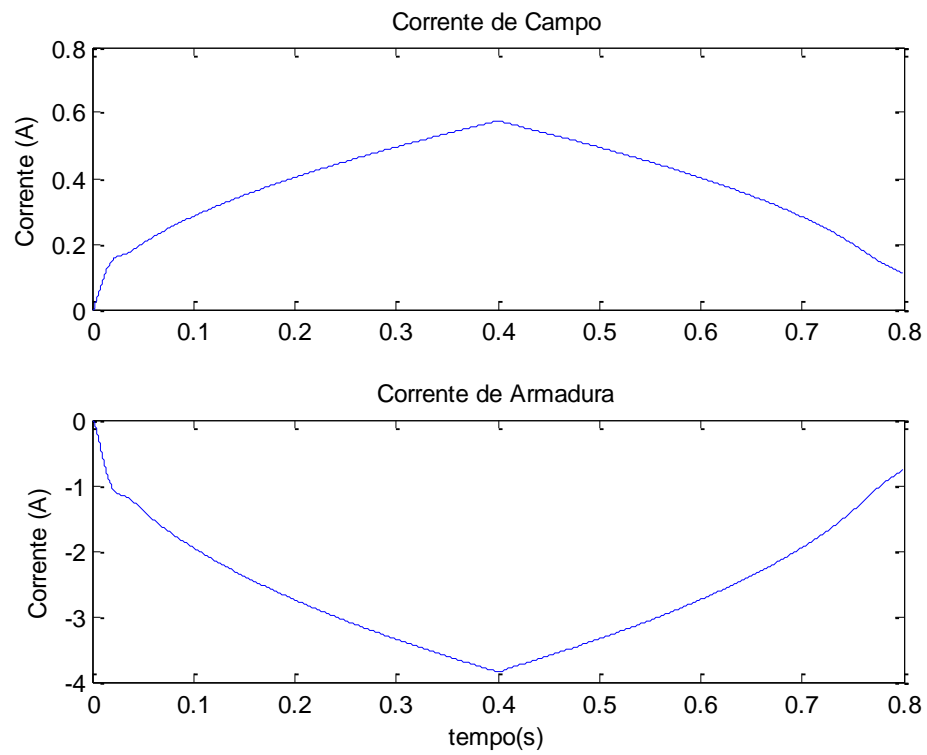
O primeiro instante se deve ao fato de que o algoritmo de controle envia um sinal de tensão tal qual que produza o torque de referência que, no entanto, não produz o efeito desejado devido ao atraso da corrente de campo. Conseqüentemente, o algoritmo tentará enviar uma tensão maior para reajustar o valor do torque, produzindo assim um pequeno *overshoot* inicial.



**Figura 5.6 – Desempenho da geração de carga frente às rampas de referência de torque.**

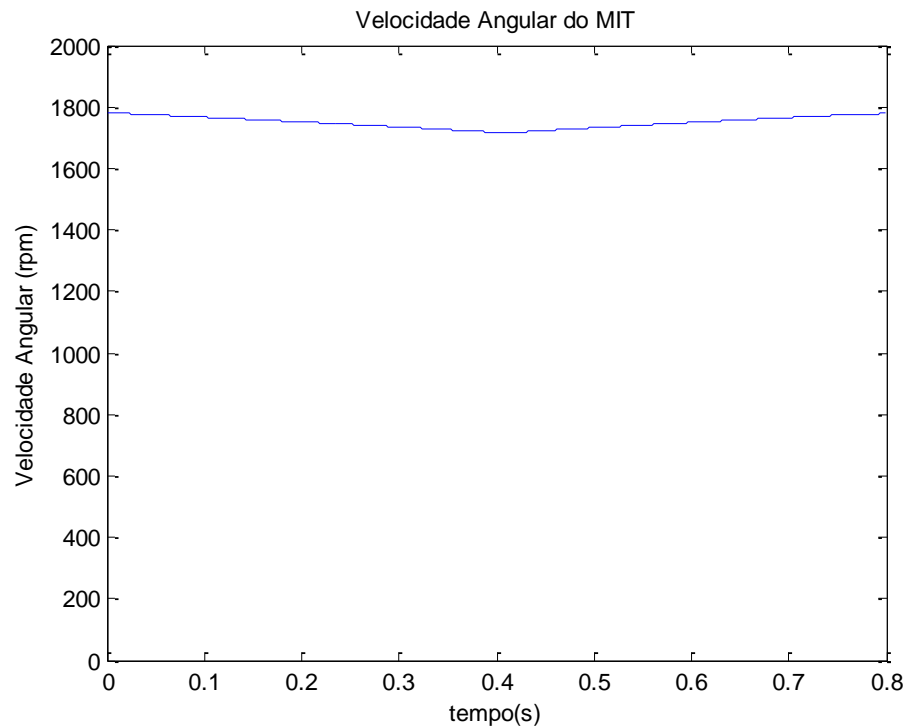
Por outro lado, no instante final, a corrente da bobina de campo não é capaz de descarregar conforme ao valor requerido pela referência de torque devido à própria constante de tempo, ocasionando então o desvio observado.

A Figura 5.7 ilustra as correntes de campo e de armadura durante o ensaio.



**Figura 5.7 – Desempenho Correntes de armadura e de campo ao longo do ensaio.**

O gráfico da velocidade angular desenvolvido pelo MIT é ilustrado na Figura 5.8.

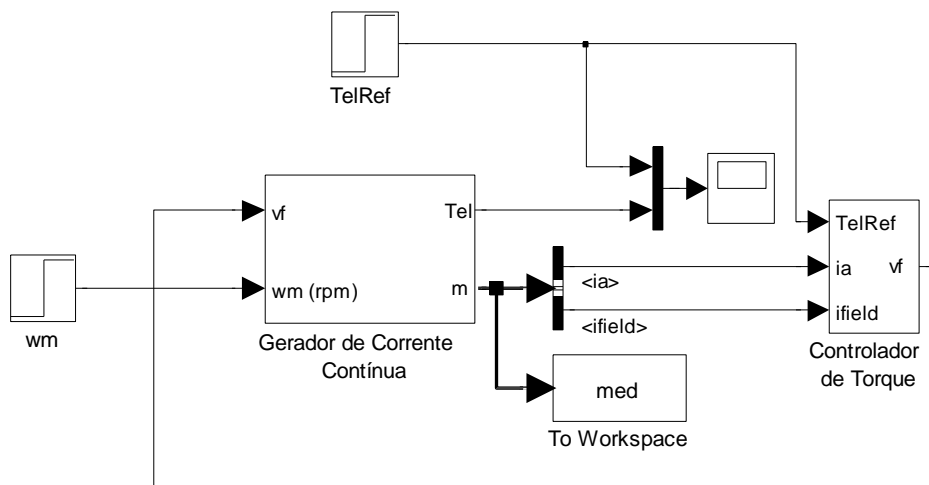


**Figura 5.8 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.**

### 5.2.3 Ensaio de Carga Constante com a Velocidade

No ensaio de degrau de torque de carga, o desempenho do gerador de perfis de carga foi analisado no contexto enfocado na dinâmica da variação de torque de referência considerando-se uma situação particular em que o eixo esteja com velocidade aproximadamente constante.

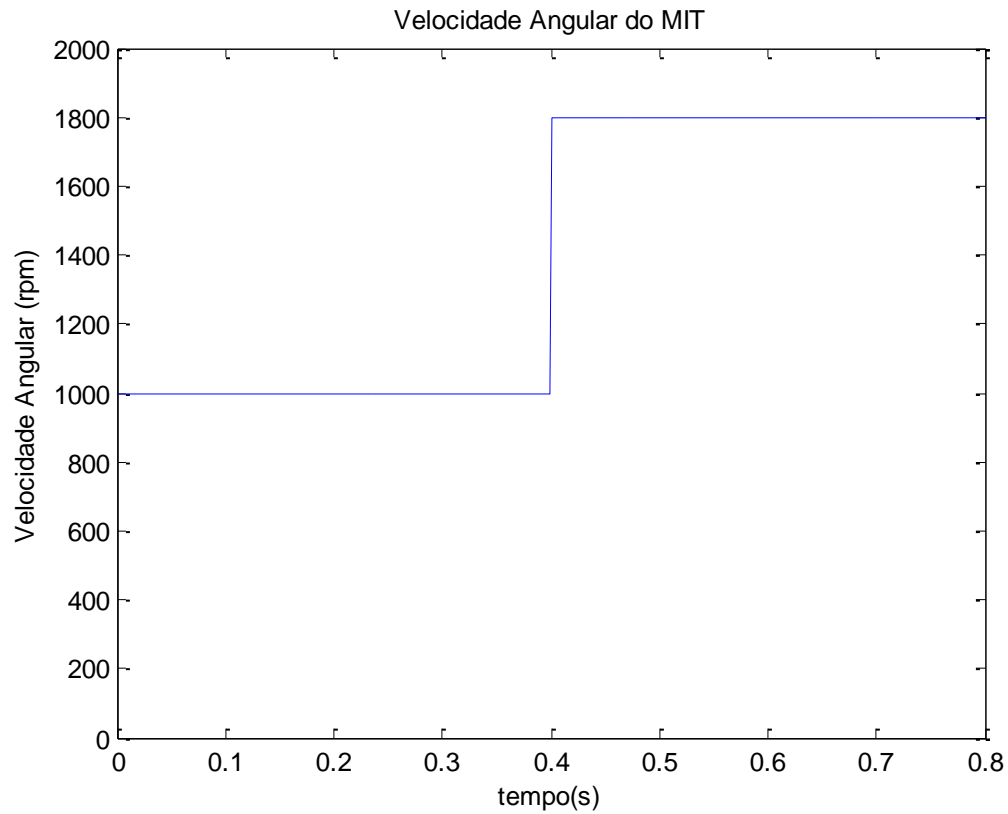
Neste ensaio, o perfil de carga constante procura simular uma carga industrial cujo valor se mantém constante mesmo com a variação de velocidade. Com o intuito de se analisar a dinâmica do controlador, desenvolveu-se o diagrama de blocos no ambiente *Simulink* conforme ilustrado na Figura 5.9. Ao invés de acionar o eixo do gerador de corrente contínua por um motor de indução trifásico, optou-se por aplicar um degrau de velocidade com o intuito de se analisar o desempenho do controlador sob condições ideais de pior caso.



**Figura 5.9 – Diagramas de blocos do Simulink para o ensaio de carga constante com a velocidade.**

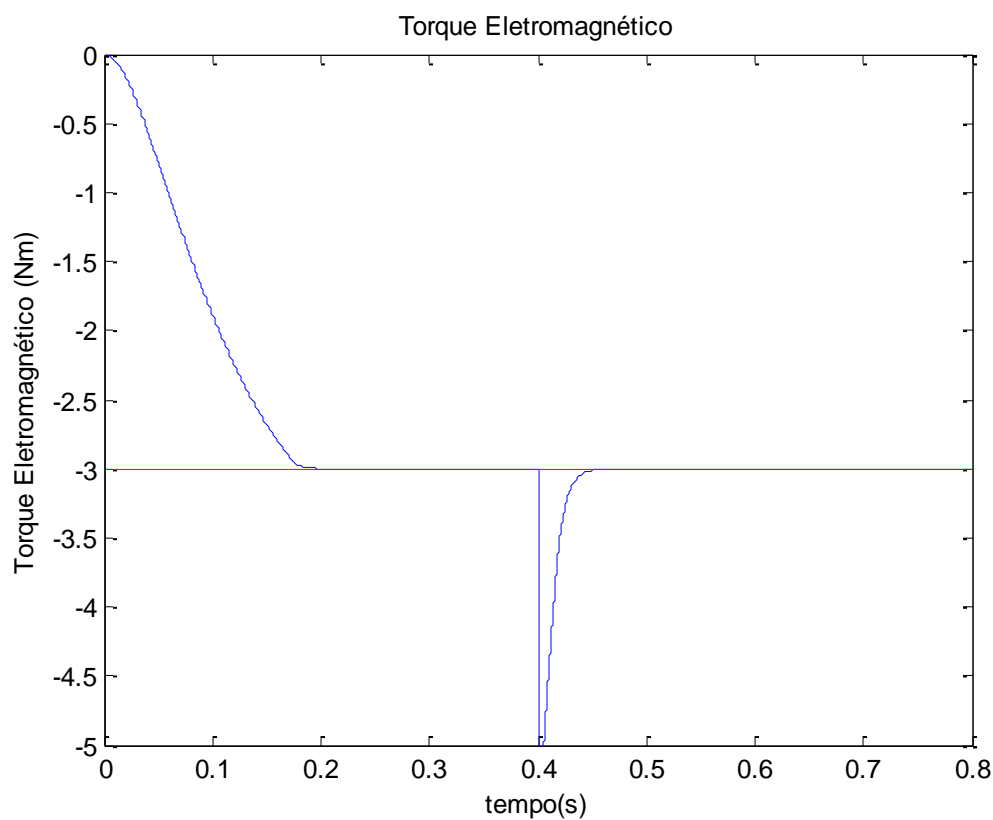
No diagrama desta simulação adotou-se um torque de referência de -3,0 Nm durante todo o ensaio. O degrau de velocidade aplicado na entrada do bloco “Gerador de Corrente Contínua” consistiu nos valores de 1000 rpm a 1800 rpm, conforme pode ser visualizado na Figura 5.10.





**Figura 5.10 – Degrau de variação de velocidade para o ensaio de torque de carga constante.**

O gráfico ilustrado na Figura 5.11 representa o torque desenvolvido pelo GCC. Nota-se que o torque atingiu o seu valor de referência em um tempo relativamente superior ao obtido no ensaio de degrau de referência (Figura 5.2). Isso se deve ao fato de que, com uma menor velocidade do eixo, o módulo da corrente de campo deverá ser superior para produzir os mesmos efeitos de torque.



**Figura 5.11 – Torque eletromagnético.**

No instante do degrau de variação de velocidade, a simulação mostra um aumento repentino para aproximadamente -5,0 Nm e, logo em seguida, o controle de torque se estabiliza em -3.0 Nm em menos de 50 ms. Tal aumento se deve ao efeito da variação em degrau da velocidade, o que dificilmente acontece na prática devido à inércia mecânica. Entretanto, com esta análise conclui-se que o sistema de geração de perfis de carga é capaz de gerar perfis de cargas constantes considerando-se tais limitações.

A Figura 5.12 ilustra as correntes de armadura e de campo ao longo do ensaio.

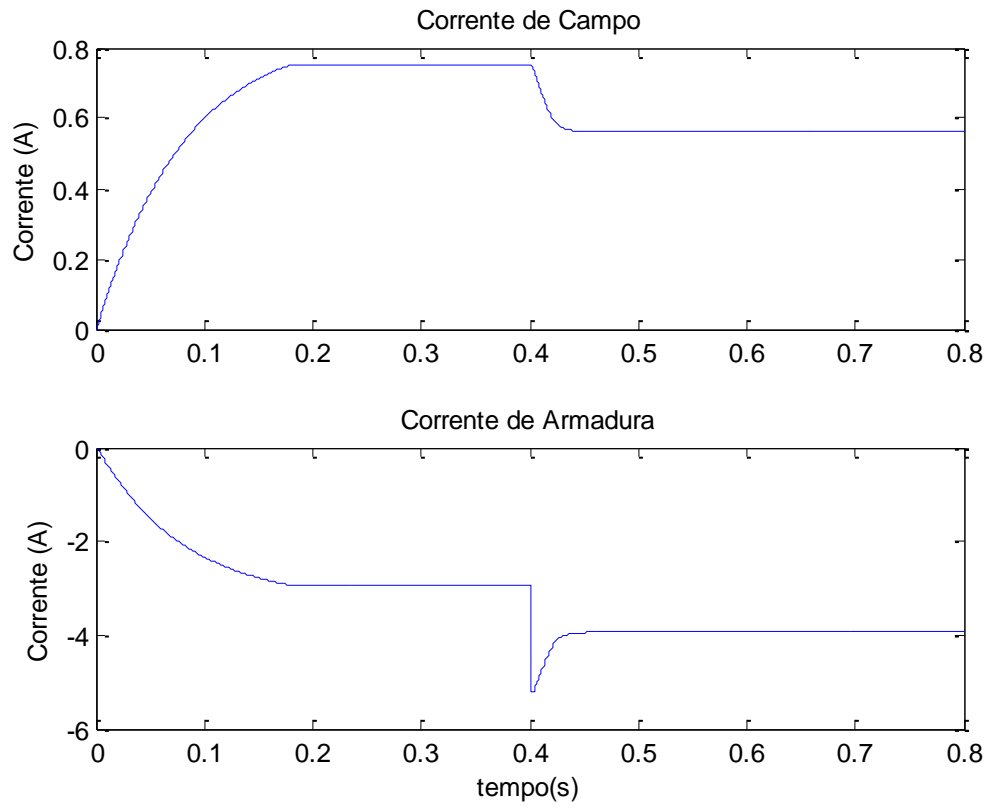


Figura 5.12 – Correntes de campo e armadura ao longo do ensaio.

#### 5.2.4 Ensaio de Carga Linear com a Velocidade

A simulação realizada para avaliar o desempenho do controle de geração de perfis de cargas lineares apresenta a estrutura ilustrada na Figura 5.13. No ensaio, o bloco que desempenha o algoritmo de controle é acionado no mesmo instante da partida do MIT. O torque de referência de controle então varia de forma linear com a velocidade do eixo, o qual é implementado no bloco “Perfil Linear” da Figura 5.13.

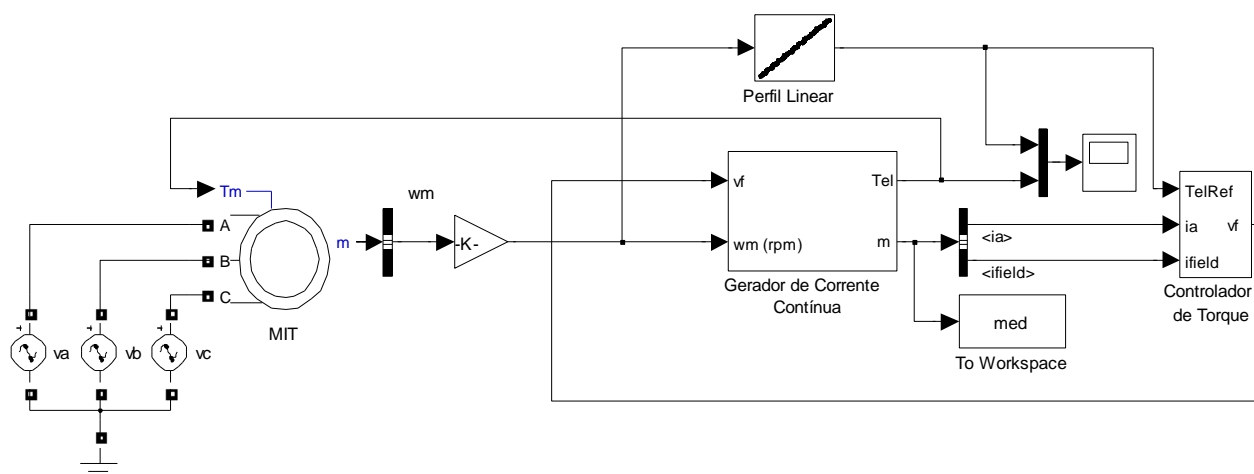


Figura 5.13 – Diagramas de blocos do *Simulink* para o ensaio de lineares com a velocidade.

A Figura 5.14 ilustra o gráfico Torque x Velocidade do perfil de carga linear adotado para esta simulação. Com o intuito de avaliar a abrangência dos valores nominais do MIT, simulou-se um perfil linear de carga tal que a inclinação da reta fosse ajustada de forma a fornecer uma carga nominal de 4,0 Nm no eixo quando o MIT estiver em sua velocidade nominal.

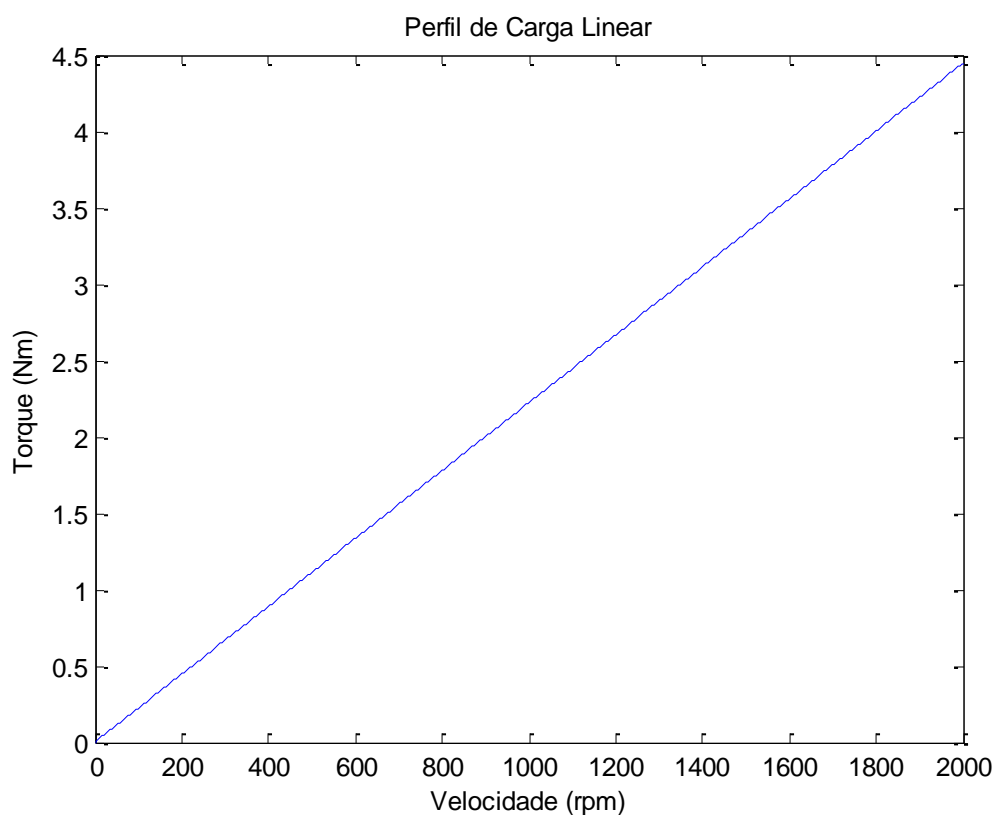
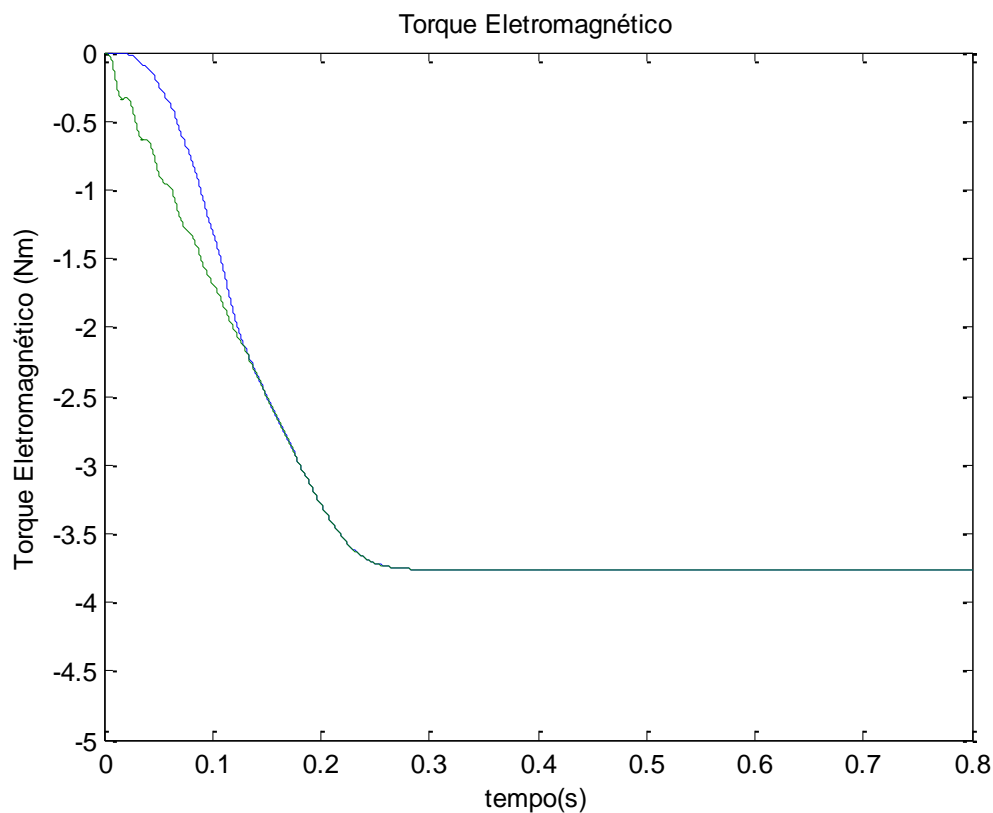


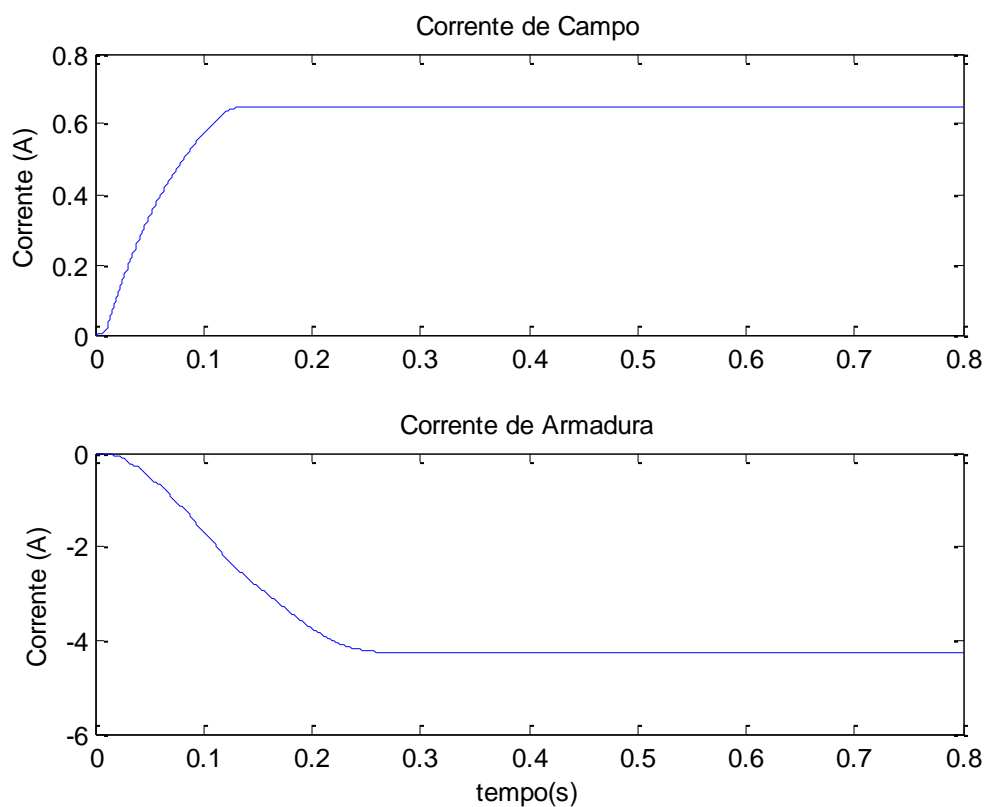
Figura 5.14 – Gráfico do perfil linear de carga empregado na simulação computacional.

A Figura 5.15 ilustra o desempenho do controlador para a geração de perfis de cargas lineares com a velocidade. Mediante a observação do gráfico, percebe-se um desvio entre o torque de referência e o torque gerado pelo GCC. Isto se deve ao fato de que o perfil linear da Figura 5.14, em conjunto com a dinâmica de partida rápida do motor de indução (em torno de 200,0 ms da partida ao regime), exige uma grande variação de torque em um curto intervalo de tempo. Devido ao atraso da corrente do enrolamento de campo decorrente de sua constante de tempo, o torque desenvolvido não é capaz de acompanhar a referência em seu instante inicial. Neste contexto, os resultados são divergentes devido aos parâmetros intrínsecos do GCC cujas justificativas são semelhantes às aquelas explanadas no ensaio a degrau.



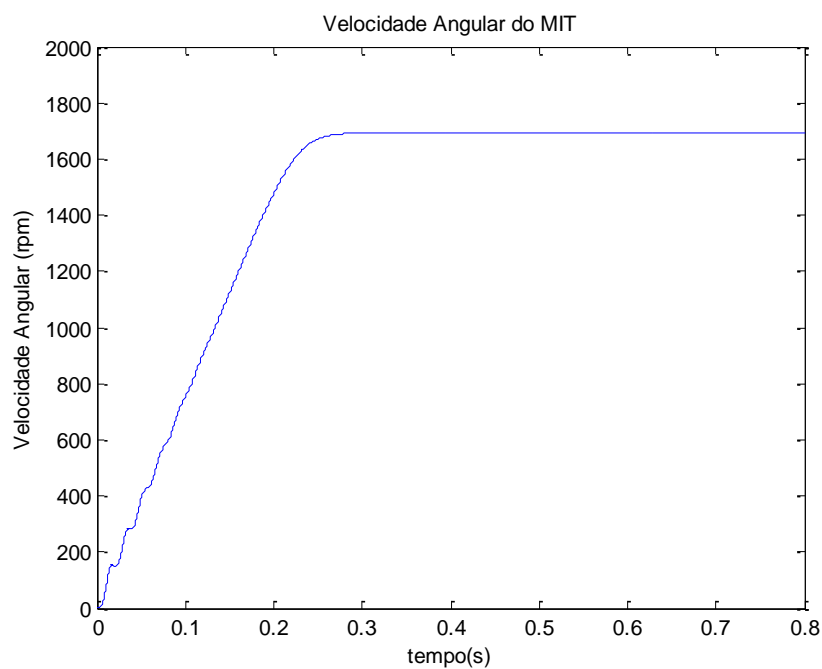
**Figura 5.15 – Desempenho do controle de geração de carga para cargas lineares.**

Os gráficos que ilustram as variações da corrente de campo e de armadura ao longo do ensaio estão apresentados na Figura 5.16.



**Figura 5.16 – Correntes de armadura e de campo ao longo do ensaio.**

A Figura 5.17 ilustra a velocidade angular do eixo ao longo da simulação computacional.



**Figura 5.17 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.**

### 5.2.5 Ensaio de Carga Quadrática com a Velocidade

A simulação desenvolvida para analisar o desempenho do controle de geração de perfis de cargas quadráticas apresenta a mesma estrutura da simulação anterior (Figura 5.13). Entretanto, a única diferença reside na substituição do bloco “Perfil Linear” para “Perfil Quadrático”, cuja função consiste na geração de sinais de torque de referência que varia de forma quadrática com a velocidade do eixo.

A Figura 5.18 ilustra o gráfico Torque x Velocidade do perfil de carga quadrática adotado para esta simulação. Assim como no caso da carga linear, com o intuito de avaliar a abrangência dos valores nominais do MIT, simulou-se um perfil linear de carga tal que a inclinação da reta fosse ajustada de maneira a fornecer uma carga nominal de 4,0 Nm no eixo quando o MIT estiver em sua velocidade nominal.

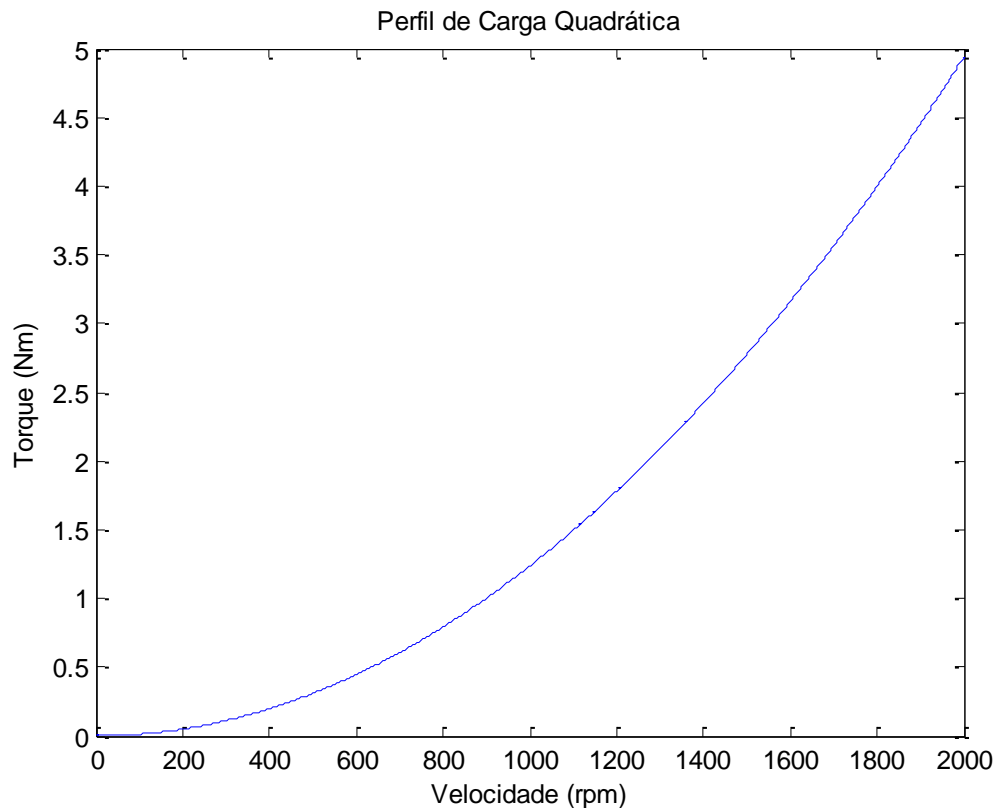
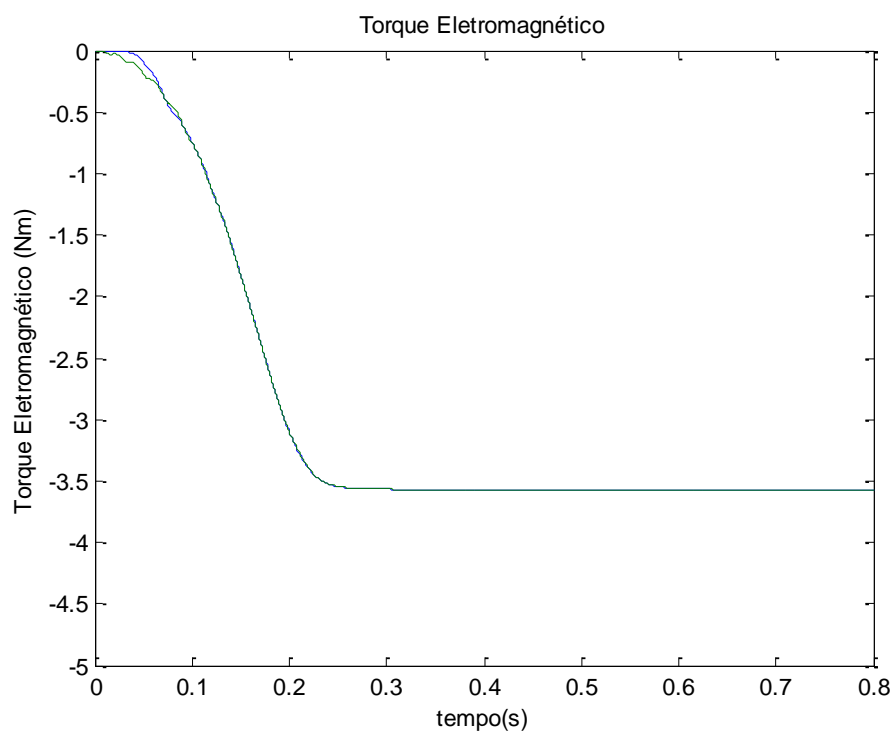


Figura 5.18 – Perfil de carga quadrática com a velocidade.

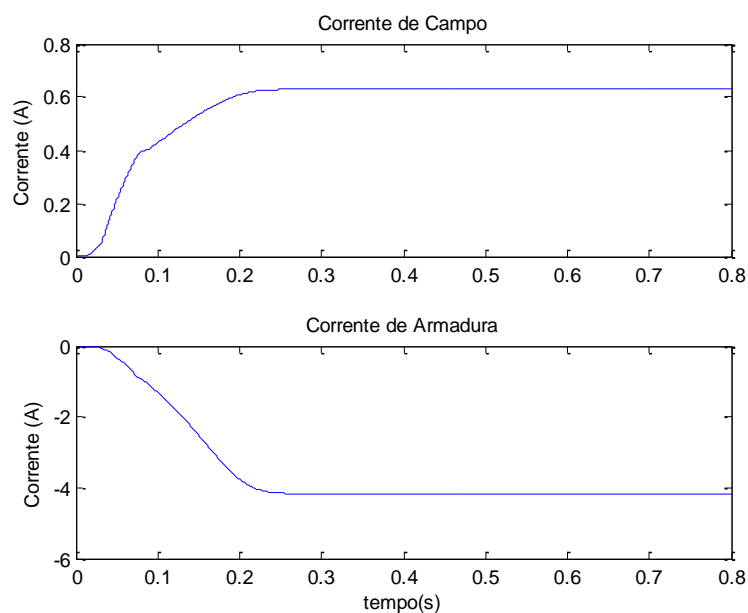
A Figura 5.19 ilustra o desempenho do controlador para a geração de perfis de cargas quadráticas com a velocidade. Assim como no caso da simulação anterior com a carga linear, observa-se um pequeno desvio entre o torque de referência e o torque gerado pelo GCC, porém, com menor intensidade. Comparando-se a curva quadrática da Figura 5.18 com a curva

linear da Figura 5.14, nota-se que a primeira apresenta uma curva mais suave, o que resulta no menor desvio durante a partida.



**Figura 5.19 – Desempenho do controle de geração de carga para cargas quadráticas.**

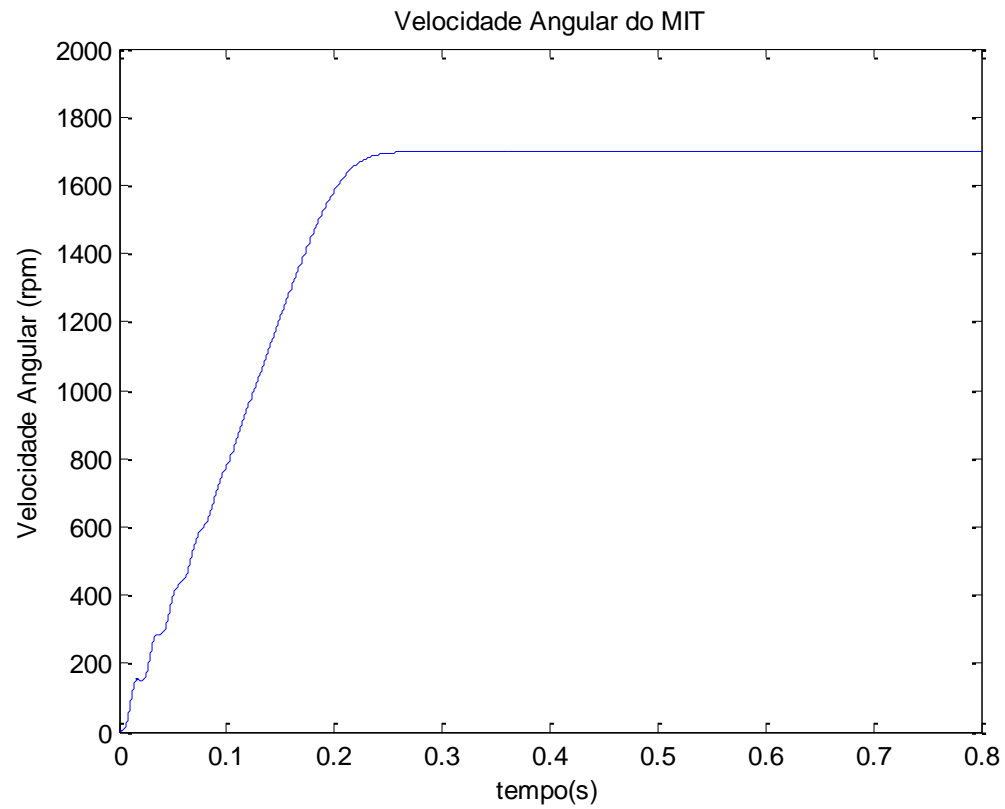
Os gráficos que ilustram as variações da corrente de campo e de armadura ao longo do ensaio estão apresentados na Figura 5.20.



**Figura 5.20 – Correntes de armadura e de campo.**



A Figura 5.21 ilustra a velocidade angular do eixo ao longo da simulação computacional.



**Figura 5.21 – Velocidade angular do eixo ao longo do ensaio.**

### 5.3 Acionamento Chaveado do GCC

Uma simulação adicional foi realizada com intuito de viabilizar a implementação do sistema e verificar a possibilidade de aperfeiçoamento da curva de torque em relação à referência nos primeiros instantes de atividade do motor de indução, onde foi constatada uma região de maior desvio.

Para tanto, adicionou-se ao sistema um bloco gerador PWM, o qual tem a função de chavear um conversor. Esse bloco, como pode ser observado na Figura 5.22, tem como sinal modulante o próprio valor da tensão de campo ( $V_f$ ) advindo do subsistema “Controlador de Torque”. O conversor é representado pelo bloco “*Universal Bridge*”, tendo como elemento chaveador um IGBT.

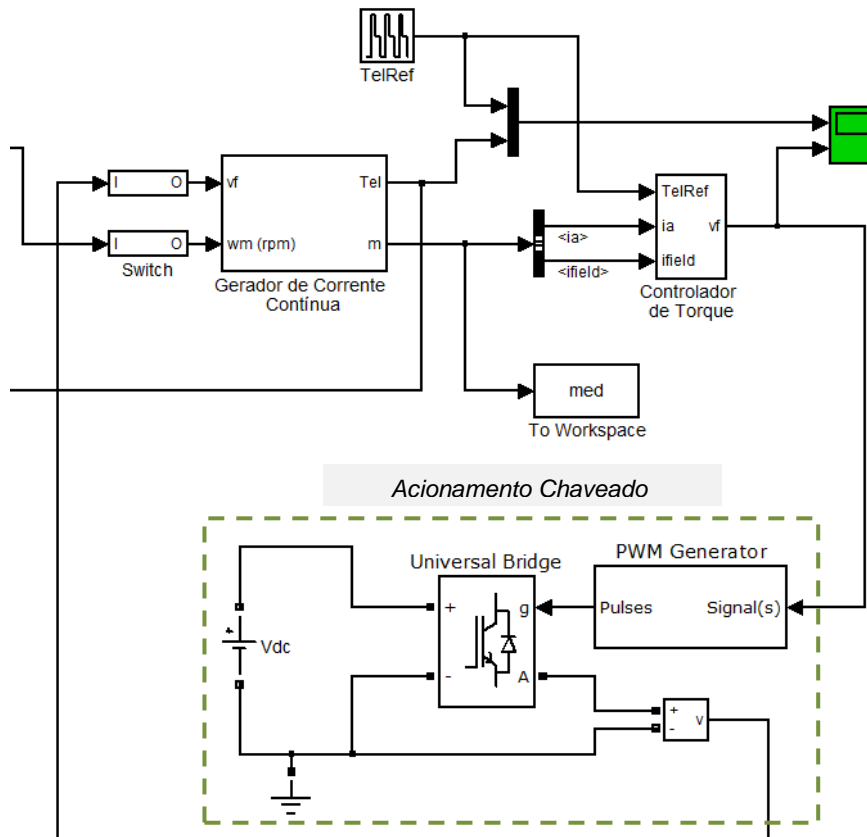


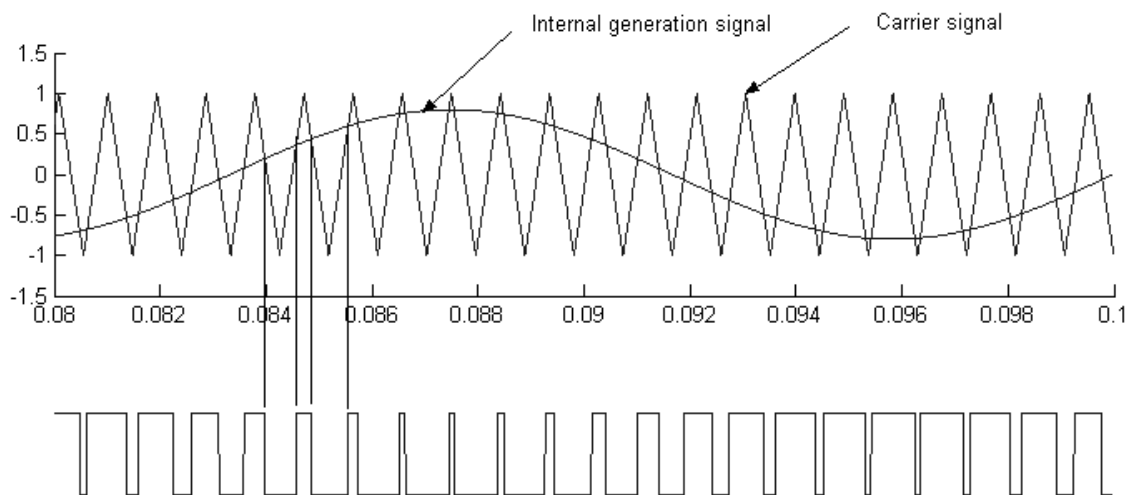
Figura 5.22 – Adição dos blocos PWM e *Universal Bridge* para simulação.

Apesar do sistema até então simulado se mostrar funcional e apresentar um comportamento bem próximo ao esperado, a utilização do mesmo em um projeto real mostra algumas limitações quanto ao controle da potência fornecida para a obtenção dos perfis de carga necessários. Isso acontece, pois é economicamente inviável utilizar um dispositivo de potência

que controle de forma contínua e linear o fornecimento de potência ao enrolamento de campo. Em outras palavras, tem-se na saída do bloco “Controlador de Torque”, valores de tensão que teoricamente obteriam o controle necessário, porém, a utilização do mesmo num projeto real se tornaria inviável.

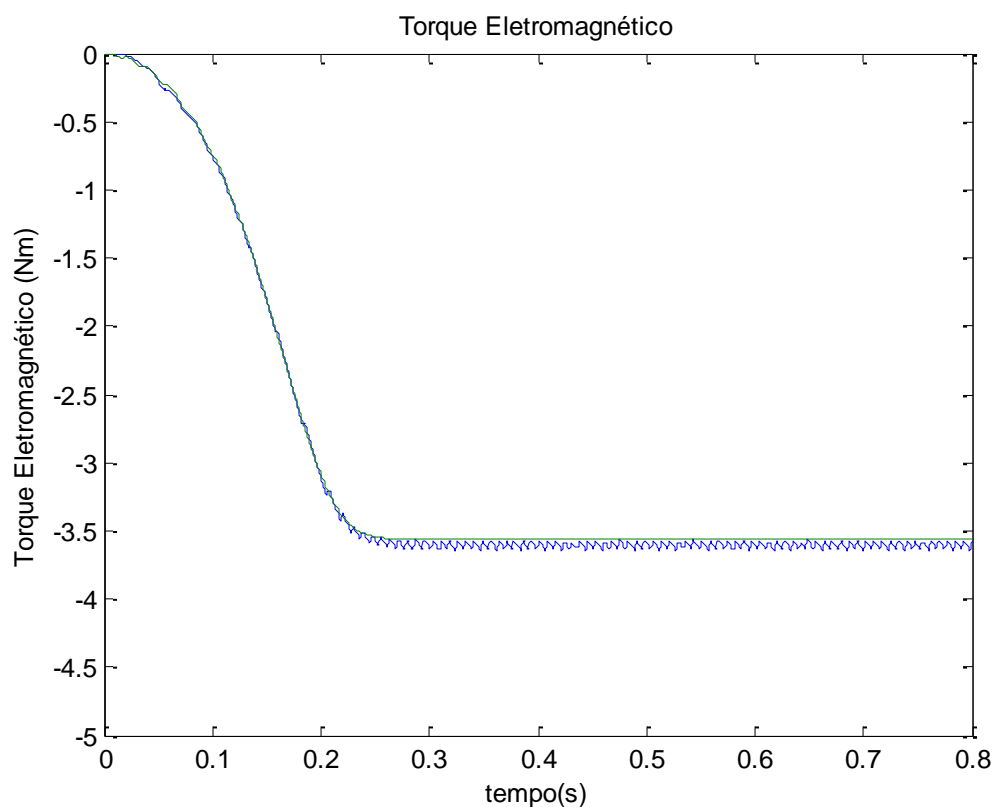
Como solução para o problema citado, propõe-se neste trabalho a utilização de um módulo PWM, que a partir da tensão de referência oriunda do bloco “Controlador de Torque”, modularia a largura de pulsos de um conversor chaveado, o qual por sua vez alimenta o enrolamento de campo do gerador de corrente contínua.

No bloco PWM, o sinal de entrada é então comparado com uma onda portadora, a qual foi estabelecida com frequência de 4 kHz, e baseado na altura em que o sinal de referência cruza a mesma, gera-se um pulso com uma largura referente ao ponto de intersecção. Este comportamento é ilustrado na Figura 5.23.



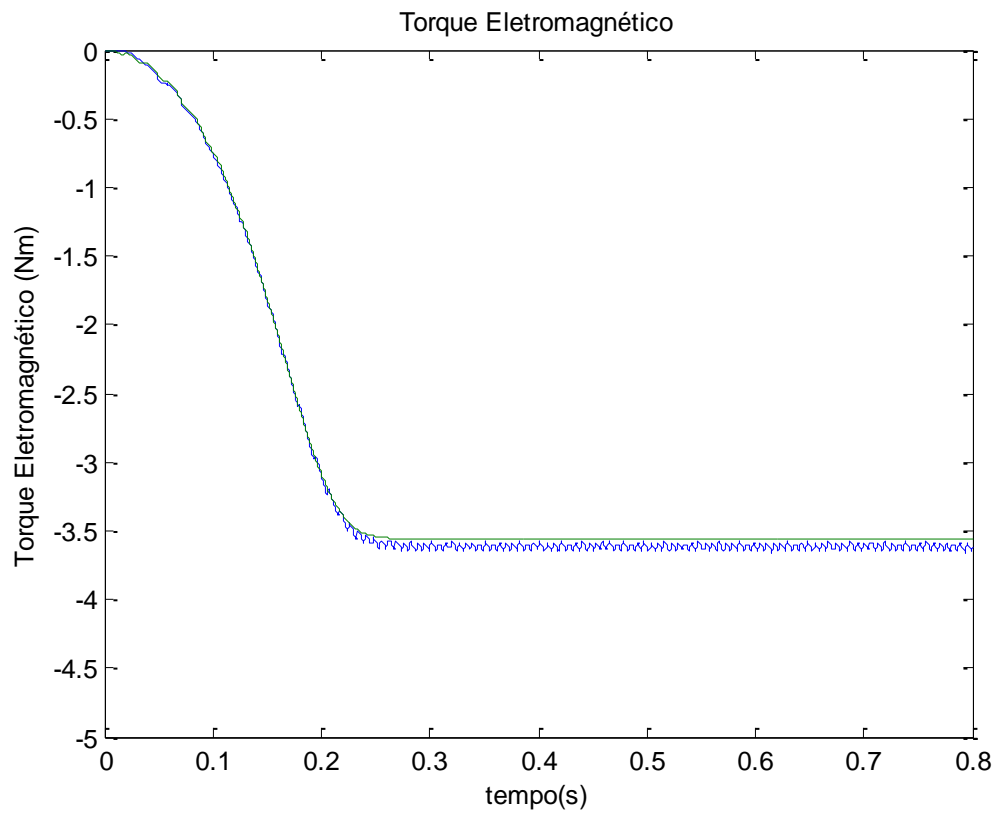
**Figura 5.23 – Comportamento do módulo gerador do pulso PWM.**

Diversas simulações foram realizadas com a estrutura apresentada na Figura 5.22. Para o padrão de carga quadrática, como pode ser verificado na Figura 5.24, constatou-se uma considerável melhora na resposta do motor em relação à simulação efetuada anteriormente (Figura 5.19) para o mesmo perfil de carga. O desvio que se mostrou mais acentuado nos primeiros 0.5 segundos da simulação anterior (sem o chavemanento), causado pela própria dinâmica de partida do MIT e pelo atraso de corrente do enrolamento de campo devido a sua constante de tempo, foi bastante reduzido. Essa redução acontece, pois o processo de chaveamento ameniza as características intrínsecas da MCC e consegue gerar uma maior e mais rápida variação na intensidade de torque em um curto espaço de tempo.



**Figura 5.24 – Resposta para cargas quadráticas com acionamento chaveado.**

Uma melhoria ainda maior foi verificada para cargas com o perfil linear, conforme mostra a Figura 5.25, em relação ao ensaio anterior sem o sistema de chaveamento (Figura 5.15). A justificativa para essa melhora é a mesma apresentada para a carga com perfil quadrático.



**Figura 5.25 – Resposta para cargas lineares com acionamento chaveado.**

Cabe destacar que outras grandezas envolvidas no sistema, como corrente de armadura ( $I_a$ ), corrente de campo ( $I_f$ ) e velocidade angular ao longo do eixo, não mostraram alterações no comportamento em relação a ensaios anteriores. As Figuras 5.26 (a) e (b) destacam essa observação.

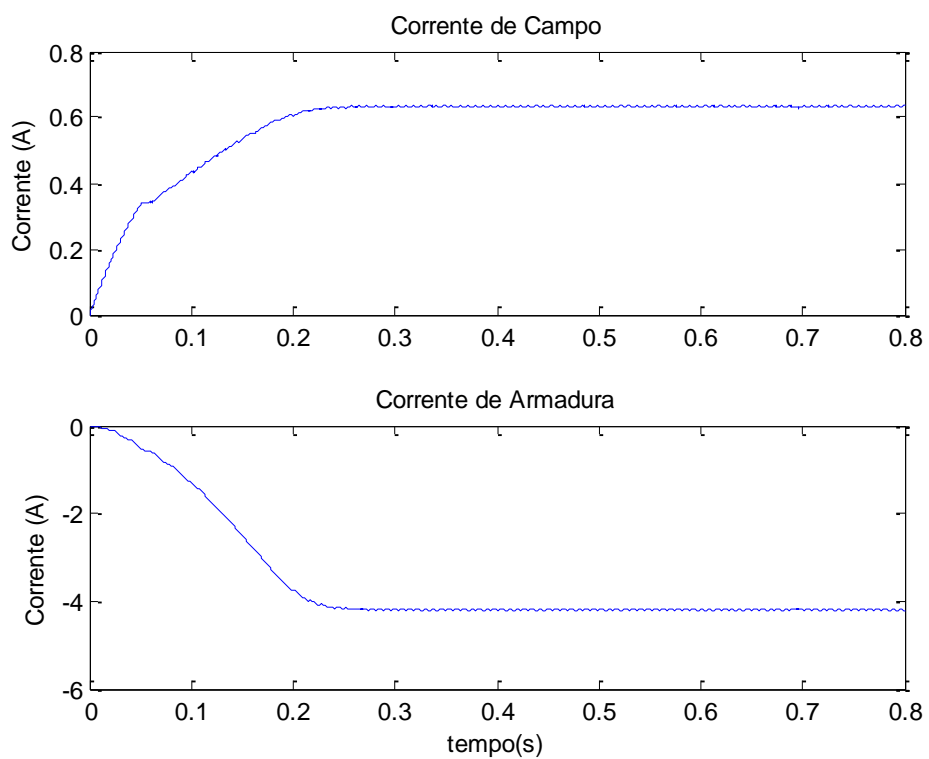


Figura 5.26 – Curvas de  $I_a$  e  $I_f$  com o chavamento.

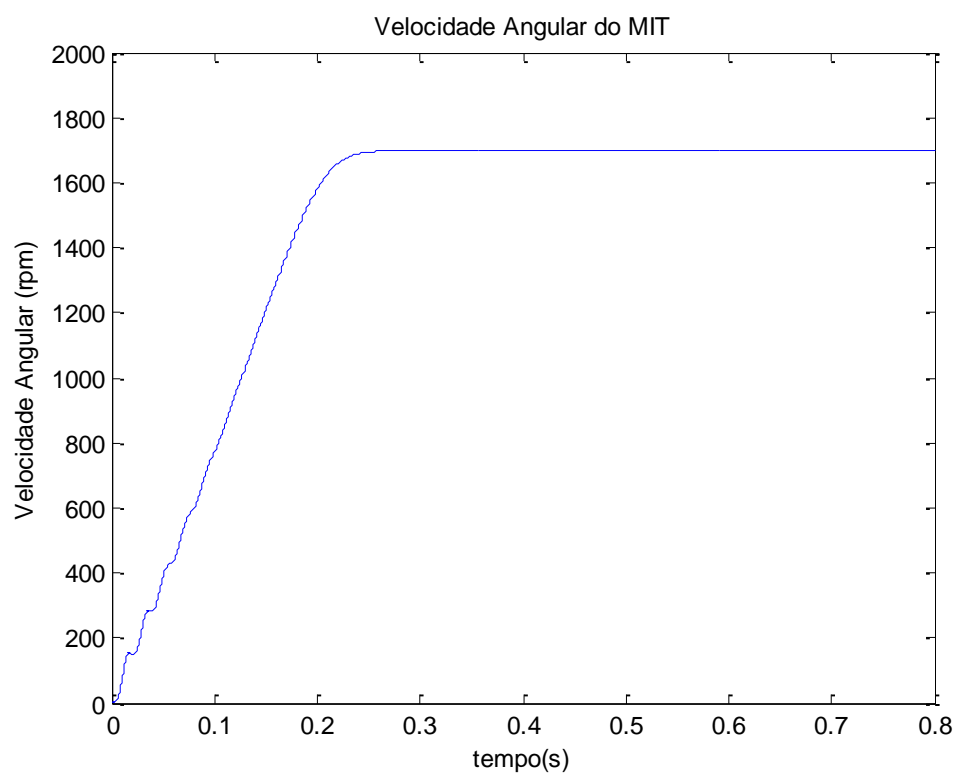


Figura 5.27 – Curva de velocidade angular no eixo do MIT

Pôde-se também constatar por meio das diversas simulações, que para os outros perfis de carga (constante, degrau e inversa), a melhora na aproximação não é tão notável. Primeiramente, pois a aproximação já havia se mostrado bastante razoável e adicionalmente, pois nos perfis do tipo quadrático e linear a curva se mostra bastante suave sem transições bruscas de torque.

Portanto, com a introdução dos blocos que compõem o subsistema de acionamento chaveado do enrolamento de campo do GCC, além de se verificar uma melhoria da resposta na região mais crítica de alguns perfis, o modelo em estudo foi convertido num projeto funcional e possível de ser implementado em bancada.





---

## 6. CONCLUSÃO GERAL E ETAPAS FUTURAS

---

### 6.1 *Conclusão Geral*

---

O projeto em execução teve como meta principal o desenvolvimento de um sistema de geração de perfis de carga para dimensionamento eficiente de motores de indução a partir de uma Máquina de Corrente Contínua.

A bancada experimental estudada (equipamentos de medição, placas de aquisição, sensores, materiais de consumo, entre outros) advinda da execução deste projeto, em conjunção com a montagem de uma plataforma flexível para ensaios de máquinas elétricas, tem permitido o desenvolvimento pleno e contínuo do projeto em relação aos propósitos traçados para a referida pesquisa.

Ressalta-se a importância dentro desse projeto de se desenvolver uma modelagem matemática adequada para GCC e o embasamento teórico relacionado aos principais tipos de cargas industriais acopladas ao motor de indução. Isso porque se objetiva a implementação de um sistema prático, baseado em um GCC que, acoplado ao eixo do MIT, simule os principais padrões de conjugado de carga existente.

As simulações computacionais apresentadas contribuíram para validar o modelo de geração de perfis de carga proposto, demonstrando a resposta do sistema para os diversos tipos de cargas que podem ser comumente encontradas acopladas ao eixo de um Motor de Indução Trifásico.

### 6.2 *Sugestões de Trabalhos Futuros*

---

Levando-se em consideração a continuidade do desenvolvimento do projeto, a proposição de um próximo módulo a ser desenvolvido, seria:

**Módulo 4 :: Implementação do Sistema de Geração de Perfis de Carga Através da MCC**

Assim, com o desenvolvimento desse módulo, o sistema consolidado propiciará a modernização dos processos de dimensionamento de motores a partir da simulação do padrão de carga aplicado ao eixo do motor, proporcionando um correto dimensionamento do motor e evitando a utilização de métodos complexos, como o emprego de torquímetros no eixo de rotação do motor.

---

## 7. PUBLICAÇÕES CIENTÍFICAS

---

### 7.1 *Introdução*

---

Este capítulo fornece algumas informações complementares sobre alguns itens de produtividade científica do grupo responsável pela execução da pesquisa, os quais foram viabilizados por meio dos resultados advindos do desenvolvimento do presente projeto.

Entre as principais atividades desenvolvidas de pesquisa, podem-se destacar as publicações e divulgações dos resultados que estão sendo obtidos a partir das pesquisas realizadas.

### 7.2 *Publicações Científicas*

---

Os resultados das pesquisas realizadas, durante o decorrer do projeto, foram publicados em revistas científicas e em diversos congressos nacionais e internacionais. A lista das principais publicações efetuadas pelo grupo responsável pela pesquisa está como segue:

#### 7.2.1 *Publicações em Congressos Internacionais*

A principal publicação realizada em congresso internacional é enumerada a seguir:

SUETAKE, M. ; SILVA, I. N. ; GOEDTEL, A. ; TEIXEIRA NETO, F. A. ; SALVAIA, D. .  
Industrial Load Torque Generation for Electric Machines Using Fuzzy Voltage Control  
Strategy of DC Machine Field Winding. In: 12th IEEJ/IEEE International Conference on  
Electrical Machines and Systems, 2009, Tokyo. Proceedings of the 12th IEEJ/IEEE  
International Conference on Electrical Machines and Systems (CD-ROM // Paper No. LS6E-  
4 // 06 Páginas), 2009, 2009

### 7.2.2 Publicações em Congressos Nacionais

As principais publicações realizadas em congressos nacionais são enumeradas a seguir:

TEIXEIRA NETO, F. A. ; SILVA, I. N. ; SUETAKE, M. ; GOEDTEL, A. . Geração de Perfis de Cargas Industriais Mediante o Controle PWM da Tensão de Campo do Gerador de Corrente Contínua. In: 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Application, 2009, Bauru-SP. Anais do 8th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Applications (DINCON // CD-ROM // Paper No. 06-Neto // 09 Páginas), 2009.

TEIXEIRA NETO, F. A. ; SILVA, I. N. ; SUETAKE, M.. Geração de Perfis de Cargas Industriais Mediante o Controle PWM da Tensão de Campo do Gerador de Corrente Contínua. In: 17º Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP - SIICUSP, 2009, São Paulo.

SUETAKE, Marcelo ; SILVA, Ivan Nunes ; GOEDTEL, Alessandro ; TEIXEIRA NETO, Filipe Abdalla . Aplicação de Sistema de Controle Fuzzy Para Geração de Perfis de Cargas Industriais em Máquinas Elétricas de Bancadas Experimentais. In: XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010, Bonito. Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Automática, 2010. p. 2631-2636.

---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

---

BRITO, R. M. (1994). Sistema Eletro-Eletrônico para Medição de Torque em Dispositivos Girantes Utilizando Extensômetro de Resistência Elétrica, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS/PPGEMM).

COPPE. (2008). Instituto Alberto Luiz Coimbra de Pós-Graduação e Pesquisa de Engenharia - COPPE, Programa de Planejamento Energético, Climate Change: Energy Security, Final Report.

DIAS, L. P. C. e LOBOSCO, O. S. (1988). Motores Elétricos: Seleção e Aplicação, McGraw-Hill.

EPE. (2009). Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Resenha Mensal do Mercado de Energia Elétrica, Ano II, Numero 18.

EPE. (2008). Empresa de Pesquisa Energética (EPE), Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), 2ª Revisão Quadrimestral das Projeções da demanda de energia elétrica do Sistema Interligado Nacional 2008-2012, pp. 57.

FITZGERALD, A. E. (1979). Máquinas Elétricas, McGraw-Hill.

GOEDEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, P. J. A. (2007a). Intelligent System Based Speed Estimation of Induction Motors for Industrial Sensorless Schemes, 16th IEEE International Conference on Control Applications, pp. 1108-1112, Singapore.

GOEDEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, P. J. A. (2007b). Neural Approach for Induction Motor Load Torque Identification in Industrial Application, 16th IEEE International Conference on Control Applications, pp. 470-484, Singapore.

GOEDEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, P. J. A. (2006a). Speed Estimation for Sensorless Technology Using Recurrent Neural Networks and Single Current Sensor, IEEE International Conference on Power Electronics, pp. 1-5, Singapore.

GOEDEL, A.; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, P. J. A. (2006b). "Torque and Speed Estimator for Sensorless Induction Motor Drive Using Cascade Neural Networks", IEEE International Conference on Industrial Electronics and Applications, pp. 1-6.

GOEDEL, A. (2003). Estimativa de Conjugado de Carga Aplicado em Eixos de Motores de Indução Trifásico Através de Redes Neurais Artificiais, Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP/PPGEI), Bauru - SP.

HUBERT, C. I. (1991). Electric Machines, Macmillan Publishing Company.

MINOTTI, Cristiano; SILVA, Ivan Nunes da ; SUETAKE, Marcelo ; GOEDEL, A. (2007). Estimador de Velocidade Sensorless Para Máquinas de Indução Trifásicas Usando Lógica Fuzzy, Proceedings of 6th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications, pp. 1417-1425.

NIED, A.; OLIVEIRA; R. F. de Campos; DIAS, R. P.; MARQUES, L. C. de Souza. (2008). Soft Starting of Induction Motor with Torque Control, Industry Applications Society Annual Meeting, IEEE, pp.1 – 6.

SALVAIA, Diego. (2008). Geração de Perfis de Carga Através da Máquina de Corrente Contínua, Trabalho de Conclusão de Graduação, Universidade de São Paulo (USP/EESC), São Carlos - SP.

SALVAIA, Diego. (2007). Sistemas Inteligentes Aplicados em Automação de Processos. In: XV Simpósio Internacional de Iniciação Científica da USP (SIICUSP), São Carlos-SP.

SILVA, Sérgio Ferreira ; SUETAKE, Marcelo e SILVA, Ivan Nunes da ; GOEDEL, A. (2007). Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução Usando Abordagem Baseada em Sistemas Fuzzy, Proceedings of 6th Brazilian Conference on Dynamics, Control and Their Applications, pp. 1465-1472.

SUETAKE, Marcelo. (2008) Implementação de Sistemas Inteligentes em Processadores Digitais para Controle de Máquinas Elétricas Rotativas, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo (USP/EESC), São Carlos - SP.





## APÊNDICE: PARÂMETROS DA MCC

A seguir são apresentados os parâmetros da Máquina de Corrente Contínua utilizados nas simulações computacionais realizadas durante todo o desenvolvimento deste trabalho. Estes parâmetros foram obtidos por meio da documentação do motor e de ensaios realizados no laboratório.

<b>Resistência de Armadura:</b>	$R_{a(\text{frio})} = 4,104 \, \Omega;$	$R_{a(\text{quente})} = 4,1814 \, \Omega$
<b>Fluxo Mútuo:</b>	$M = 1,358 \, \Omega$	
<b>Indutância de Armadura:</b>	$L_{a1} = 0,0196 \, H;$	$L_{a2} = 0,0170 \, H;$
		$L_{a(\text{média})} = 18,3 \, mH$
<b>Momento de Inércia:</b>	$J = 0,0083$	
<b>Resistência do Enrolamento de Campo:</b>	$R_{f(\text{frio})} = 194,253 \, \Omega;$	$R_{f(\text{quente})} = 212,7 \, \Omega$
<b>Indutância do Enrolamento de Campo:</b>	$L_f = 17,2 \, H$	
<b>Resistência de Armadura:</b>	$R_L = 32,3 \, \Omega$	
<b>Corrente nominal de Armadura:</b>	$I_A = 10 \, A$	
<b>Tensão nominal de Armadura:</b>	$V_A = 250 \, V$	
<b>Corrente nominal de Campo:</b>	$I_E = 0,75 \, A$	
<b>Tensão nominal de Campo:</b>	$V_E = 190 \, V$	