



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RAFAEL DA SILVA DE SOUSA

**CONTROLE DA MALHA DE TORQUE COM ACIONAMENTO DE VELOCIDADE
APLICADO A UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE MOTORES**

FORTALEZA

2019

RAFAEL DA SILVA DE SOUSA

CONTROLE DA MALHA DE TORQUE COM ACIONAMENTO DE VELOCIDADE
APLICADO A UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE MOTORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S698c Sousa, Rafael da Silva de.
Controle da malha de torque com acionamento de velocidade aplicado a uma bancada experimental para ensaio de motores / Rafael da Silva de Sousa. – 2019.
61 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Elétrica, Fortaleza, 2019.
Orientação: Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia.
1. Bancada de motores. 2. Perfil de carga. 3. Controle de torque. 4. Controle PI RST. 5. Motor de indução trifásico. I. Título.

CDD 621.3

RAFAEL DA SILVA DE SOUSA

CONTROLE DA MALHA DE TORQUE COM ACIONAMENTO DE VELOCIDADE
APLICADO A UMA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE MOTORES

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Curso de Graduação em Engenharia Elétrica do
Centro de Tecnologia da Universidade Federal
do Ceará, como requisito parcial à obtenção do
grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Aprovada em: 28/06/2019.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Wilkley Bezerra Correia. (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Victor de Paula Brandão Aguiar
Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA)

Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico este trabalho à Deus.

Aos meus pais, Dona Ceiza e Seu Narcélio.

À meu primo Lucas.

Ao meu avô Juca (*in memoriam*).

Aos meus amigos do grupo Gabirus.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, à Deus, por ter possibilitado a realização deste trabalho com saúde.

Aos meus pais, Dona Ceiça e Seu Narcélio, os quais sempre me deram todo o apoio que precisei.

Ao meu avô Juca (*in memoriam*), cujo sonho era ver um de seus netos se formando em Engenharia.

Aos meus amigos do grupo Gábitus Alados: Allan Gomes, Filipe Marques, Mateus Pinheiro, Raimundo Jackson (Jack), Hallison Lima, Jucelino Taleires e Vinícius Alexandre, os quais me proporcionaram muitos momentos de alegrias e risadas, tornando essa caminhada mais leve.

Ao meu orientador Wilkley Correia, cujo apoio, orientação e motivação foram cruciais para a construção deste trabalho.

Aos meus amigos Jucelino Taleires e Vinícius Alexandre, por estarem sempre me dando apoio e contribuindo com uma amizade genuína.

Aos professores que me inspiraram nessa jornada. São os professores: Abrãao Saraiva, Tobias Rafael, Wilkley Correia, Ruth Leão, Raimundo Furtado, Sérgio Daher, José Afonso e Carlos Gustavo.

Ao professor Victor de Paula, por ter me ajudado bastante, no início deste trabalho, ao mostrar o funcionamento da bancada, cujo o mesmo a desenvolveu.

Aos colegas do laboratório LAMOTRIZ, por terem me acolhido nessa reta final e por terem me proporcionado um ambiente propício para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao técnico de laboratório do LAMOTRIZ, Eduardo Costa, por ter me ajudado no dia a dia com a parte prática e pelos momentos de descontração.

Ao Marcus Davi, por ter me auxiliado várias vezes com seus conhecimentos práticos e teóricos, bem como sua experiência computacional.

Aos membros da banca, professor Ricardo Thé e professor Victor de Paula pelas contribuições visando a melhoria da versão final deste documento.

Ao Ednardo Moreira Rodrigues e ao Alan Batista de Oliveira, pela adequação da *template* utilizada neste trabalho para que o mesmo ficasse de acordo com as normas da biblioteca da Universidade Federal do Ceará (UFC).

"Se um dia tiver que escolher entre o mundo e o amor, lembre-se: Se escolher o mundo, ficará sem o amor, mas se escolher o amor, com ele você conquistará o mundo."

(Albert Einstein)

RESUMO

Este trabalho apresenta uma bancada experimental para ensaio de motores e exhibe a implementação de uma estratégia de controle digital aplicada à malha de torque de um motor de indução trifásico, o qual tem a velocidade como variável de controle. Através de uma placa de aquisição de dados e um computador com pacote computacional de matemática, é implementado um controlador de torque constante, de forma assíncrona, em cascata com a malha de velocidade do inversor da bancada, o qual é capaz de regenerar energia e devolvê-la à rede elétrica. Se faz necessário identificar o modelo do sistema de velocidade da bancada através de um sinal APRBS. Efetua-se o dimensionamento deste sinal de acordo com o ponto de operação da bancada de testes e de posse do modelo estimado, projeta-se e sintoniza-se um controlador PI seguindo uma estrutura RST. Os resultados da implementação prática são muito semelhantes àqueles observados em simulação, o que mostra a eficácia do controle aplicado, na emulação de perfis de torque constante de carga. O controlador aqui apresentado é suficientemente robusto em relação a perturbações que, neste trabalho, foram obtidas impondo-se redução na tensão de alimentação do motor em teste.

Palavras-chave: Bancada de motores. Perfil de carga. Controle de torque. Controle de velocidade. Controle PI RST. Motor de indução trifásico. Identificação de sistemas. APRBS. PRBS.

ABSTRACT

This work presents an experimental motor test bench and exhibits the implementation of a digital control strategy applied to the torque loop of a three-phase induction motor, which has speed as a control variable. Through a data acquisition board and a computer with mathematical computational package, a constant torque controller is implemented, asynchronously, in cascade with the loop speed of the bench inverter, which is capable of regenerate energy and returns it to the power grid. It is necessary to identify the bench speed system model through an APRBS signal. This signal is designed according to the operating point of the test bench and in possession of the estimated model, a PI controller is designed and tuned following an RST structure. The results of the practical implementation are very similar to those observed in simulation, which shows the effectiveness of the applied control on the constant load torque profiles emulation. The controller presented here is sufficiently robust before disturbances which, in this work, were achieved by imposing a supply voltage reduction on the motor under test.

Keywords: Motor test bench. Load profile. Torque control. Speed control. PI RST Control. Three-phase induction motor. Systems identification. APRBS. PRBS.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Bancada de experimental de ensaio de motores	22
Figura 2 – Modelo do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo empregado	24
Figura 3 – Classificação dos conversores de energia: conversor de primeiro quadrante (1), conversor de segundo quadrante (2), conversor de primeiro e segundo quadrantes (3), conversor de terceiro e quarto quadrantes (4) e conversor de quatro quadrantes (5)	25
Figura 4 – Módulo de Potência <i>PM250</i> (1), Unidade de Controle <i>CU240B-2</i> (2), Painel Operador Básico <i>BOP-2</i> (3) e Inversor Completo (4)	26
Figura 5 – Transdutor de torque <i>MAGTROL</i> [®] <i>TM307</i>	27
Figura 6 – <i>Display</i> de torque <i>MAGTROL</i> [®] <i>TM3411</i>	28
Figura 7 – Placa de aquisição de dados <i>NATIONAL INSTRUMENTS</i> [™] <i>USB-6009</i>	29
Figura 8 – Disposição dos componentes mecânicos da bancada	30
Figura 9 – Diagrama de blocos do controle vetorial sem <i>encoder (sensorless)</i>	31
Figura 10 – Representação dos principais componentes da bancada e suas conexões	33
Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema com a malha de torque em cascata com a malha de velocidade	35
Figura 12 – Sinal <i>Pseudo Random Binary Signal (PRBS) (Pseudo Random Binary Signal)</i> utilizado na excitação de uma planta genérica	37
Figura 13 – Sinal de excitação <i>Analog Pseudo Random Binary Signal (APRBS) (Analog Pseudo Random Binary Signal)</i> com 60 níveis aleatórios	37
Figura 14 – Resposta da planta a ser identificada a uma entrada <i>APRBS</i>	38
Figura 15 – Gráfico da função de autocorrelação do sinal <i>APRBS</i> de 60 níveis	39
Figura 16 – Resposta da planta a ser identificada a uma entrada degrau unitário	40
Figura 17 – Sinal de entrada <i>APRBS</i> (velocidade) e sinal de saída (torque)	41
Figura 18 – Sinal de entrada <i>APRBS</i> (velocidade) e sinal de saída (torque) (sem a componente <i>CC</i>)	42
Figura 19 – Sinal de saída tratado e sinal estimado com exatidão de 89,6%	43
Figura 20 – Gráfico do Plano- <i>z</i> contendo o polo de malha aberta da planta identificada	45
Figura 21 – Gráfico do lugar das raízes de um controlador Proporcional Integral (<i>PI</i>) com o zero à direita do polo da planta	46

Figura 22 – Gráfico do lugar das raízes de um controlador PI com o zero à esquerda do polo da planta	47
Figura 23 – Diagrama de blocos de um controlador digital na estrutura canônica <i>Reference Signal Tracking (RST)</i>	47
Figura 24 – Diagrama de blocos do controlador PI projetado na estrutura canônica <i>RST</i> .	52
Figura 25 – Gráfico do plano Z mostrando os polos e zeros de $G(z^{-1})$ e de $H_{CL}(z^{-1})$. .	52
Figura 26 – Gráfico comparativo entre as respostas de malha aberta [$G(z^{-1})$] e controlada [$H_{CL}(z^{-1})$]	53
Figura 27 – Gráfico dos resultados experimentais do controle de torque vs. resultados simulados	55
Figura 28 – Gráfico dos resultados experimentais do controle de torque com ênfase na perturbação aplicada	56
Figura 29 – Controle de velocidade por variação da tensão de linha de um motor de indução	57

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Componentes da bancada experimental para ensaio de motores	23
Tabela 2 – Medições realizadas no Motor Sob Ensaio (MSE) durante os ensaios, emulando-se carga nominal e constante, sob regime de operação à frio.	24
Tabela 3 – Especificações de desempenho PI (<i>RST</i>)	50
Tabela 4 – Parâmetros da função de transferência de desempenho	50
Tabela 5 – Parâmetros do controlador de torque	51

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<i>APRBS</i>	<i>Analog Pseudo Random Binary Signal</i>
<i>ARX</i>	<i>Autoregressive with Exogeneous Inputs</i>
<i>BNC</i>	<i>Bayonet Neill Concelman</i>
<i>ISE</i>	<i>Integral Square Error</i>
<i>LSE</i>	<i>Least Square Estimator</i>
<i>PRBS</i>	<i>Pseudo Random Binary Signal</i>
<i>RST</i>	<i>Reference Signal Tracking</i>
<i>USB</i>	<i>Universal Serial Bus</i>
<i>ZOH</i>	<i>Zero-Order Hold</i>
CLP	Controlador Lógico Programável
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
DT	<i>Display</i> de Torque
INVT4Q	Inversor Trifásico de 4 Quadrantes
LAMOTRIZ	Laboratório de Sistemas Motrizes
LQG	Linear Quadrático Gaussiano
ME	Motor Emulador
MSE	Motor Sob Ensaio
PAD	Placa de Aquisição de Dados
PI	Proporcional Integral
PID	Proporcional Integral Derivativo
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
TT	Transdutor de Torque
UFC	Universidade Federal do Ceará

LISTA DE SÍMBOLOS

V_L	Tensão na carga em volts
v_L	Tensão na carga em volts
I_L	Corrente na carga em amperes
i_L	Corrente na carga em amperes
i_d	Corrente de referência no eixo direto
i_q	Corrente de referência no eixo em quadratura
v	Tensão em volts
i	Corrente em amperes
ω_{ref}	Velocidade de rotação de referência
$\omega_{saída}$	Velocidade de rotação do eixo medida
τ	Constante de tempo de uma resposta ao degrau
$r(k)$	Sinal de referência no tempo discreto
$u(k)$	Sinal de controle no tempo discreto
$e(k)$	Sinal de erro no tempo discreto
$y(k)$	Sinal de saída no tempo discreto
K_c	Ganho do controlador PI no tempo discreto
z_c	Zero do controlador PI no tempo discreto
z_p	Polo do controlador PI no tempo discreto
$C(z)$	Controlador PI no tempo discreto
$R(z^{-1})$	Polinômio R da estrutura RST
$S(z^{-1})$	Polinômio S da estrutura RST
$T(z^{-1})$	Polinômio T da estrutura RST
$H_{CL}(z^{-1})$	Função de transferência sistema em malha fechada
$B(z^{-1})$	Polinômio do numerador de $G(z^{-1})$
$A(z^{-1})$	Polinômio do denominador de $G(z^{-1})$
$P_{CL}(z^{-1})$	Polinômio característico do denominador de $H_{CL}(z^{-1})$

$Z_{CL}(z^{-1})$	Polinômio característico do numerador de $H_{CL}(z^{-1})$
$G_{des}(z^{-1})$	Função de transferência desejada no tempo discreto
$G_{des}(s)$	Função de transferência desejada no tempo contínuo
ω	Frequência natural em <i>rad/s</i>
ζ	Fator de amortecimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	Justificativa	17
1.2	Objetivos Gerais	18
1.2.1	<i>Objetivos Específicos</i>	19
1.3	Organização do trabalho	19
2	DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE MOTORES	21
2.1	Histórico	21
2.2	Visão Geral	22
2.3	Motores de indução trifásicos	23
2.4	Inversor trifásico	24
2.4.1	<i>Tipos de operação de um inversor</i>	24
2.4.2	<i>Inversor de 4 quadrantes</i>	26
2.5	Transdutor de torque	27
2.6	<i>Display de torque</i>	28
2.7	Placa de aquisição de dados	28
2.8	Outros componentes	29
2.9	Funcionamento da bancada de ensaios	29
2.9.1	<i>Visão geral</i>	30
2.9.2	<i>Acionamento do INVT4Q e do ME</i>	30
2.9.3	<i>Acionamento do MSE</i>	32
2.9.4	<i>Fluxo de dados</i>	33
2.9.5	<i>Desligamento da bancada</i>	34
2.10	Considerações finais	34
3	IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DA BANCADA	35
3.1	Introdução	35
3.2	Identificação da planta	36
3.2.1	<i>Sinais de excitação</i>	36
3.2.2	<i>Metodologia</i>	38
3.2.2.1	<i>Planta a ser identificada</i>	38

3.2.2.2	<i>Escolha do sinal de excitação</i>	39
3.2.2.3	<i>Dimensionamento do sinal APRBS</i>	40
3.2.2.4	<i>Implementação do sinal APRBS</i>	41
3.2.2.5	<i>Resultados</i>	41
4	CONTROLE DE TORQUE	44
4.1	Introdução	44
4.2	Projeto do controlador de torque	44
4.2.1	<i>Topologia RST</i>	47
4.2.2	<i>Controlador PI na estrutura RST</i>	49
4.2.2.1	<i>Especificações de desempenho desejadas</i>	49
4.2.2.2	<i>Cálculo dos parâmetros do controlador</i>	50
4.2.3	<i>Implementação do controlador de torque</i>	51
5	RESULTADOS	54
5.1	Execução do controlador	54
5.2	Resultados experimentais	54
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	58
6.1	Conclusões	58
6.2	Trabalhos futuros	59
	REFERÊNCIAS	61

1 INTRODUÇÃO

Existe uma crescente necessidade de se avaliar o desempenho de motores elétricos em diferentes tipos de aplicações, cujo torque e/ou velocidade possam mudar ao longo de uma ampla gama de valores (QUINTINO *et al.*, 2011). Atualmente, índices mínimos de rendimento são encorajados em motores sob carga variável (torque e velocidade) e alimentados por inversores visando melhor eficiência energética em sistemas motrizes (GYNTHER *et al.*, 2016; WAIDE; BRUNNER, 2011). A influência do inversor no desempenho do motor também requer uma investigação, e o uso de inversor comercial nesta aplicação já é objeto de estudo (Suchý *et al.*, 2016).

A emulação de sistemas mecânicos é realizada para observação do desempenho de motores sob condições reais de operação. Nesse contexto, o uso de técnicas de acionamento constitui prática comum, desde o controle vetorial de velocidade, o controle direto de torque e o controle de posição (de Oliveira *et al.*, 2018). Dessa forma, sistemas dinâmicos complexos podem ser emulados com precisão de maneira segura, econômica e com ciclos de repetição de acionamento. Além disso, a emulação de sistemas mecânicos com acionamentos elétricos permite que informações vitais sobre interações eletromecânicas sejam obtidas (Song-Manguelle *et al.*, 2018).

Entretanto, o projeto, controle e operação um sistema motriz, pode ser realizado em laboratório, utilizando-se uma bancada para ensaios de motores. Dessa forma, a medição de rendimento nas máquinas pode ser obtida a partir da emulação de cargas mecânicas reais, em ambientes controlados, semelhante às apresentadas por Quintino *et al.* (2011) e Agamloh *et al.* (2011). Assim, com o propósito de emular um perfil de carga desejado, se faz necessário garantir que o torque desenvolvido em bancada seja também controlado.

1.1 Justificativa

Dada a necessidade de se estudar o comportamento, não só de perfis de carga clássicos como também perfis de carga genéricos, bem como realizar ensaios de medição de rendimento em motores de indução sob carga variável, utilizou-se uma bancada experimental para ensaio de motores inspirada nos trabalhos de Quintino *et al.* (2011) e Agamloh *et al.* (2011). Esta, encontra-se localizada em um laboratório controlado e com características híbridas entre um espaço de pesquisa e uma indústria.

A bancada experimental para ensaio de motores — pertencente ao Laboratório de Sistemas Motrizes Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ) da Universidade Federal do Ceará (UFC) — encontrava-se com alguns trabalhos realizados na área de eficiência energética em motores elétricos. Estes, resultaram em uma tese de doutorado de AGUIAR (2018) e um artigo de Aguiar *et al.* (2018). No entanto, verificou-se a necessidade de automação durante os ensaios, a fim de se otimizá-los. A partir desta demanda, pensou-se na utilização de técnicas de controle em malha fechada visando o controle de grandezas mecânicas além da velocidade.

Além disso, constatou-se a necessidade de estudos mais detalhados acerca dos equipamentos dispostos na bancada, bem como a documentação de suas funcionalidades mais relevantes. Conhecendo as potencialidades da estrutura, seria possível não só justificar estudos mais aprofundados na mesma como objetivá-la de acordo com aplicações demandadas pelas comunidades acadêmica ou industrial. Uma aplicabilidade seria a automação proposta por AGUIAR (2018).

Com o intuito de se emular perfis de carga mecânica na estrutura, se faz necessário o estudo minucioso desta, a escolha de um perfil de carga mais básico para emulação e uma forma de implementação do perfil escolhido. Esta pesquisa se justifica através do uso de técnicas de identificação de sistemas e de controle digital, a fim de se resolver essa demanda proposta, fazendo-se uso da bancada de testes de motores. Portanto, projetando-se um controle de torque para a emulação desses perfis de carga, torna-se possível o alinhamento desses estudos com as necessidades não só da comunidade acadêmica como da indústria.

Tendo em vista o que foi descrito, foi proposta a realização deste Trabalho de Conclusão de Curso (TCC), no qual aplica à bancada experimental para ensaio de motores, técnicas de identificação de sistemas e de controle digital — com ênfase neste último — com a perspectiva de um trabalho de aspectos práticos, porém com a fundamentação teórica clássica.

1.2 Objetivos Gerais

Neste trabalho, será projetado e implementado o controle de torque constante com atuação na malha de velocidade, ou seja, a saída do controlador de torque produz as referências da malha controlada de velocidade. Trata-se de um controle em cascata, sendo a malha de corrente a mais interna, enquanto a malha da variável mecânica (velocidade) posiciona-se mais externamente. No caso deste trabalho, a malha de torque é ainda mais externa do que a malha de velocidade.

Além disso, a estratégia de controle usada neste trabalho considera que as malhas de corrente e velocidade são implementadas diretamente embarcadas no inversor de frequência, enquanto a malha de torque é embarcada em um sistema de controle externo em microcomputador, com interface através de uma placa de aquisição de dados. Assim, a malha mais externa (torque) atua de forma assíncrona às internas (velocidade e corrente). E os sinais de controle da malha externa são as referências das malhas internas.

1.2.1 *Objetivos Específicos*

Os objetivos específicos do trabalho são:

1. Conhecer a estrutura da bancada, documentar as informações relevantes ao trabalho e entender o seu modo operacional;
2. Desenvolver algoritmos em pacote computacional de matemática, utilizando a biblioteca da *NATIONAL INSTRUMENTS*TM a qual é compatível;
3. Utilizar técnicas de identificação de sistemas para estimar o modelo matemático da bancada;
4. Projetar um controlador PI utilizando a estrutura *RST*;
5. Realizar a implementação prática do controlador, através da escrita de um algoritmos;
6. Verificar a robustez do controlador mediante à perturbações;
7. Coletar os resultados experimentais;
8. Analisar os resultados e fazer suas considerações.

1.3 **Organização do trabalho**

O texto está organizado em capítulos, permitindo uma abordagem sequencial lógica dos temas, conforme a seguinte estrutura:

- **Capítulo 1:** este capítulo introduz o trabalho, abordando os temas de forma sucinta, apresentando a motivação de sua realização, sua justificativa, seus objetivos e sua estruturação;
- **Capítulo 2:** este capítulo concentra-se em descrever todos os componentes da bancada experimental para ensaio de motores, falar de seus aspectos mais relevantes para a realização dos ensaios e explicar sucintamente todo o modo

operacional do ensaio;

- **Capítulo 3:** este capítulo trata de todo o processo de identificação da planta de velocidade, a qual será necessária para o projeto do controlador de torque. São vistos a fundamentação teórica de sinais de excitação, dimensionamento do sinal, implementação prática e resultados;
- **Capítulo 4:** este capítulo aborda os motivos de se utilizar um tipo de controlador Proporcional Integral (PI) e os motivos da escolha de uma estrutura *Reference Signal Tracking (RST)*. Além disso, é efetuado o projeto do controlador de torque e implementação prática do mesmo;
- **Capítulo 5:** este capítulo revela os resultados experimentais e os compara com os resultados simulados. Também são vistos alguns detalhes práticos do ensaio, alguns problemas encontrados e as estratégias de contorno destes;
- **Capítulo 6:** este capítulo conclui o trabalho, discutindo de forma geral o que foi abordado. São apresentados os resultados obtidos, dificuldades encontradas e proposição de trabalhos futuros.

2 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL PARA ENSAIO DE MOTORES

Neste capítulo, os aspectos mais relevantes da estrutura da bancada e seu modo operacional serão abordados em detalhes. Inicialmente, será traçado o histórico da bancada, indicando sua localização, o contexto de sua construção e os trabalhos realizados até então. Em seguida, serão descritos os dispositivos utilizados na composição da estrutura, bem como as principais funcionalidades as quais são relevantes para o funcionamento dos ensaios. Posteriormente, será exposto, sucintamente, o funcionamento operacional da bancada. E por fim, será apresentado o problema de controle a ser solucionado.

2.1 Histórico

A bancada experimental para ensaio de motores — pertencente ao Laboratório de Sistemas Motrizes (LAMOTRIZ) da Universidade Federal do Ceará (UFC) — abordada neste trabalho, é fruto de um projeto de pesquisa custeado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O processo de concessão de auxílio financeiro à pesquisa (n^o 459091/2014 – 0) foi aprovado e o projeto foi coordenado pelo Prof. Dr. Ricardo Silva Thé Pontes.

Este projeto teve como inspiração as plantas desenvolvidas por Quintino *et al.* (2011) e Agamloh *et al.* (2011) e foi realizado no ano de 2016. O processo de compra de material ocorreu entre os meses de janeiro e fevereiro. No mês de dezembro realizou-se a montagem e o comissionamento da estrutura.

Em janeiro de 2017, iniciaram-se os primeiros ensaios na estrutura e estes duraram até junho do mesmo ano. No final de 2018, foi realizada uma modificação na estrutura, a fim de permitir a utilização de dois tipos de estruturas de carcaça para motores — carcaças 80 e 90.

Os trabalhos iniciais realizados em 2017, tiveram foco na área de eficiência energética em motores elétricos. Estes, resultaram em uma tese de doutorado de AGUIAR (2018) e um artigo de Aguiar *et al.* (2018), em que foi estudada a viabilidade técnica e econômica da remodelagem do enrolamento estatórico em motores de indução trifásicos com rotor em gaiola de esquilo, visando o aumento de rendimento.

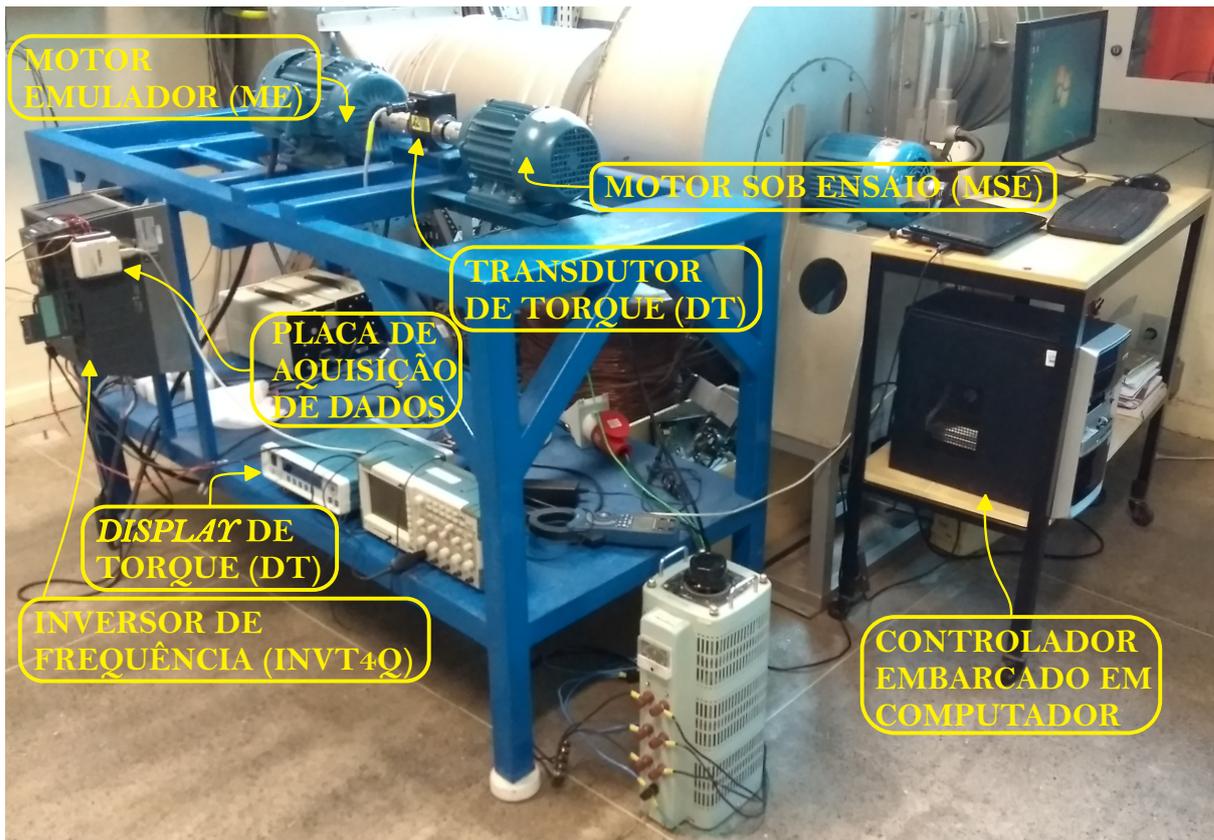
No início de 2019, foi proposta uma linha de pesquisa na área de controle digital. Fazendo o uso da estrutura, foi estudada a emulação de perfis de carga. Como resultado dessa pesquisa, desenvolveu-se este presente trabalho. Aplicou-se na bancada, um controle de torque

constante, a fim de se emular o perfil de carga mais básico (perfil constante) e a partir deste, desenvolver estudos futuros para outros tipos de perfis (linear, quadrático, hiperbólico, entre outros).

2.2 Visão Geral

Esta planta, a qual é o objeto de estudo deste trabalho, localiza-se na UFC, *campus* do Pici, mais especificamente no LAMOTRIZ. Trata-se de um ambiente controlado, com características de laboratório de pesquisa, mas também mostrando aspectos e elementos típicos de um ambiente industrial. Dessa forma, o laboratório proporciona a possibilidade de realização de uma ampla variedade de testes. Na Figura 1 é possível visualizar a bancada, bem como seus componentes (descritos na Tabela 1).

Figura 1 – Bancada de experimental de ensaio de motores



Fonte: Elaborada pelo autor.

A descrição completa dos dispositivos que compõem a bancada é feita na Tabela 1. É possível visualizar os principais dados nominais, os fabricantes e a quantidade de cada equipamento.

Tabela 1 – Componentes da bancada experimental para ensaio de motores

Dispositivos	Dados Nominais	Fabricante	Qtde
Motor de Indução Trifásico	(380 V / 5 cv / 2 polos)	WEG [®]	1
Motor de Indução Trifásico	(380 V / 1,5 cv / 2 polos)	WEG [®]	1
Inversor Trifásico com Recuperação de Energia	(380 V / 7,5 kW)	SIEMENS [®]	1
Autotransformador Trifásico	(380 V / 10 kVA)	HOSSONI	1
Placa de Aquisição de Dados	8 AI (48 kS/s)/2 AO (150 Hz)	NATIONAL INSTRUMENTS [®]	1
Transdutor de Torque	(10 N·m / < 0,1%)	MAGTROL [®]	1
Display de Torque	(Pot. / Torq. / Vel.)	MAGTROL [®]	1
Alicate Amperímetro Digital	True RMS	Skill-Tec	1
Multímetro Digital	True RMS	FLUKE [®]	1
Osciloscópio Digital	(4 canais / 100 MHz)	Tektronix	1
Computador	—	—	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

2.3 Motores de indução trifásicos

Foram utilizados dois motores de indução com rotor gaiola de esquilo para compor a bancada de ensaios. Um deles é o Motor Emulador (ME), o qual deve ser acionado e controlado para produzir os perfis de carga desejados, enquanto o outro é o Motor Sob Ensaio (MSE), ou seja, o motor o qual se deseja testar.

O ME deve ter maior potência, pois irá emular os perfis de cargas de acordo com o controle realizado através do inversor. O ME é um WEG[®] — modelo W22 IR2 Trifásico (5 cv / 380 V / 2 polos). Para o MSE, o qual deve possuir uma potência menor, tem-se um WEG[®] — modelo W22 IR2 Trifásico (1,5 cv / 380 V / 2 polos).

Ambos os motores ficam dispostos na bancada com eixos alinhados e são conectados mecanicamente ao Transdutor de Torque (TT) por meio de acoplamentos elásticos. Os modelos são os mesmos, diferindo apenas no tamanho, obviamente devido à potência nominal. A Figura 2 mostra o modelo W22 IR2 Trifásico.

Figura 2 – Modelo do motor de indução trifásico com rotor gaiola de esquilo empregado



Fonte: (WEG, 2019).

É importante destacar que o MSE sofreu alterações em seus enrolamentos estatatórios. O mesmo foi rebobinado de forma otimizada (AGUIAR, 2018). Os ensaios realizados para o desenvolvimento deste trabalho, foram feitos em regime de operação à frio, ou seja, imediatamente após a bancada ser energizada. Manteve-se o valor de torque nominal do MSE (dado de placa) e mediu-se o valor médio de velocidade durante o ensaio. Os resultados encontram-se na Tabela 2. Os valores de velocidade diferem, pois no ensaio à frio, as resistências dos enrolamentos do motor sofreram variação de seus valores com o aumento da temperatura, ou seja, não foi atingido o equilíbrio térmico durante o período ensaiado.

Tabela 2 – Medições realizadas no MSE durante os ensaios, emulando-se carga nominal e constante, sob regime de operação à frio.

Parâmetros	Dados de Placa (Equilíbrio Térmico)	Medidos em Ensaio (à frio)
Torque	3,03 $N \cdot m$	3,03 $N \cdot m$
Velocidade	3440 rpm	3500 rpm

Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota: Medições realizadas durante os ensaios pelo autor.

2.4 Inversor trifásico

2.4.1 Tipos de operação de um inversor

Segundo Hashid (2014), dependendo da polaridade da tensão ou dos sentidos dos fluxos de corrente, os conversores de energia podem ser classificados em cinco tipos:

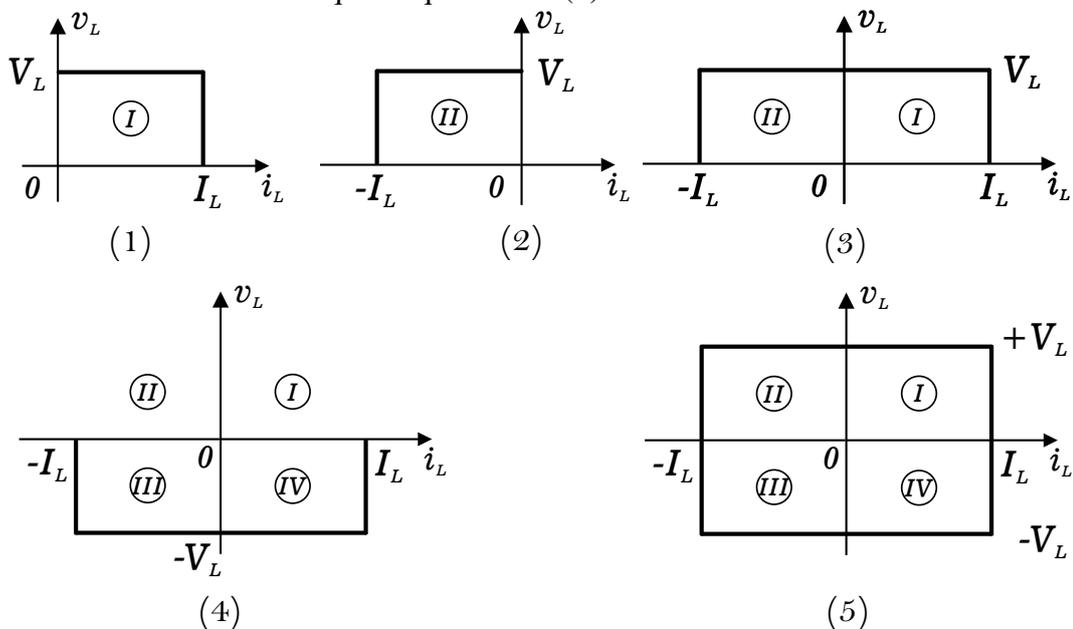
1. **Conversor de primeiro quadrante:** a tensão e a corrente na carga são positivas.

- A corrente flui para a carga;
2. **Conversor de segundo quadrante:** a tensão é positiva, mas a corrente é negativa. A corrente sai da carga;
 3. **Conversor de primeiro e segundo quadrantes:** a corrente na carga pode ser positiva ou negativa, porém a tensão na carga sempre será positiva;
 4. **Conversor de terceiro e quarto quadrantes:** a corrente na carga pode ser positiva ou negativa, porém a tensão na carga é sempre negativa;
 5. **Conversor de quatro quadrantes:** a tensão e a corrente na carga podem ser positivas ou negativas.

Na Figura 3, é possível observar os cinco tipos de conversores, bem como os respectivos quadrantes em operação.

Em muitos acionamentos de velocidade variável, há a necessidade de se operar em quatro quadrantes. Portanto, os conversores duais trifásicos são amplamente utilizados em aplicações até o nível de 2.000 kW (HASHID, 2014).

Figura 3 – Classificação dos conversores de energia: conversor de primeiro quadrante (1), conversor de segundo quadrante (2), conversor de primeiro e segundo quadrantes (3), conversor de terceiro e quarto quadrantes (4) e conversor de quatro quadrantes (5)



Fonte: Adaptado de Hashid (2014).

Dependendo da estratégia de controle e da operação do motor de indução trifásico, o fluxo de potência e a velocidade do motor podem ser controlados. Este controle pode ser feito no sentido direto (v_L positiva e i_L positiva), na frenagem direta regenerativa (v_L positiva e i_L

negativa), no sentido inverso (v_L negativa e i_L negativa) e na frenagem inversa regenerativa (v_L negativa e i_L positiva) (HASHID, 2014).

2.4.2 Inversor de 4 quadrantes

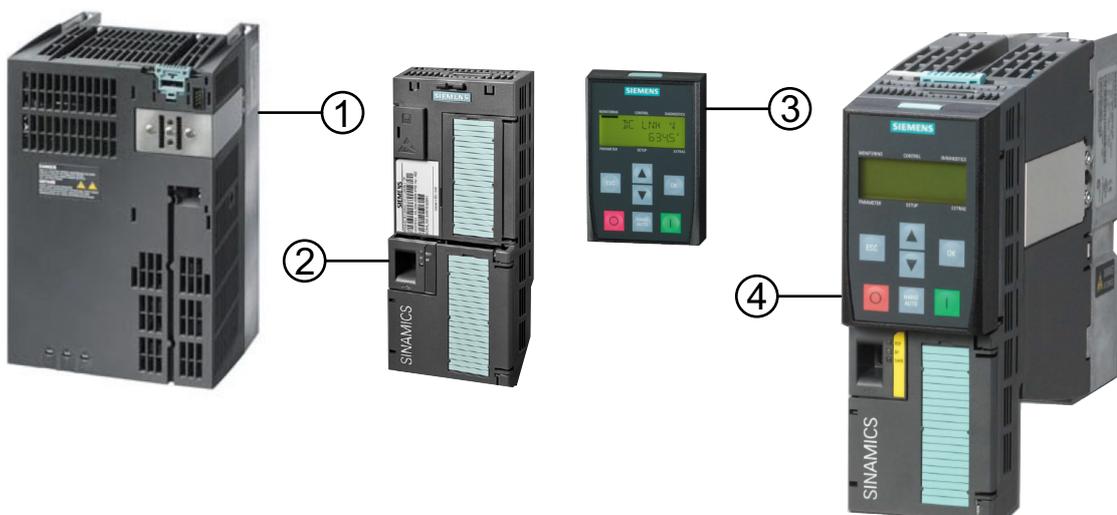
A bancada de ensaios utilizada, dispõe de um conversor de energia que operasse nos quatro quadrantes. Trata-se de um Inversor Trifásico de 4 Quadrantes (INVT4Q) da fabricante SIEMENS® — modelo *SINAMICS Power Module PM250* (380 V / 7,5 kW) — com recuperação de energia e rendimento de 95%.

O inversor é composto por três partes principais:

1. **Módulo de Potência:** conecta as ligações da rede elétrica com a máquina elétrica;
2. **Unidade de Controle:** controla e monitora a máquina elétrica conectada. A unidade de controle utilizada é a *CU240B-2*;
3. **Painel Operador Básico:** responsável pelo acesso direto ao inversor, permitindo o monitoramento local, comissionamento e leitura de diagnósticos. O painel utilizado é o *BOP-2*. Este é conectado à unidade de controle através de uma interface *RS-232*.

Na Figura 4, é possível observar o inversor e suas respectivas partes.

Figura 4 – Módulo de Potência *PM250* (1), Unidade de Controle *CU240B-2* (2), Painel Operador Básico *BOP-2* (3) e Inversor Completo (4)



Fonte: (SIEMENS, 2018).

Uma outra alternativa ao Painel Operador Básico, é a interface via *software*, chamado *TIA PORTAL*®, o qual otimiza todos os procedimentos de comissionamento, controle e processos.

Tem uma interface de usuário intuitiva, funções simples e completa transparência de dados, que permite ao usuário configurar os parâmetros mais intrínsecos do conversor, tudo via computador, através de um conector do tipo *Universal Serial Bus (USB)*.

2.5 Transdutor de torque

Para a aferição de torque e conseqüentemente para a realização de um controle em malha fechada do mesmo, é necessário um dispositivo que realize tais medições. Desta forma, compondo a bancada de ensaios, tem-se um TT, o qual fica acoplado entre os eixos do ME e do MSE. Devido a esta disposição entre as máquinas elétricas, diz-se que é um transdutor de torque dinâmico *in-line* ou com eixo passante.

Como pode ser visto na Figura 5, utilizou-se um TT *MAGTROL*[®] — modelo TM307 — o qual é capaz de efetuar medições de torque e velocidade com precisão menor que 0,1 % (*MAGTROL*, 2017b).

Figura 5 – Transdutor de torque *MAGTROL*[®] TM307



Fonte: (*MAGTROL*, 2017b).

Segundo *MAGTROL* (2017b), o torquímetro pode aferir até $10 \text{ N}\cdot\text{m}$ (valor nominal). Assim, como o MSE tem torque nominal (dados de placa) de $3,03 \text{ N}\cdot\text{m}$, este torna-se o fator limitante no quesito segurança, pois serão utilizadas apenas as condições nominais para os ensaios. Logo, verifica-se que o TT encontra-se devidamente dimensionado e opera de forma segura.

2.6 Display de torque

O TT é acompanhado por um *Display* de Torque (DT) *MAGTROL*[®] — modelo TM3411 — conforme Figura 6. Este, apresenta valores medidos de potência mecânica, torque e velocidade (todos no eixo), além de saídas analógicas para os sinais de torque e velocidade (ambos em tensão) (MAGTROL, 2017a).

Figura 6 – *Display* de torque *MAGTROL*[®] TM3411



Fonte: (MAGTROL, 2017a).

A saída analógica de torque é obtida através de um conector do tipo *Bayonet Neill Concelman (BNC)*, que provê um sinal de tensão entre -10 e $+10$ V. Este sinal é utilizado na realimentação da malha de controle da planta.

2.7 Placa de aquisição de dados

Para a realização da aquisição de dados, tem-se uma Placa de Aquisição de Dados (PAD) de fabricação da *NATIONAL INSTRUMENTS*[™] — modelo *USB-6009*. O fluxo de dados entre a PAD, o INVT4Q e o DT se dá através de entradas e saídas analógicas, e o fluxo de dados entre a placa e o computador é dado via cabo *USB*. Na Figura 7, pode-se verificar o modelo utilizado.

A PAD utilizada pode gerar sinais através de algoritmos computacionais, tendo esta uma biblioteca compatível com o pacote computacional de matemática utilizado. Estes sinais tem sua taxa de amostragem definida via *software*, ou seja, de acordo com o *clock* do processador do computador utilizado. Segundo *INSTRUMENTS* (2017), a taxa máxima de atualização é de 150 Hz, com resolução de 12 bits, gerando sinais de 0 V à $+5$ V. No entanto, a leitura de sinais, pode ser realizada com taxa de amostragem definida pelo *clock* do processador do computador ou através da própria placa. A taxa máxima de amostragem é de 48.000 amostras/s, com resolução de 13 bits, podendo fazer aquisições de sinais entre -10 V e $+10$ V (*INSTRUMENTS*, 2017).

Figura 7 – Placa de aquisição de dados *NATIONAL INSTRUMENTS™ USB-6009*



Fonte: (NATIONAL INSTRUMENTS, 2019).

2.8 Outros componentes

A bancada de ensaios ainda conta com os seguintes equipamentos auxiliares:

- **Autotransformador Trifásico (220/380 V):** ligado em estrela (380 V), é responsável pela partida com tensão reduzida do MSE. Esta operação é realizada manualmente e a aferição é feita com um multímetro digital;
- **Osciloscópio Digital:** contando com 4 canais, este realiza o monitoramento dos sinais de tensão das entradas e saídas analógicas, provenientes do DT, do INVT4Q e da PAD;
- **Alicate Amperímetro Digital:** realiza o monitoramento da corrente do MSE. Esta informação é importante para a operação sem sobrecargas elétricas da máquina testada;
- **Multímetro Digital:** este realiza a aferição da tensão de linha (380 V) nos terminais do autotransformador, a fim de que o mesmo realize a partida do MSE com tensão reduzida (de forma manual) até alcançar a tensão de linha nominal;
- **Computador:** este é responsável pelo fluxo de dados entre os dispositivos principais da bancada e pelo controle da planta em ensaio, através de algoritmos implementados em pacotes computacionais de matemática.

2.9 Funcionamento da bancada de ensaios

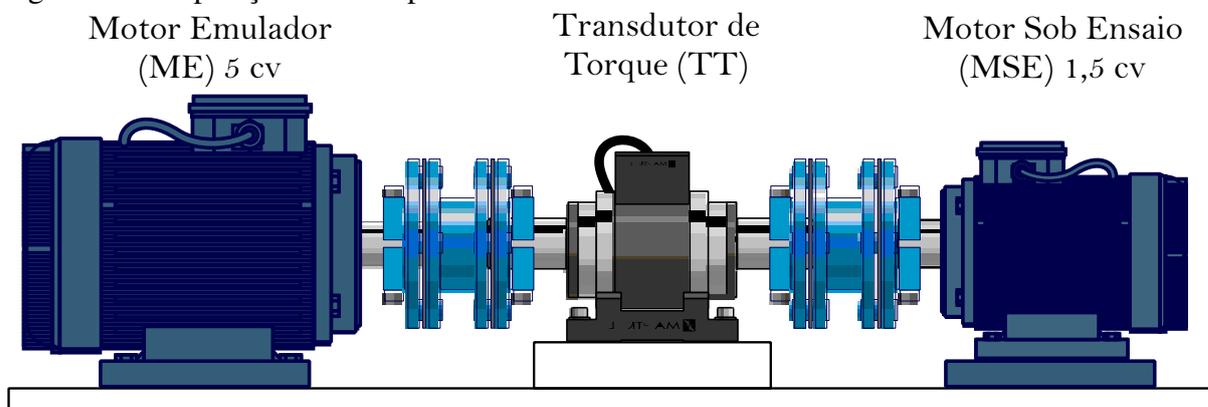
Nesta seção descreve-se, sucintamente, o modo operacional da bancada. Primeiramente, será mostrada uma visão geral da estrutura, onde será possível identificar seus principais

componentes (já listados nas seções 2.3 à 2.7). Logo após, será apresentado o tipo de controle utilizado pelo inversor, bem como a disposição de suas malhas internas de controle de corrente e tensão, e sua malha externa de controle de velocidade. Em seguida, será descrito todo o acionamento da bancada e seus detalhes operacionais. Por fim, será exposta a disposição do fluxo de dados entre cada dispositivo da estrutura.

2.9.1 Visão geral

A bancada é, em essência, constituída de dois motores de indução trifásicos, como visto na seção 2.3. Tem-se o ME de um lado do eixo passante e o MSE do outro lado. No meio do eixo, tem-se o TT, o qual fornece sinais de torque e velocidade para o DT. O ME é alimentado pelo INVT4Q, o qual opera em quatro quadrantes e permite a operação do ME em modo gerador ou com frenagem regenerativa, possibilitando que o conjunto ME-INVT4Q emule carga mecânica no eixo do MSE. O INVT4Q conecta o ME à rede elétrica do laboratório, regenerando a energia elétrica durante o ensaio. Na Figura 8 pode ser visto o sistema mecânico principal da bancada — ME-TT-MSE.

Figura 8 – Disposição dos componentes mecânicos da bancada



Fonte: Adaptado de MAGTROL (2017b).

2.9.2 Acionamento do INVT4Q e do ME

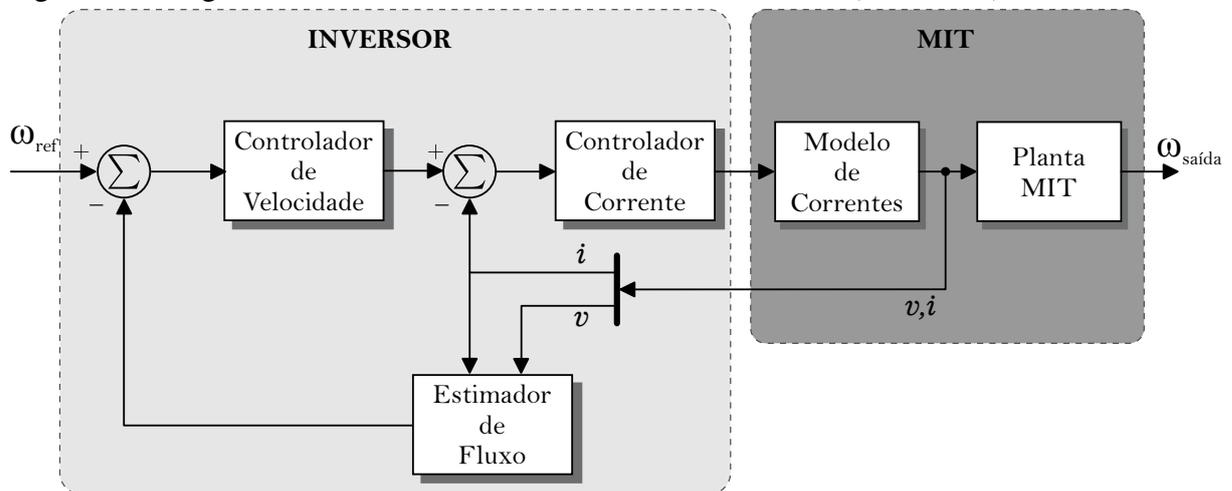
O inversor de frequência descrito na seção 2.4.2, possui um módulo analógico de entrada e saída de dados, cujas informações podem ser escolhidas entre tensão e corrente. Para ambos os tipos, é oferecido uma série de configurações por padrão, as quais podem ser selecionadas pelo usuário através do *software TIA PORTAL*[®] (SIEMENS, 2018).

Para este trabalho, foram escolhidas entradas e saídas analógicas em tensão, com

valores entre 0 V e +5 V. Dessa forma, é possível efetuar a leitura de variáveis medidas ou estimadas, além de enviar sinais de comando provenientes de fonte externa ao inversor.

O INVT4Q conta com algoritmo de identificação do tipo *self-tuning* em que as malhas internas de corrente i_d e i_q são controladas através de um controle vetorial sem *encoder* (*sensorless*). Isso significa que a variável de velocidade é estimada através de algoritmos internos executados pelo inversor, os quais fazem a estimativa do fluxo. Assim, tem-se o controle de velocidade do motor de indução em cascata — do tipo PI — tendo a malha de controle de corrente e tensão como mais internas. Observa-se na Figura 9, o diagrama de blocos simplificado do sistema de controle do inversor.

Figura 9 – Diagrama de blocos do controle vetorial sem *encoder* (*sensorless*)



Fonte: Adaptado de SIEMENS (2018).

Através do *software TIA PORTAL*[®], é possível realizar um controle de velocidade do ME (inclusive com partida e parada em rampa), bastando apenas o rápido comissionamento e a identificação automática da planta (ambos seguindo o manual de instruções do fabricante do inversor). Também é possível efetuar este controle de velocidade, utilizando-se das entradas analógicas do INVT4Q. Ao se aplicar um tensão entre 0 V e +5 V tem-se que a velocidade corresponde proporcionalmente à faixa entre 0 rpm e 3600 rpm. É possível observar os valores de velocidade tanto no visor do Painel Operador Básico quanto no DT.

Através da conexão entre uma PAD e um computador contendo um pacote de matemática compatível, foi criado um algoritmo que realiza o envio e aquisição de sinais através da PAD, portanto, estes sinais foram utilizados para comandar (via computador) a velocidade do ME.

2.9.3 Acionamento do MSE

Dispondo-se da possibilidade de controlar a velocidade do ME através do computador, PAD e entradas analógicas do inversor, pode-se agora analisar o funcionamento mecânico e elétrico entre o ME e o MSE.

Primeiramente, aplica-se um sinal crescente de 0 V à $+5\text{ V}$, em torno de 2 s , fazendo com que o ME realize sua partida com velocidade crescente e de forma suave (partida em rampa). O rotor irá atingir uma velocidade de rotação de 3600 rpm .

Logo após, aciona-se o MSE, de forma manual, através do autotransformador da bancada. Com o auxílio do multímetro, verifica-se a subida de tensão de maneira gradativa, até seu valor nominal de 380 V . O objetivo é realizar a partida deste motor de forma suave. Como ambos os motores encontram-se conectados mecanicamente por um eixo passante em comum (conforme Figura 8), o sentido de rotação de um deve ser horário e o do outro anti-horário, ou vice-versa. Com a aplicação de tensão nominal de 380 V , o MSE (de acordo com os dados medidos) tende a executar uma velocidade de rotação de 3485 rpm , porém não consegue, pois o ME está sendo controlado pelo INVT4Q e portanto impõe a velocidade no eixo de 3600 rpm (velocidade inicial). Neste exato momento, o MSE está operando com velocidade no eixo igual a sua velocidade síncrona de 3600 rpm . Logo, tem-se o ME funcionando como motor e o MSE funcionando no limiar de se tornar gerador (embora este não tenha como devolver energia à rede). Além disso, o DT neste momento marca torque nulo, devido à MSE operar na velocidade síncrona.

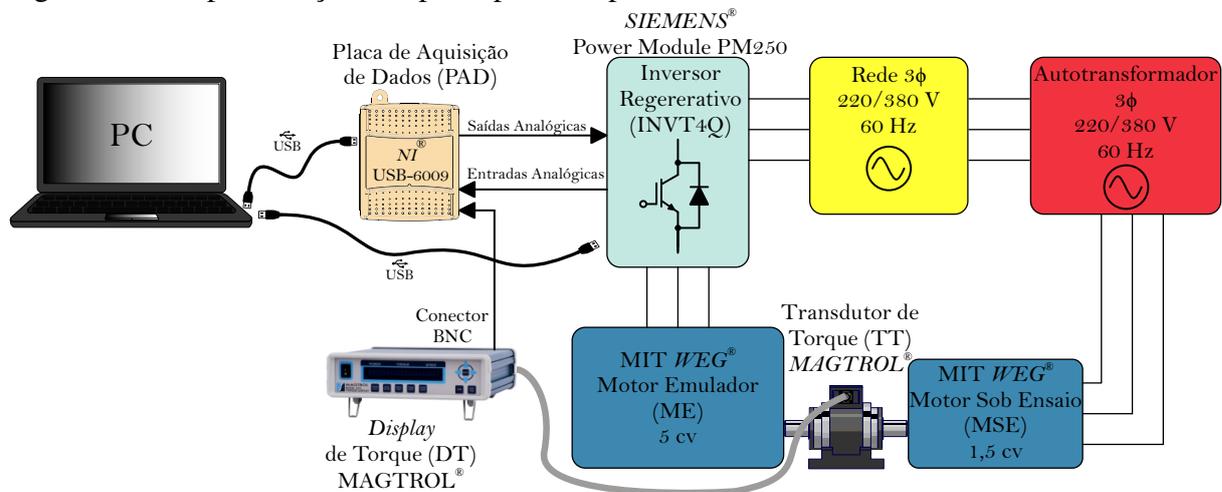
Ao se modificar os sinais de tensão para valores menores que 5 V e conseqüentemente o valor *setpoint* de velocidade do ME, percebe-se que o torque no eixo começa a aumentar. Devido à forma como o TT encontra-se instalado, os valores de torque tem sinal negativo. Quando aplicado um sinal de tensão de $4,84\text{ V}$ (o que corresponde a 3485 rpm), observa-se que o DT mostra um valor de torque em torno de $3,30\text{ N}\cdot\text{m}$ — sobrecarga de $8,9\%$ em relação aos dados de placa. Neste momento, a velocidade do MSE, a qual está sendo imposta no eixo pelo ME, deixa de ter escorregamento nulo e por conseqüência, o conjugado começa a aumentar. O ME, a fim de manter a velocidade de referência, passa a exercer um torque eletromagnético contrário ao seu sentido de rotação mecânica e assim não permite que o MSE assuma a imposição de velocidade. Ou seja, o ME atua na frenagem regenerativa para controlar a velocidade do conjunto. Com isso, há uma recuperação de energia, a qual é devolvida à rede elétrica. É por este motivo que se faz necessária a utilização de um INVT4Q. Se o *setpoint* de velocidade do

ME for escolhido abaixo de 3485 rpm , o torque da MSE irá ultrapassar o valor de $3,30 \text{ N}\cdot\text{m}$ (já inclusa a sobrecarga aceitável) e a bancada começará a operar fora das margens de segurança.

2.9.4 Fluxo de dados

A estrutura da planta necessita de uma interconexão, permitindo o fluxo de dados entre os dispositivos. A Figura 10 apresenta a estrutura completa da bancada e é possível visualizar os canais de fluxo de dados e as ligações elétricas.

Figura 10 – Representação dos principais componentes da bancada e suas conexões



Fonte: Elaborada pelo autor.

A PAD realiza a leitura do sinal de velocidade (em volts) enviado pelo INVT4Q. O sinal de torque (em volts) é enviado para a PAD por meio de um conector *BNC* ligado ao DT. Este, recebe os sinais do TT, através de um cabo fornecido pelo fabricante. O computador, com os recursos do pacote computacional de matemática utilizado, realiza o processamento desses sinais por meio de um algoritmo e envia um sinal de tensão (em volts), o qual representa o novo *setpoint* de velocidade. Todos esses sinais são compartilhados com o osciloscópio digital, a fim de que se possa acompanhá-los em tempo real.

Como mencionado na seção 2.7, os sinais de leitura e escrita relacionados à PAD, são amostrados a uma taxa definida via algoritmo. Já os sinais internos do INVT4Q, tem uma taxa de amostragem diferente, definida pelos algoritmos internos do fabricante. Esta diferença entre taxas de amostragem entre os sinais da PAD e os sinais internos do INVT4Q, e o fato de os algoritmos estarem embarcados em dispositivos com *clock* diferente, irão proporcionar o trabalho assíncrono da bancada quando aplicado o controle de torque.

2.9.5 Desligamento da bancada

Para o desligamento dos motores — estando os motores, ME e MSE, funcionando de acordo com o modo operacional da bancada — são realizados os procedimentos inversos aos descritos em 2.9.2 e 2.9.3.

Primeiramente, o MSE deve ser desacelerado de forma manual, por meio do auto-transformador da bancada. Em seguida, é enviado um sinal decrescente (via algoritmo) até 0 V, em torno de 2 s, fazendo com que o ME realize sua parada com velocidade decrescente e de forma suave (parada em rampa).

Alguns cuidados devem ser tomados neste procedimento. Caso, o ME seja parado antes do MSE, este atuará com o rotor bloqueado, visto que o ME está impondo a velocidade de 0 rpm no eixo e o MSE encontra-se energizado com tensão nominal. Essa condição não pode ultrapassar o tempo estabelecido pelo fabricante (18 s frio e 10 s quente) (SIEMENS, 2018). Este é o máximo tempo que o motor pode suportar para que não sejam danificados o rotor ou o isolamento do estator pela alta temperatura gerada pela corrente de rotor bloqueado (CHAPMAN, 2013).

2.10 Considerações finais

Tendo em vista as peculiaridades dos dispositivos utilizados para a composição da bancada, bem como o funcionamento operacional da mesma, é possível avançar mais neste trabalho. Observou-se que ao controlar a velocidade, é possível emular carga no eixo e assim testar o MSE, porém essa carga não é controlada. Verificou-se que sem um controle de torque, o mesmo não se mantém constante devido à variação do valor das resistências dos enrolamentos do MSE com a temperatura. Atingindo o equilíbrio térmico, esses valores de resistência se estabilizam. No entanto, não foram realizados ensaios com duração suficiente para que o equilíbrio térmico fosse atingido.

Em algumas aplicações, como por exemplo, em ensaios de eficiência de motores de indução trifásicos ou mesmo para emulação de cargas com torque constante, se faz necessário um controle de torque bem projetado e sintonizado. Mas para isso, é preciso saber o modelo da planta a ser controlada. E é sobre este problema e sua solução, que tratará os capítulos 3 e 4 deste trabalho.

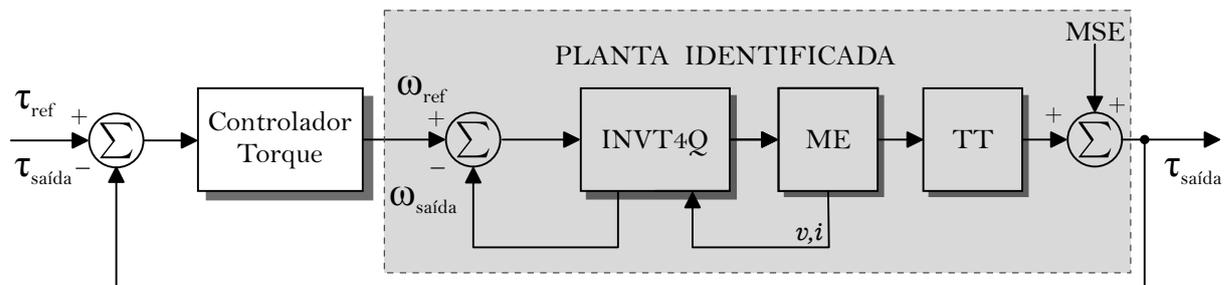
3 IDENTIFICAÇÃO DO MODELO DA BANCADA

Este capítulo tem como objetivo detalhar como foi realizado todo o processo de identificação do modelo da bancada para posteriormente ser realizado o projeto do controlador de torque da mesma. Inicialmente, será reiterado o objetivo deste trabalho, a fim de se resolver o problema do controle de torque mencionado na seção 2.10. Em seguida será exposto a metodologia de identificação da planta, qual o sinal de excitação adotado e a função de transferência obtida.

3.1 Introdução

O objetivo deste trabalho, como já mencionado na seção 1, consiste no controle de variáveis mecânicas de torque e velocidade, considerando que esta última já é controlada em cascata com a malha interna de corrente (vide subseção 2.9.2). Assim, conforme Figura 11, as malhas de corrente e velocidade são controladas diretamente no inversor industrial (INVT4Q), enquanto a malha de torque é posicionada externamente à malha de velocidade, ou seja, o controlador de torque calcula a referência de velocidade.

Figura 11 – Diagrama de blocos do sistema com a malha de torque em cascata com a malha de velocidade



Fonte: Elaborada pelo autor.

Para este controle ser efetuado, primeiramente se faz necessária a identificação da bancada, ou seja, é preciso achar a função de transferência da mesma. Esta função de transferência é composta pelo INVT4Q-ME-TT e o MSE como uma perturbação permanente no sistema. O conjunto funciona em uma faixa segura de operação para a bancada. Tal faixa de operação foi descrita na subseção 2.9.3.

3.2 Identificação da planta

No âmbito da Teoria do Controle Discreto, identificação de sistemas consiste em encontrar uma função de transferência que seja a mais parecida possível com a função de transferência do sistema dinâmico a ser trabalhado. E deve ser realizada apenas com dados de entrada e saída deste sistema dinâmico. Segundo Landau e Zito (2006), existem basicamente cinco passos para se realizar a identificação de sistemas:

1. Aquisição de dados de entrada e saída;
2. Estimar a ordem do modelo;
3. Escolha do modelo do ruído;
4. Estimação dos parâmetros;
5. Realizar a validação do modelo identificado.

O passo 1 é implementado através da PAD e de um computador, cujo algoritmo implementado em pacote computacional de matemática, faz todo o processamento dos dados. O passo 2 é realizado de modo empírico, conforme a resposta da planta ao degrau e de acordo com exatidão do modelo estimado. Os passos 3, 4 e 5, são realizados através de um aplicativo pertencente ao pacote computacional utilizado.

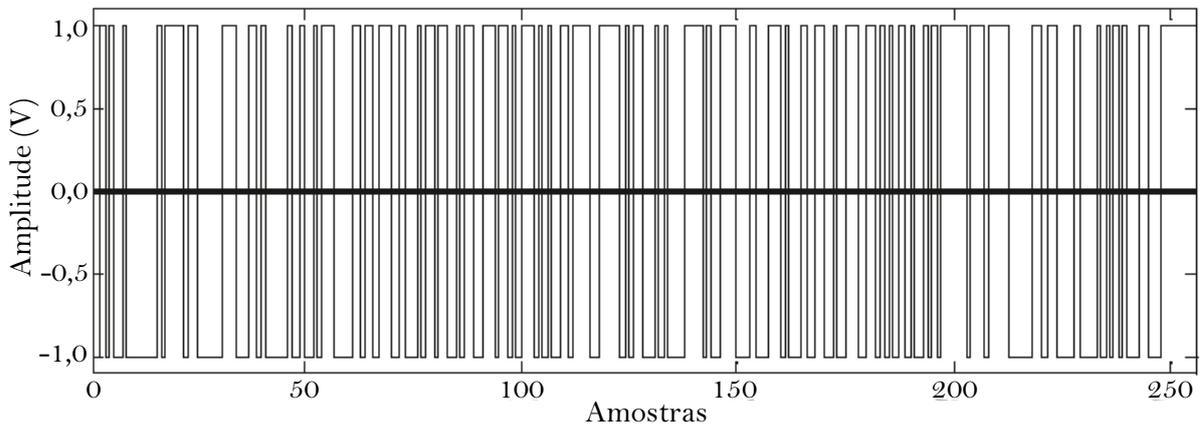
3.2.1 Sinais de excitação

Segundo Aguirre (2004), o sinal de excitação ideal é aquele que consegue excitar todos os polos do sistema, ou seja, este sinal deve provocar variações no processo que permitam a coleta de dados para identificar um modelo que seja capaz de reproduzir as características dinâmicas e estáticas necessárias a uma determinada aplicação.

Assim, deve ser aplicado um sinal de excitação na entrada do sistema dinâmico. Este pode ser um degrau, uma rampa, uma parábola, ou mesmo uma senoide. Porém, estes sinais não geram estímulos necessários o suficiente para se obter uma vasta gama de dados para que a identificação torne-se mais precisa. Dito isto, utiliza-se na prática um sinal de entrada chamado de *Pseudo Random Binary Signal (PRBS)*, o qual consiste em uma sequência de pulsos retangulares modulados em largura que exhibe o comportamento de um ruído branco (aleatório), em uma vasta faixa de frequências e com baixa amplitude (LANDAU; ZITO, 2006). Dessa forma, o sistema recebe uma excitação que persiste e gera uma saída para uma vasta gama de estímulos, coisa que não ocorre com os sinais de estímulo básicos (degrau, senoide e etc.).

Deve ser realizada uma aquisição de dados sempre respeitando os critérios de amostragem, a fim de se obter uma gama de dados adequada para a realização da identificação (LANDAU; ZITO, 2006). Observa-se na Figura 12 um exemplo de um sinal *PRBS*.

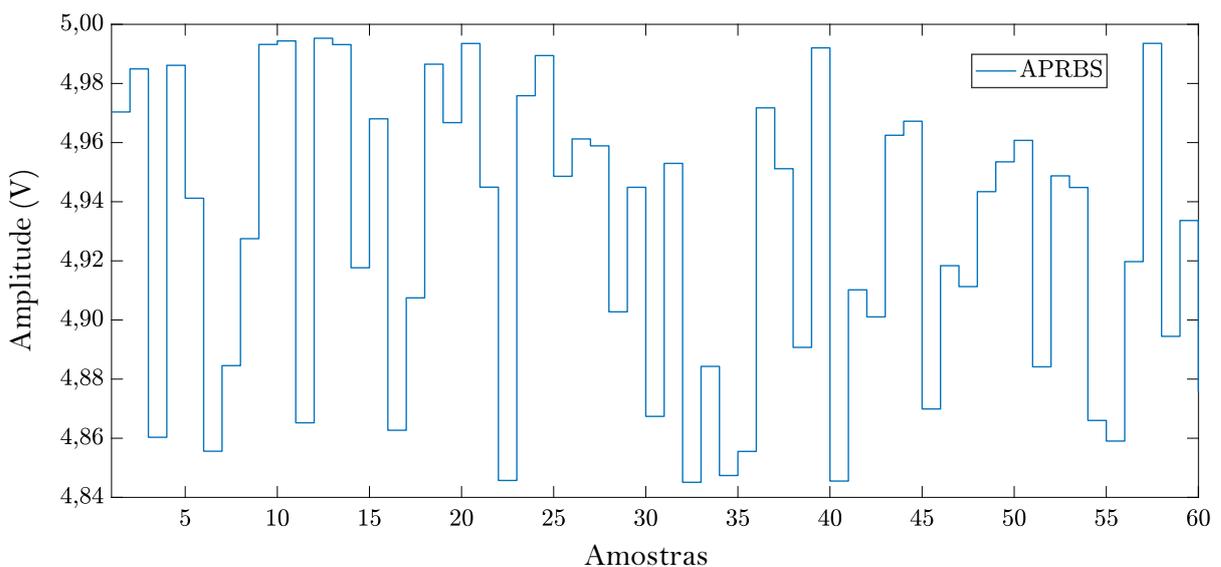
Figura 12 – Sinal *PRBS* (*Pseudo Random Binary Signal*) utilizado na excitação de uma planta genérica



Fonte: Adaptado de Landau e Zito (2006).

Em algumas aplicações, a utilização de apenas dois níveis de excitação não é tão interessante. Existem determinadas faixas de operação e condições de operação, nas quais um sinal de excitação *PRBS* não gera os melhores resultados (NELLES, 2001). A solução para este problema é a utilização de um *PRBS* de diferentes amplitudes, conforme Figura 13.

Figura 13 – Sinal de excitação *APRBS* (*Analog Pseudo Random Binary Signal*) com 60 níveis aleatórios



Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, ao invés da utilização de apenas dois níveis, tem-se quantos níveis forem necessários para a aplicação. Os níveis são definidos aleatoriamente e dentro da faixa de operação da planta a ser identificada. Segundo Nelles (2001), o novo sinal se chama *Analog Pseudo Random Binary Signal (APRBS)*.

3.2.2 Metodologia

Para a identificação do modelo da estrutura, foi utilizada a seguinte metodologia:

1. Delimitação da estrutura a ser identificada;
2. Escolha e validação do sinal de excitação;
3. Dimensionamento do sinal de excitação e duração do ensaio;
4. Implementação do sinal de excitação e coleta de dados;
5. Obtenção do modelo estimado.

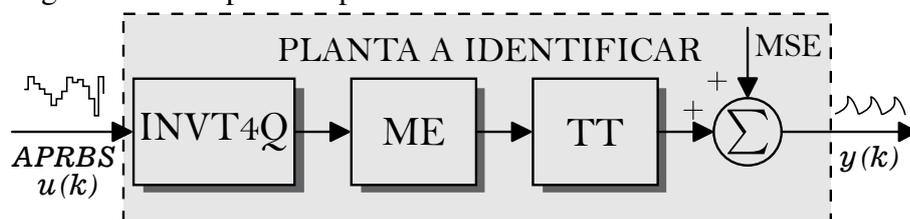
3.2.2.1 Planta a ser identificada

O sistema que se deseja controlar é composto pela malha fechada de velocidade — incluindo o controlador de velocidade e de corrente internos ao INVT4Q — apresentados na Figura 9 (subseção 2.9.2). Logo, torna-se conveniente identificar este sistema como uma planta única, a partir da aplicação de um sinal de excitação na entrada de referência de velocidade e da coleta do sinal de saída de torque. Ao se analisar o sistema a ser identificado, constata-se que o mesmo é constituído por:

1. **INVT4Q-ME**: realizam o controle de velocidade do sistema;
2. **TT**: sensor que fica de maneira *in-line* entre os motores, portanto faz parte da planta a ser identificada;
3. **MSE**: considerado uma perturbação permanente de modo a estabelecer os limites de operação para a identificação do sistema.

O sistema a ser identificado pode ser visualizado na Figura 14.

Figura 14 – Resposta da planta a ser identificada a uma entrada *APRBS*



Fonte: Elaborada pelo autor.

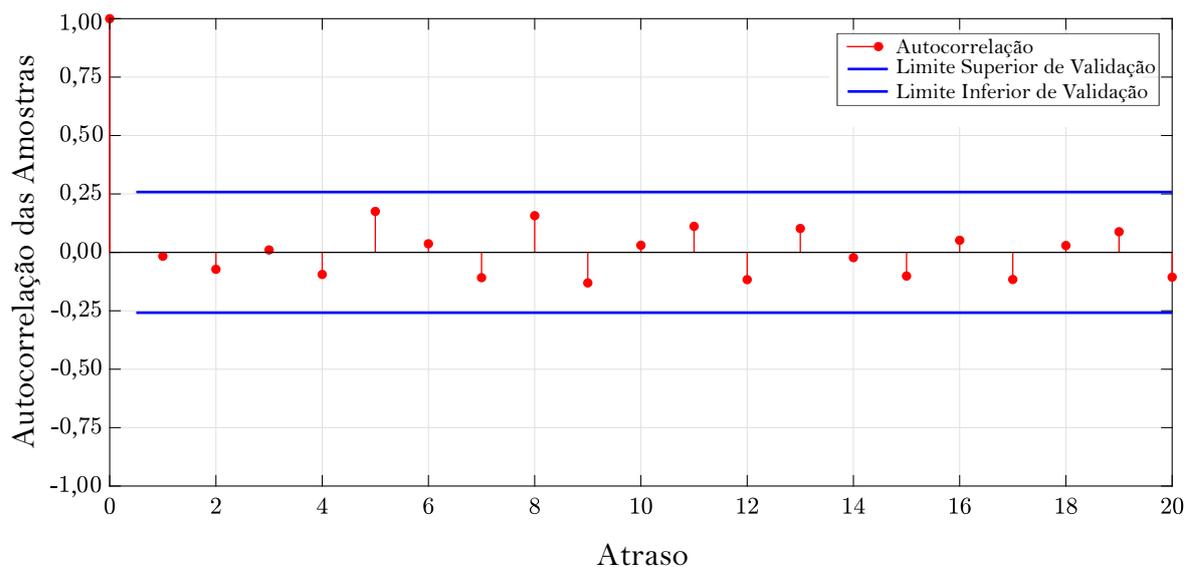
3.2.2.2 Escolha do sinal de excitação

O sinal de excitação escolhido foi do tipo *APRBS*, o qual consiste em uma sequência de degraus que podem assumir um valor aleatório entre os limites máximo e mínimo de operação da bancada, ou seja, entre $4,84\text{ V}$ — que corresponde a 3485 rpm — e $5,00\text{ V}$ — que corresponde a 3600 rpm . Velocidades abaixo de 3485 rpm , gerariam torques acima do valor nominal do MSE, comprometendo a segurança do ensaio. De acordo com a resolução da PAD e das entradas analógicas do INVT4Q, e para uma diferença de $0,16\text{ V}$ entre os valores limites de tensão, escolheu-se um sinal *APRBS* com 60 níveis. O sinal aplicado pode ser visto na Figura 13 (subseção 3.2.1).

O sinal de excitação deve ser o mais aleatório possível e deve atingir uma ampla faixa de frequências, comportando-se o mais próximo possível de um ruído branco (AGUIRRE, 2004). A fim de garantir a aleatoriedade do sinal adotado, utilizou-se uma função de autocorrelação, na qual foi aplicada ao sinal da Figura 13. Os resultados podem ser vistos na Figura 15.

De acordo com a Figura 15, percebe-se que para o atraso nulo, a autocorrelação é unitária, ou seja, é um comportamento já esperado. Para os outros atrasos, observa-se que a função encontra-se dentro dos limites estabelecidos pelo pacote computacional e portanto garantem a qualidade do sinal para a realização da identificação.

Figura 15 – Gráfico da função de autocorrelação do sinal *APRBS* de 60 níveis



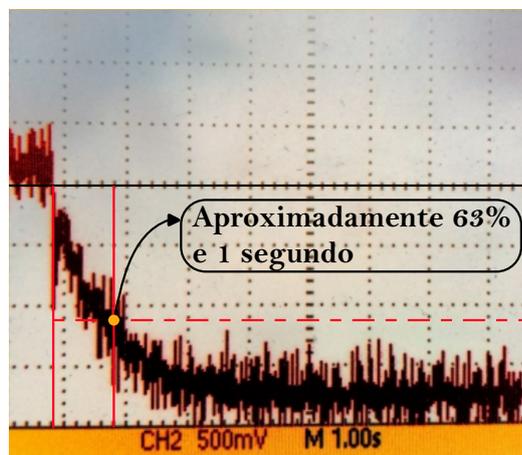
Fonte: Elaborada pelo autor.

3.2.2.3 Dimensionamento do sinal APRBS

Inicialmente, é preciso saber qual a constante de tempo τ , da resposta da planta a uma entrada em degrau, a fim de se projetar um sinal de excitação adequado. Posteriormente, utiliza-se um fator de estabilização, que nada mais é do que o valor no qual o tempo de acomodação atingirá 99% do seu valor final. Para isso, emprega-se um fator de estabilização de 5 constantes de tempo (COELHO; SANTOS, 2004).

Então, configurou-se o INVT4Q para não haver quaisquer acelerações e/ou desacelerações em rampa. Em seguida, aplicou-se um degrau (via algoritmo computacional) partindo do ponto de operação mínimo (5,00 V / 3600 rpm) até o ponto de operação máximo (4,84 V / 3485 rpm). O resultado foi constatado e coletado com o auxílio do osciloscópio da bancada e pode ser visto na Figura 16. A resposta representa o torque medido pelo TT e seu sinal encontra-se em valores de tensão negativos (como mencionado na subseção 2.9.3).

Figura 16 – Resposta da planta a ser identificada a uma entrada degrau unitário



Fonte: Elaborada pelo autor.

A constante de tempo é o tempo necessário para a resposta ao degrau atingir 63% de seu valor final (NISE, 2013). Portanto, ao se avistar a Figura 16, pode-se inferir que τ vale aproximadamente 1 s e que o tempo de acomodação da planta é de aproximadamente 5 s. Consequentemente, a identificação resultou em uma função de transferência de primeira ordem e assim, tornou-se possível estimar a ordem do modelo (como mencionado na seção 3.2). Logo, dimensionou-se o sinal APRBS para que este ficasse em cada nível por aproximadamente 5 s.

3.2.2.4 Implementação do sinal APRBS

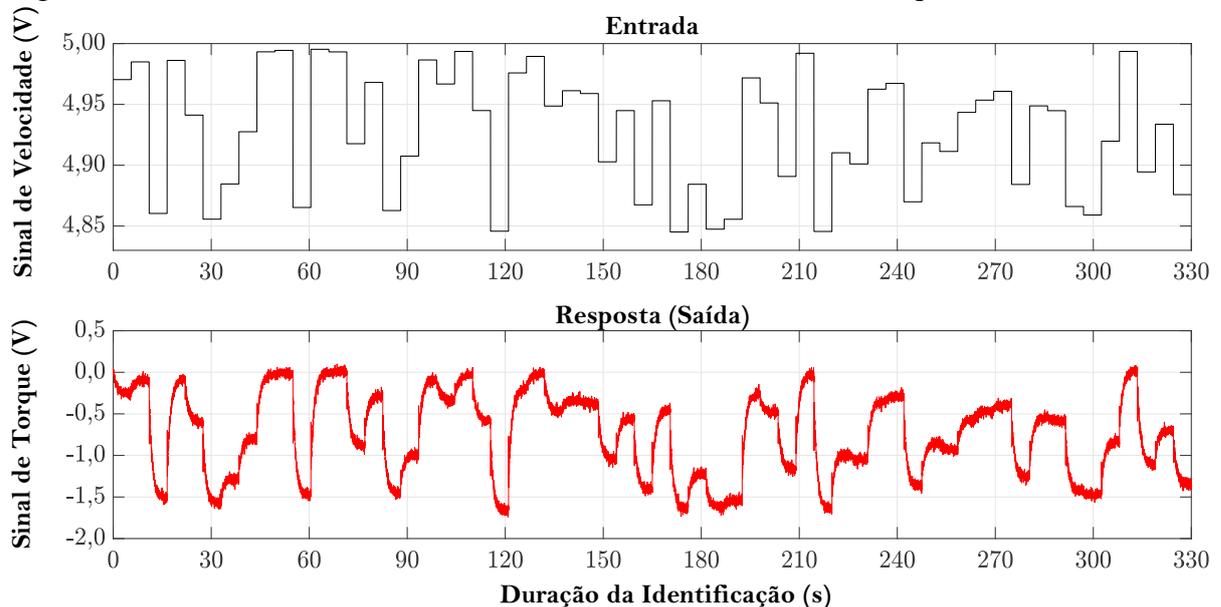
Foi desenvolvido um algoritmo, em que é gerado um sinal de excitação *APRBS* de 60 níveis aleatórios. Este algoritmo é executado em um tempo de 13,75 ms (tempo de amostragem), para cada nível enviado. Portanto, para garantir que cada nível de excitação cubra a dinâmica observada na Figura 16, modificou-se o algoritmo para o mesmo realizar cada nível em 5,5 s, o que representa uma duração de 330 s ou 5 min e 30 s.

Através da entrada analógica do INVT4Q, o sinal *APRBS* é enviado via PAD e computador. Estes, realizam a leitura e aquisição dos sinais de torque e os dados são armazenados para a posterior identificação e validação no aplicativo do pacote computacional.

3.2.2.5 Resultados

Após realizado o ensaio de identificação do sistema, foram obtidos alguns resultados, os quais podem ser visualizados na Figura 17.

Figura 17 – Sinal de entrada *APRBS* (velocidade) e sinal de saída (torque)

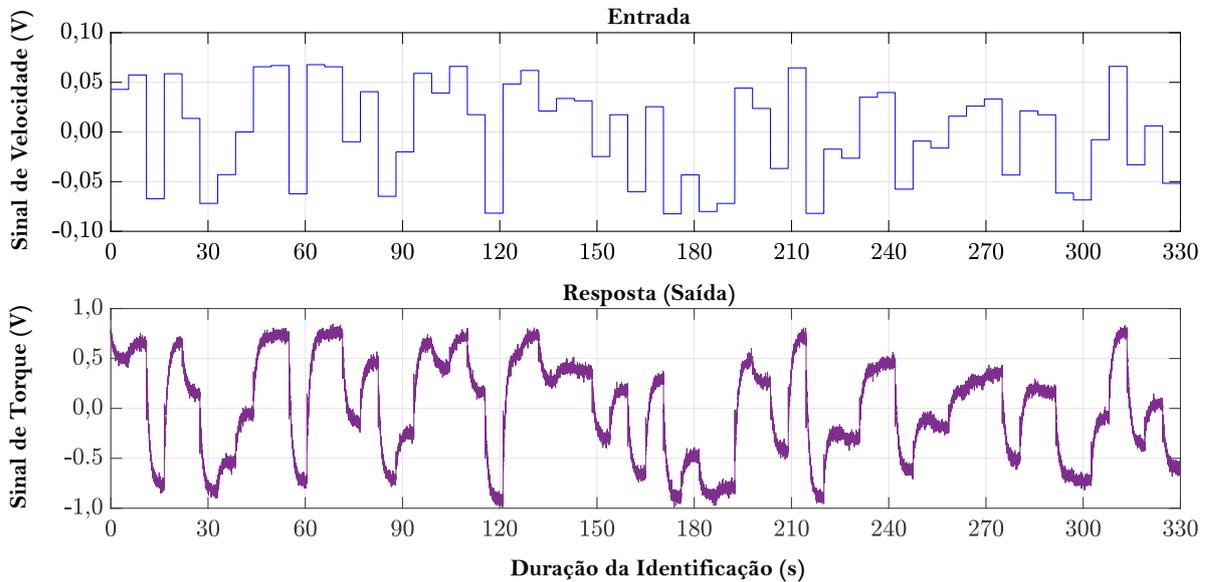


Fonte: Elaborada pelo autor.

Para uma correta identificação, se faz necessário eliminar a componente CC — correspondente ao ponto de operação — tanto do sinal de entrada quanto do sinal de saída (LANDAU; ZITO, 2006). Assim, calculou-se o valor médio dos sinais de entrada e saída e estes valores foram subtraídos de seus sinais originais. Estes dois novos sinais originados foram utilizados pelo aplicativo disponibilizado pelo pacote computacional utilizado, para a

identificação e validação. A forma dos sinais se manteve a mesma, porém estes agora passam pela origem, conforme ilustra a Figura 18.

Figura 18 – Sinal de entrada *APRBS* (velocidade) e sinal de saída (torque) (sem a componente CC)



Fonte: Elaborada pelo autor.

Com o emprego do aplicativo, foi feita a estimativa do modelo do sistema. De acordo com sua documentação, o aplicativo recebe os dados da entrada aplicada a um sistema que se deseja identificar e da saída registrada como resposta a essa entrada, bem como o número de polos e zeros, o atraso de transporte desejado e o tempo de amostragem usado na aquisição dos dados. Os parâmetros da função de transferência foram estimados utilizando a estrutura matemática linear *Autoregressive with Exogeneous Inputs (ARX)*, a qual emprega um algoritmo estimador por mínimos quadrados *Least Square Estimator (LSE)* (MATHWORKS, 2018).

Foram adotados um zero e um polo (planta de 1ª ordem), nenhum atraso de transporte e um tempo de amostragem de 13,75 ms. De acordo com a Figura 19, o modelo estimado alcançou uma exatidão ou *fit* de 89,6% em relação aos dados coletados.

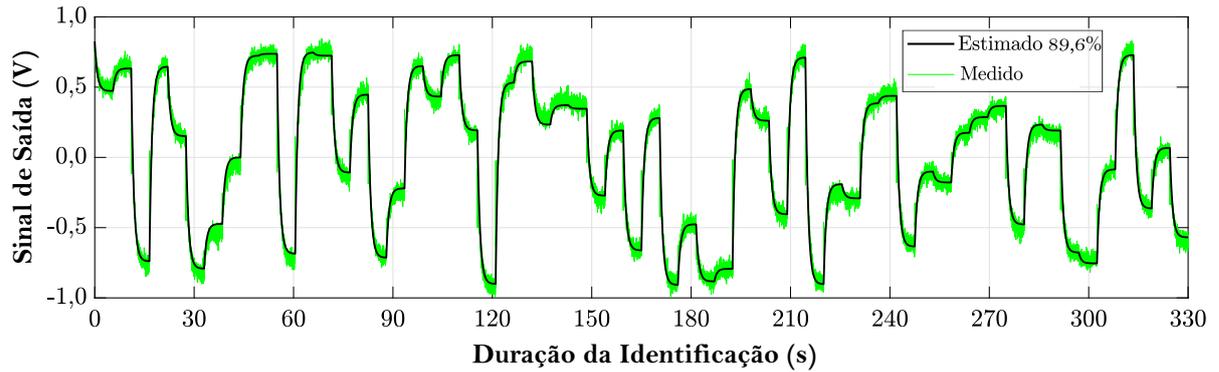
Assim, a planta identificada (tipicamente de 1ª ordem) tem função de transferência no modelo *ARX* e tempo discreto (para um tempo de amostragem de 13,75 ms) dada por:

$$G(z^{-1}) = \frac{0,1967z^{-1}}{1 - 0,9822z^{-1}}. \quad (3.1)$$

Empregando-se o método de conversão do tempo discreto para o contínuo, chamado *Zero-Order Hold (ZOH)*, obteve-se a seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{14,03}{s + 1,309}. \quad (3.2)$$

Figura 19 – Sinal de saída tratado e sinal estimado com exatidão de 89,6%



Fonte: Elaborada pelo autor.

4 CONTROLE DE TORQUE

Este capítulo tem como objetivo mostrar qual a variável será controlada, bem como os motivos da escolha do controlador empregado, seu projeto, sintonia e implementação na bancada de ensaios. Inicialmente será descrito a proposta de controle que se deseja efetuar na estrutura de testes. Posteriormente, será vista a estratégia adotada para o controlador de torque. Em seguida, será abordada um pouco da fundamentação teórica da topologia de controle digital utilizada e a maneira como foi realizado o projeto e sintonia do controlador digital. Por fim, serão mostrados os valores calculados e a implementação prática.

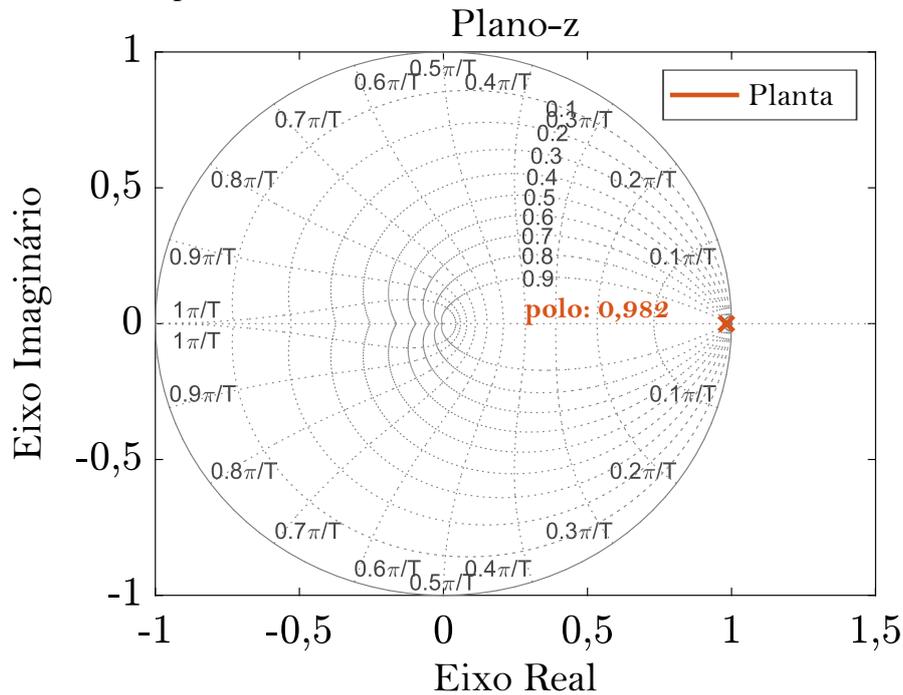
4.1 Introdução

A estratégia de controle utilizada neste trabalho é um controlador PI, escrito na topologia *RST*. Será realizado o projeto e a implementação prática de uma malha de controle de torque, a qual ficará externa à malha de controle de velocidade. O controle de torque será feito de forma assíncrona ao controle de velocidade, ou seja, os dados de realimentação utilizados nas malhas de velocidade e torque, bem como seus tempos de amostragem, são diferentes e são embarcados em dispositivos com *clock* distintos. Isto não afeta a eficácia do controle, pois tem-se uma malha externa de torque bem mais lenta que a malha de corrente do inversor (interna à malha de velocidade). Esta assincronia, possibilita um controle através de alguma unidade de processamento independente, como por exemplo um Controlador Lógico Programável (CLP), embarcado em placa de desenvolvimento ou em microcomputador.

4.2 Projeto do controlador de torque

Para a realização de um projeto de um controlador de torque, se faz necessário uma alocação adequada de polos e zeros no tempo discreto. A planta identificada (dada pela Equação 3.1) é de primeira ordem e estável em malha aberta (conforme Figura 20) e portanto, possui um polo no interior do círculo de raio unitário (no plano- z). Logo, esta planta pode ser controlada, por exemplo, por um controlador Proporcional Integral (PI) ou mesmo um Proporcional Integral Derivativo (PID).

Figura 20 – Gráfico do Plano-z contendo o polo de malha aberta da planta identificada



Fonte: Elaborada pelo autor.

Segundo Fadali e Visioli (2009), o método do lugar das raízes permite uma rápida maneira de prever o comportamento em malha fechada de um sistema, baseado em seus polos e zeros em malha aberta. O método é baseado nas propriedades da equação característica em malha fechada. Portanto, a análise de alocação de polos através do método do lugar das raízes se torna adequada ao projeto aqui proposto.

Convém destacar que para o projeto de controle, deve-se buscar um controlador de menor ordem possível, capaz de atender às especificações de projeto e desempenho desejadas. Neste contexto, o controlador PI se mostra como a escolha certa pois é de fácil implementação e há o desejo de controlar uma planta de primeira ordem. Além do mais, este é o controlador de mais baixa ordem, no qual apresenta um integrador. Este último aspecto garante erro nulo no seguimento de referência ao degrau (como é caso deste trabalho). Um controlador PI tem função de transferência em tempo discreto dada por:

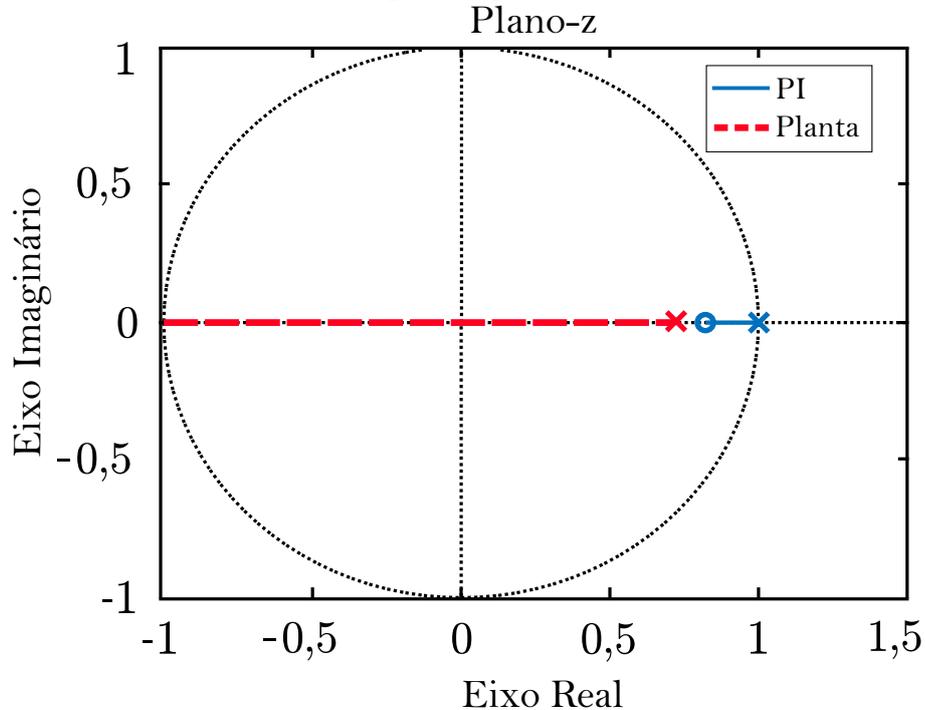
$$C(z) = K_c \frac{z - z_c}{z - p_c}, \quad (4.1)$$

em que K_c é o ganho, z_c é o zero e z_p é o polo do controlador. O projeto consiste então em encontrar os valores destas variáveis que atendam a especificações previamente estabelecidas.

De acordo com a Figura 21, ao se alocar um polo em $z_p = 1$ no eixo real, tem-se um integrador puro. Alocando-se um zero z_c à direita do polo da planta e sobre o eixo real tem-se

uma resposta não oscilatória, porém o zero do controlador é dominante em relação ao polo da planta, levando o sistema em malha fechada a apresentar sobressinal.

Figura 21 – Gráfico do lugar das raízes de um controlador PI com o zero à direita do polo da planta

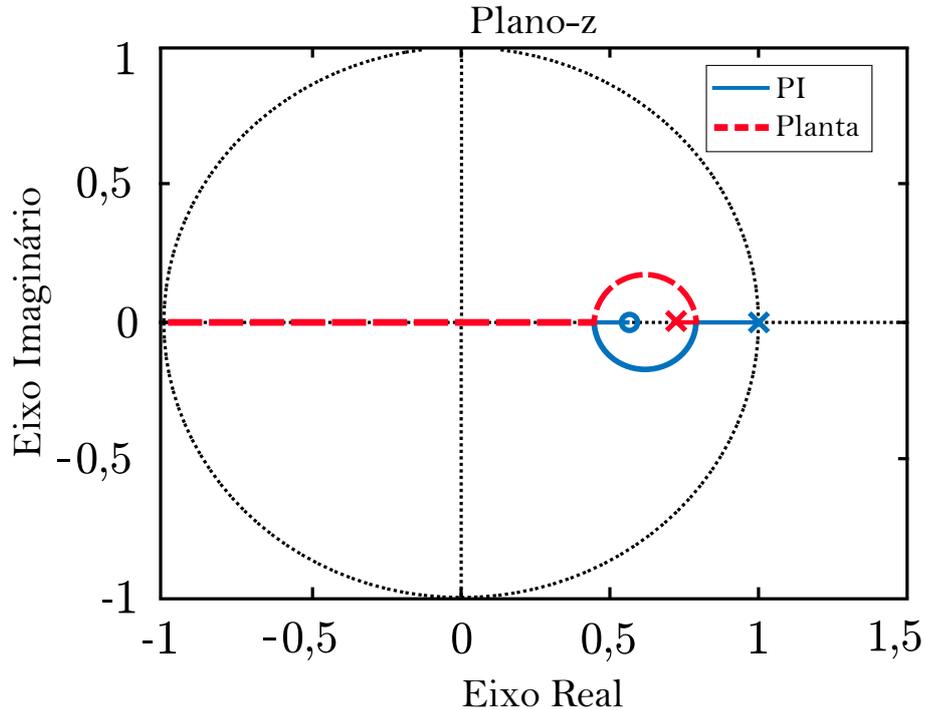


Fonte: Elaborada pelo autor.

Mantendo o integrador puro e alocando agora o zero z_c à esquerda do polo da planta, conforme se observa na Figura 22, pode-se encontrar um posicionamento tal que o zero do controlador é dominado pelo polo da planta, porém isso leva o diagrama de lugar das raízes a se deslocar por uma região do plano-z em que os polos da malha fechada apresentam parte complexa não nula. Isso significa que o sistema em malha fechada passa a apresentar resposta oscilatória.

Este tipo de alocação com um polo e um zero é característica básica de um controlador PI. Então, percebe-se que este tipo de controlador já poderia resolver o problema de controle de uma planta de primeira ordem. Porém, encontrar o ponto certo para alocar o zero do controlador para, na sequência, encontrar o ganho que posiciona os polos da malha fechada em uma posição desejada, torna-se uma tarefa difícil e não intuitiva. Este processo tem que ser repetido até que o projetista encontre a melhor relação de compromisso que satisfaça às especificações de desempenho desejadas. Para contornar esse problema, pode-se considerar a estratégia de implementação do controlador PI na forma *RST*, a qual é objeto de estudo da seção seguinte.

Figura 22 – Gráfico do lugar das raízes de um controlador PI com o zero à esquerda do polo da planta

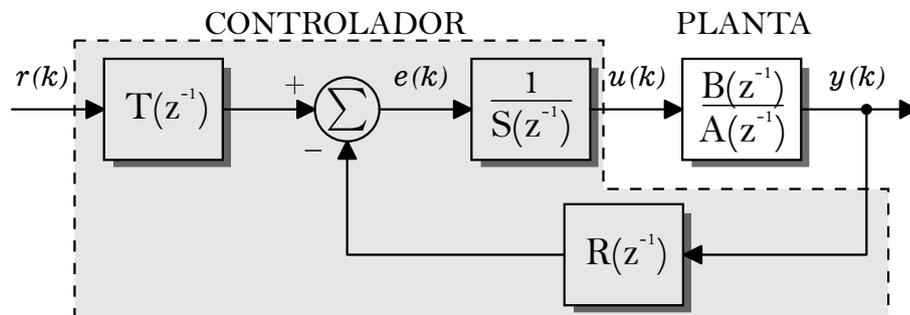


Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1 Topologia RST

Esta seção será acerca da estrutura canônica *RST* do controlador digital PI, onde pode ser vista na Figura 23. Esta topologia é dita ter dois graus de liberdade, assim é possível impor diferentes especificações de projeto, uma para o seguimento de referência e outra para a regulação (LANDAU; ZITO, 2006).

Figura 23 – Diagrama de blocos de um controlador digital na estrutura canônica *RST*



Fonte: Adaptado de Landau e Zito (2006).

O sinal de referência é denotado por $r(k)$, enquanto $u(k)$ representa o sinal de controle aplicado à planta, produzindo a saída $y(k)$. Os polinômios que compõem o controlador PI são: $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$.

A função de transferência em malha aberta, do sistema identificado no tempo discreto, é dada por:

$$G(z^{-1}) = \frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}, \quad (4.2)$$

em que:

$$B(z^{-1}) = b_1 z^{-1} \quad (4.3)$$

$$A(z^{-1}) = 1 + a_1 z^{-1}. \quad (4.4)$$

De acordo com Landau e Zito (2006), a estrutura *RST* do controlador digital PI, é caracterizada pelos seguintes polinômios:

$$R(z^{-1}) = r_0 + r_1 z^{-1} \quad (4.5)$$

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1} \quad (4.6)$$

$$T(z^{-1}) = t_0 + t_1 z^{-1}. \quad (4.7)$$

Sendo assim, a função de transferência de malha fechada, com relação à entrada, é dada por:

$$H_{CL}(z^{-1}) = \frac{Z_{CL}(z^{-1})}{P_{CL}(z^{-1})}, \quad (4.8)$$

em que:

$$Z_{CL}(z^{-1}) = B(z^{-1})T(z^{-1}) \quad (4.9)$$

$$P_{CL}(z^{-1}) = A(z^{-1})S(z^{-1}) + B(z^{-1})R(z^{-1}). \quad (4.10)$$

O polinômio característico $P_{CL}(z^{-1})$ deve ser sintonizado de acordo com as especificações de desempenho desejadas, ou seja, deve possuir os mesmos polos (p_1 e p_2) da função de transferência de desempenho (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1997). Já o polinômio $Z_{CL}(z^{-1})$ deve ser sintonizado de acordo com os zeros (z_1 e z_2) da função de transferência de desempenho. Portanto, tem-se que:

$$P_{CL}(z^{-1}) = 1 + p_1 z^{-1} + p_2 z^{-2} = 1 + (a_1 - 1 + r_0 b_1) z^{-1} + (b_1 r_1 - a_1) z^{-2} \quad (4.11)$$

$$Z_{CL}(z^{-1}) = z_1 z^{-1} + z_2 z^{-2} = (b_1 t_0) z^{-1} + (b_1 t_1) z^{-2}. \quad (4.12)$$

Logo, de posse dos polos e zeros da função de transferência de desempenho e dos coeficientes da planta, obtém-se:

$$r_0 = \frac{p_1 - a_1 + 1}{b_1} \quad (4.13)$$

$$r_1 = \frac{p_2 + a_1}{b_1} \quad (4.14)$$

$$t_0 = \frac{z_1}{b_1} \quad (4.15)$$

$$t_1 = \frac{z_2}{b_1}. \quad (4.16)$$

4.2.2 Controlador PI na estrutura RST

Para o projeto do controlador, se faz necessário discretizar a função de transferência em tempo contínuo apresentada na Equação (3.2). Todavia, agora com um tempo de amostragem diferente do adotado para o processo de identificação. Utilizando o pacote computacional de matemática, foi escolhido um método de aproximação *backward* com tempo de amostragem de 0,1 s, obtendo-se a função de transferência discreta em malha aberta a seguir:

$$G(z^{-1}) = \frac{1,353z^{-1}}{1 - 0,8773z^{-1}}, \quad (4.17)$$

em que:

$$B(z^{-1}) = 1,353z^{-1} \quad (4.18)$$

$$A(z^{-1}) = 1 - 0,8773z^{-1}. \quad (4.19)$$

Assim, a partir da Equação (4.17), é possível projetar um controlador PI com a estrutura RST.

4.2.2.1 Especificações de desempenho desejadas

O desempenho esperado pela malha de torque foi especificado baseando-se no tempo de acomodação e no máximo sobressinal de uma função de transferência de segunda ordem no tempo contínuo (ÅSTRÖM; WITTENMARK, 1997):

$$G_{des}(s) = \frac{\omega^2}{s^2 + 2\zeta\omega s + \omega^2}. \quad (4.20)$$

A Tabela 3 apresenta as especificações de desempenho desejadas para o projeto do controlador.

Tabela 3 – Especificações de desempenho PI (*RST*)

Especificações	<i>Setpoint</i>
Tempo de acomodação (s)	2
Máximo sobressinal (%)	1

Fonte: Elaborada pelo autor.

Portanto, com base nos critérios de desempenho, calculam-se os parâmetros da Equação 4.20. Os resultados encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Parâmetros da função de transferência de desempenho

Parâmetro	Símbolo	Valor
Fator de Amortecimento	ζ	0,8261
Frequência Natural	ω (rad/s)	2,7149

Fonte: Elaborada pelo autor.

Estes critérios de desempenho resultam na seguinte função de transferência no tempo contínuo:

$$G_{des}(s) = \frac{7,371}{s^2 + 4,486s + 7,371}. \quad (4.21)$$

Discretizando a Equação 4.21, para o tempo de amostragem de 0,1 s, tem-se:

$$G_{des}(z^{-1}) = \frac{0,03172z^{-1} + 0,02731z^{-2}}{1 - 1,58z^{-1} + 0,6386z^{-2}}. \quad (4.22)$$

Tanto o numerador como o denominador da Equação 4.22, devem ser iguais aos polinômios $Z_{CL}(z^{-1})$ e $P_{CL}(z^{-1})$ da função de transferência de malha fechada $H_{CL}(z^{-1})$, respectivamente.

4.2.2.2 Cálculo dos parâmetros do controlador

Escreveu-se um algoritmo que realiza o projeto de forma automatizada e fornece os valores dos coeficientes r_0 , r_1 , t_0 e t_1 , para a composição dos polinômios $R(z^{-1})$, $S(z^{-1})$ e $T(z^{-1})$. O controlador PI, na estrutura *RST*, tem ação integral dada pelo polinômio $S(z^{-1})$:

$$S(z^{-1}) = 1 - z^{-1}. \quad (4.23)$$

Assim, a partir dos valores apresentados na Tabela 3 e considerando o projeto de posicionamento de polos e zeros (LANDAU; ZITO, 2006), foram obtidos os polinômios $R(z^{-1})$

e $T(z^{-1})$:

$$R(z^{-1}) = 0,2201 - 0,1765z^{-1} \quad (4.24)$$

$$T(z^{-1}) = 0,02345 + 0,02019z^{-1}. \quad (4.25)$$

Portanto, a equação de diferenças assume a seguinte forma:

$$u[k] = u[k-1] + t_0 \cdot r[k] + t_1 \cdot r[k-1] - r_0 \cdot y[k] - r_1 \cdot y[k-1]. \quad (4.26)$$

Fazendo a substituição dos coeficientes, tem-se:

$$u[k] = u[k-1] + 0,02345 \cdot r[k] + 0,02019 \cdot r[k-1] - 0,2201 \cdot y[k] + 0,1765 \cdot y[k-1]. \quad (4.27)$$

A Tabela 5 mostra um resumo dos coeficientes calculados.

Tabela 5 – Parâmetros do controlador de torque

	Coeficientes	Valores
R	r_0	0,2201
	r_1	-0,1765
S	s_1	-1
T	t_0	0,02345
	t_1	0,02019

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.3 Implementação do controlador de torque

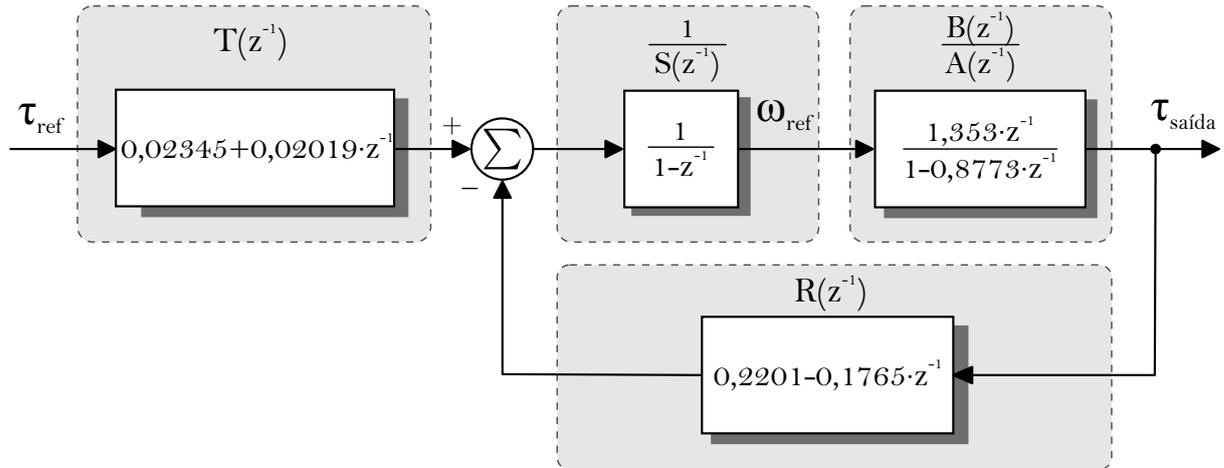
De posse dos parâmetros do controlador de torque, montou-se o diagrama de blocos seguindo o padrão da estrutura *RST*, conforme pode ser visto na Figura 24.

A função de transferência de malha fechada, com relação à entrada, é dada pela Equação 4.8. Substituindo-se os valores dos polinômios encontrados na Figura 24, tem-se:

$$H_{CL}(z^{-1}) = \frac{0,03172z^{-1} + 0,02731z^{-2}}{1 - 1,58z^{-1} + 0,6386z^{-2}}. \quad (4.28)$$

Percebe-se que a Equação 4.28 é igual a Equação 4.22. Isto é esperado, visto que a função de transferência de malha fechada do controlador de torque [$H_{CL}(z^{-1})$] foi projetada para ter a mesma dinâmica da função de transferência desejada [$G_{des}(z^{-1})$].

Figura 24 – Diagrama de blocos do controlador PI projetado na estrutura canônica *RST*

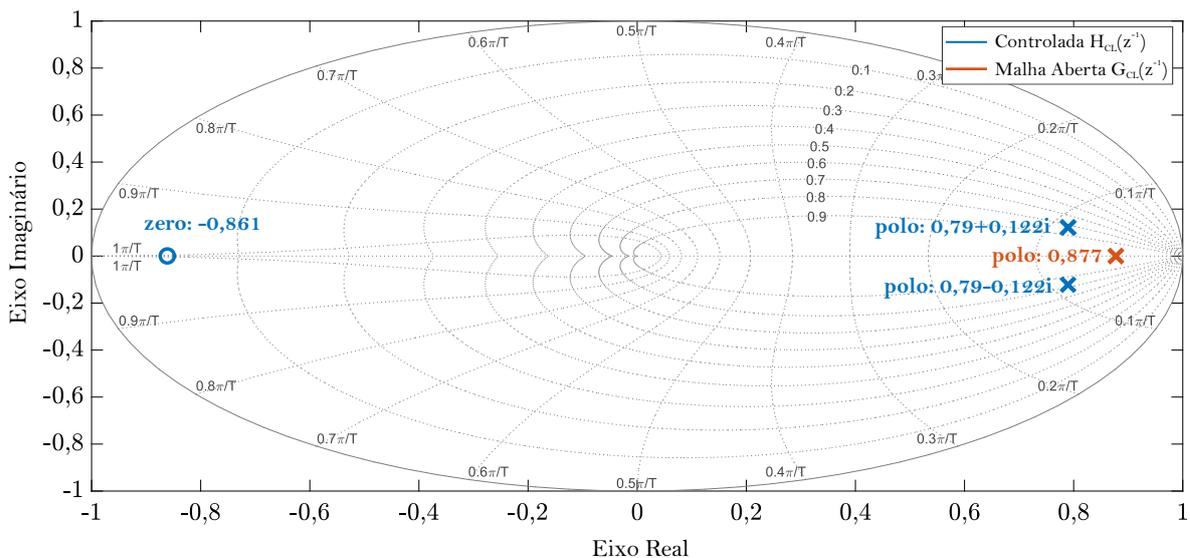


Fonte: Elaborada pelo autor.

Como mencionado no início da seção 4.2, o problema de se encontrar o ponto certo para alocar polos e zeros foi contornado mediante a estratégia de implementação do controlador PI na estrutura *RST*. Observa-se na Figura 25 o plano- z , bem como a disposição dos polos e zeros de $G(z^{-1})$ e de $H_{CL}(z^{-1})$. Portanto, esta é a configuração de alocação cujas especificações de desempenho são atingidas.

Além disso, é possível verificar o critério de estabilidade das duas funções de transferência. $G(z^{-1})$ tem um polo dentro do círculo unitário e $H_{CL}(z^{-1})$ tem um zero e dois polos, ambos dentro do círculo unitário. Logo, as duas funções de transferência são estáveis.

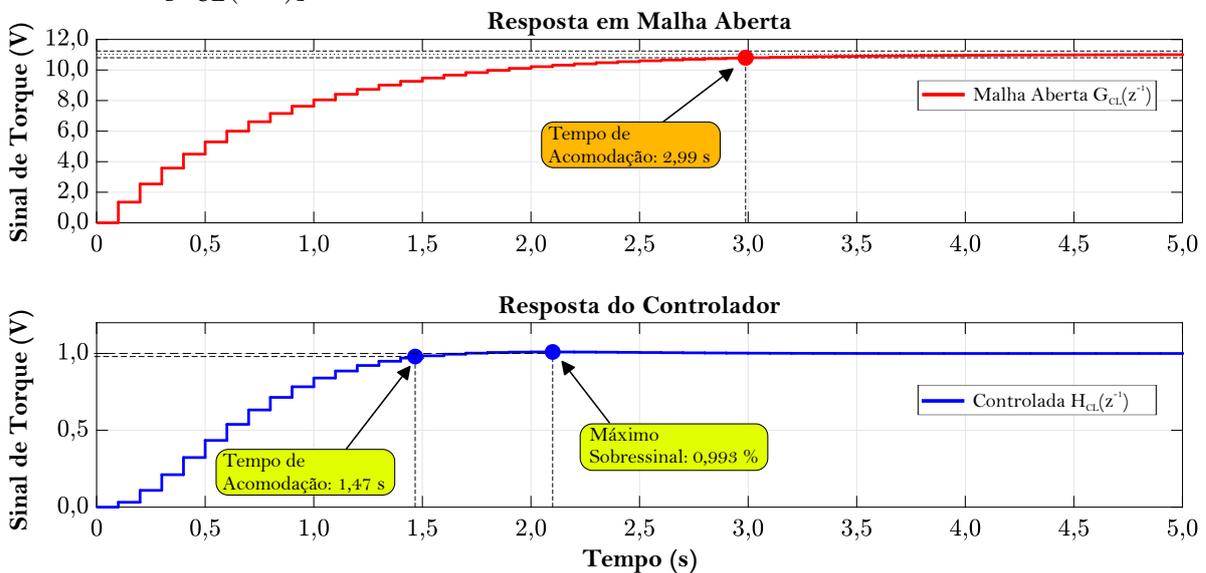
Figura 25 – Gráfico do plano Z mostrando os polos e zeros de $G(z^{-1})$ e de $H_{CL}(z^{-1})$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Comparou-se a resposta em malha aberta do sistema com a resposta controlada e de acordo com a Figura 26, nota-se que a resposta em malha aberta tem um tempo de acomodação de 2,99 s e tem valor final de aproximadamente 12 V. Este valor é devido a não inclusão do ganho original oriundo do modelo identificado. Por outro lado, o projeto do controlador contempla a restauração desse ganho e portanto, realiza o controle do sistema obtendo valor final unitário. Os motivos para esta abordagem são de cunho prático. Será visto na seção seguinte que esta estratégia proporciona um sinal de controle com um menor sobressinal e assim não leva o controlador à saturação.

Figura 26 – Gráfico comparativo entre as respostas de malha aberta $[G(z^{-1})]$ e controlada $[H_{CL}(z^{-1})]$



Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando a resposta do controlador, verifica-se que este cumpriu com suas especificações de desempenho listadas na Tabela 3. O tempo de acomodação ficou um pouco mais rápido — 1,47 s — e o máximo sobressinal ficou em praticamente 1%.

5 RESULTADOS

Após visto todo o detalhamento do processo de identificação da planta da bancada bem como o projeto do controlador de torque, é possível dar os passos finais para a conclusão deste trabalho. O desafio agora será executar este controlador na bancada de ensaios, observar seus resultados experimentais e compará-los com os resultados simulados.

5.1 Execução do controlador

Como descrito na seção 2.9, realizou-se os procedimentos operacionais a fim de preparar a bancada para receber o comando de controle via *software*. O algoritmo realiza a partida do ME através de uma rampa de aceleração de aproximadamente 2 s. Após isso, é realizada a partida do MSE com o auxílio do autotransformador, tornando a bancada pronta para ser controlada.

Dessa forma, o controlador de torque, ou seja, o controlador da malha externa (implementado em computador), atua de forma assíncrona com o controlador das malhas elétricas (inversor). Assim, somente a referência de velocidade é passada para atuação dos controladores de corrente e tensão.

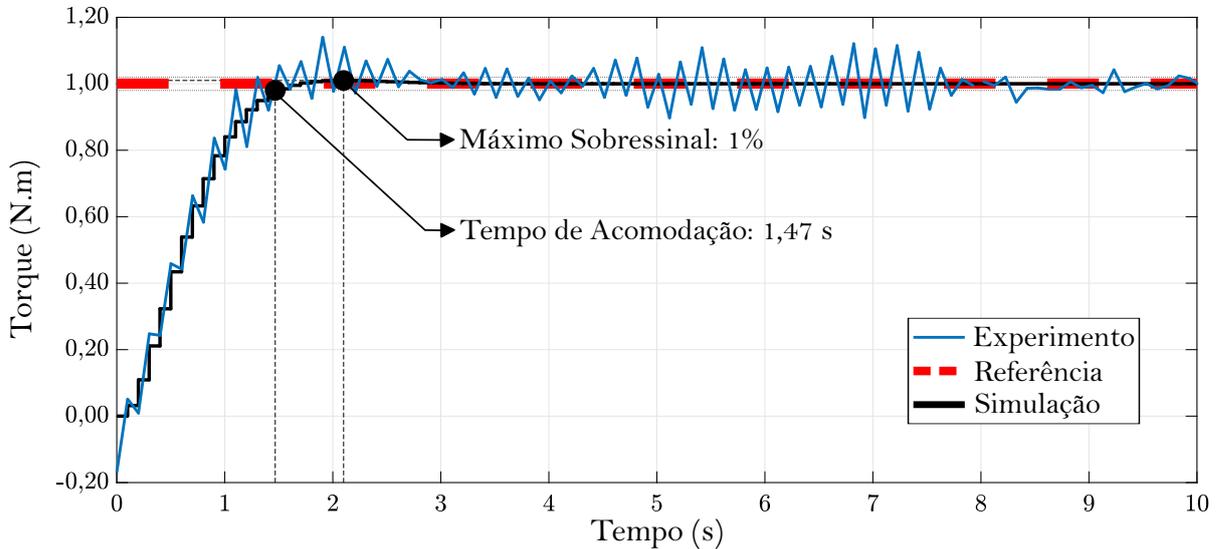
O sinal de controle é enviado e o mesmo efetua o controle de torque dentro de uma faixa entre 0 $N\cdot m$ e 3,30 $N\cdot m$ — o *setpoint* é escolhido via algoritmo. O acompanhamento em tempo real dos sinais de controle e de velocidade são feitos com o auxílio do osciloscópio digital da bancada e os dados são armazenados no computador. A duração do sinal de controle também é definido via código de programação, assim o usuário pode estabelecer qualquer valor de tempo para a duração do ensaio. Realizou-se um ensaio com duração de 1 *min*, cuja a lei de controle foi feita via algoritmo e permaneceu durante o tempo proposto. O torque de referência adotado foi de 1,00 $N\cdot m$.

5.2 Resultados experimentais

Observam-se, no gráfico da Figura 27, os dados de torque coletados no ensaio. A duração do ensaio foi de 1 *min*, porém o gráfico ilustra apenas os 10 s iniciais de teste. Esta janela de tempo é suficiente para se verificar a dinâmica do controlador na prática e compará-lo com os resultados simulados. Dessa forma, é possível visualizar a resposta da planta desejada, bem como suas especificações de desempenho e a referência de torque (1,00 $N\cdot m$). É importante destacar

que os dados de torque foram inseridos na Figura 27, de forma que ficassem positivos. Isto com o objetivo de se fazer uma melhor análise comparativa com as especificações de desempenho.

Figura 27 – Gráfico dos resultados experimentais do controle de torque vs. resultados simulados



Fonte: Elaborada pelo autor.

Nota-se que em relação ao tempo de acomodação, os resultados experimentais foram bastantes satisfatórios, seguindo muito bem a dinâmica de acomodação desejada. O máximo sobressinal dos dados experimentais apresentou um valor acima de 1%.

Uma maneira de se quantificar o desempenho de um controlador é através do cálculo do *Integral Square Error (ISE)* e da variância do sinal em regime permanente (SKOGESTAD; POSTLETHWAITE, 2005). Dessa forma, foram calculados o *ISE* e a variância, ambos no intervalo de tempo $t \approx 3 s$ até $t = 60 s$. O *ISE* resultou em 1,2535 e a variância em 0,0023.

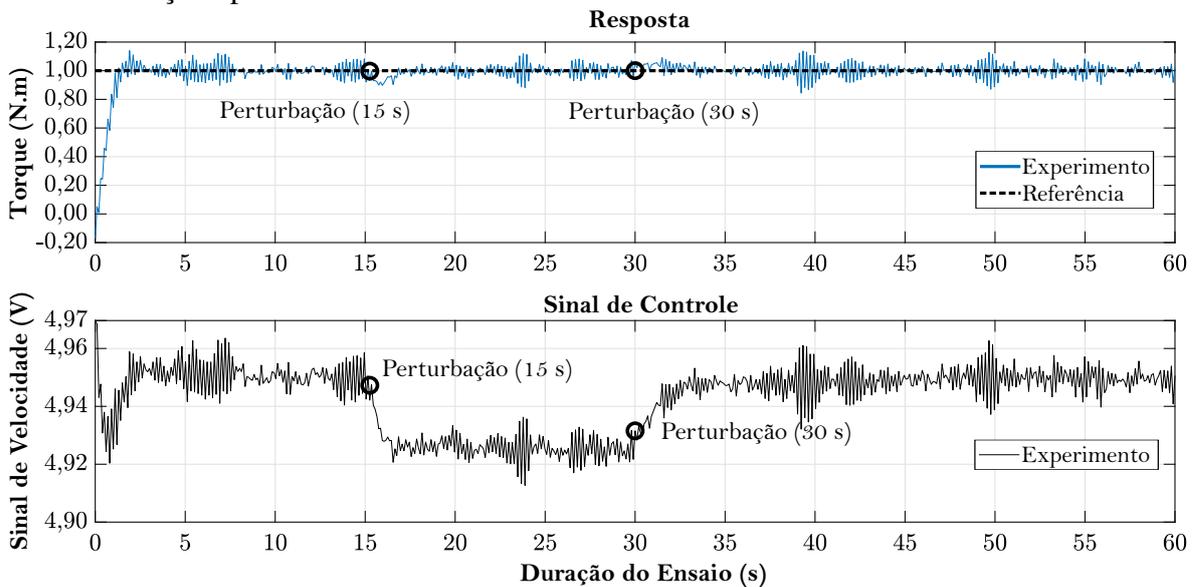
De acordo com a análise dos indicadores e da resposta observada, o ruído apresentado pelo sistema tem ordem de grandeza maior que a variação perceptível de 1 % no regime transitório. Nesse contexto, conclui-se que o controlador apresenta resposta experimental de acordo com o especificado em projeto.

O sinal de controle pode ser observado na Figura 28. De acordo com as limitações da PAD, este só pode atingir o valor de +5 V. Portanto, o sinal de controle não deve ter um máximo sobressinal que ultrapasse este valor. Porém, a simulação do sinal de controle leva em conta apenas uma entrada ao degrau. Logo, não replica o ponto de operação requerido pela planta. A estratégia utilizada para contornar este problema foi retirar o ganho proporcional do modelo estimado na identificação e deixá-lo para o controlador de torque realizar essa compensação. Dessa forma, na prática, o sinal de controle conseguiu se manter em valores satisfatórios, dentro

da faixa de operação da PAD (+4,84 V à +5 V) e, conseqüentemente, sem saturar o controlador.

Como pode ser percebido na Figura 28, no instante de tempo $t \approx 15$ s, aplicou-se uma perturbação do tipo degrau unitário, com duração aproximada de 15 s, obtida a partir da redução na tensão de alimentação do MSE. Esta foi reduzida de 380 V para 300 V. Entretanto, essa operação foi realizada manualmente através do autotransformador. No instante de tempo $t \approx 30$ s, retornou-se com a tensão nominal de 380 V.

Figura 28 – Gráfico dos resultados experimentais do controle de torque com ênfase na perturbação aplicada



Fonte: Elaborada pelo autor.

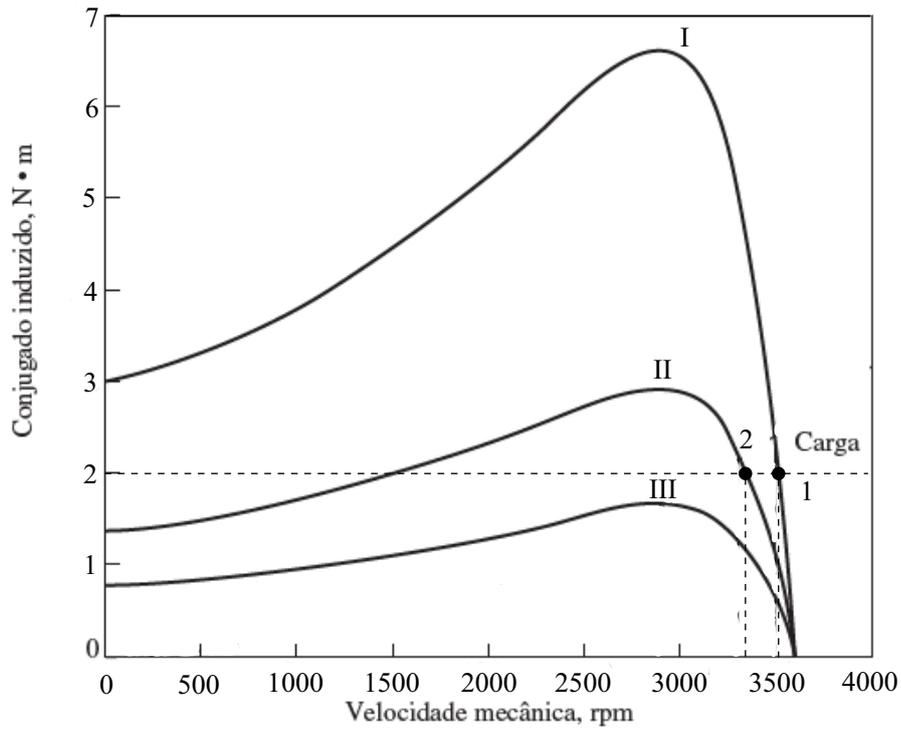
Segundo Chapman (2013), o torque desenvolvido por um motor de indução é proporcional ao quadrado da tensão aplicada. Portanto, com a queda na tensão de alimentação, o torque do MSE caiu — como pode ser visto na Figura 28. Neste momento o controlador atua, diminuindo a referência de velocidade do conjunto INVT4Q-ME. O torque eletromagnético do ME diminuiu, a fim de que o MSE restaure o torque resultante para o valor de referência previsto (1,00 N·m).

Com a restauração da tensão de alimentação do MSE, o funcionamento ocorre de forma oposta. O torque do mesmo aumenta e portanto o controlador atua — aumentando a referência de velocidade do conjunto INVT4Q-ME — para que o ME aumente seu torque eletromagnético e dessa forma reequilibre o torque resultante, retomando novamente a referência de 1,00 N·m.

Uma perturbação no limite, levaria a curva de conjugado do MSE para baixo da curva de carga, impossibilitando qualquer ponto de operação. Se a curva de carga ficasse no limiar da

curva de conjugado do MSE, também haveria problemas, pois seria um ponto de instabilidade operacional e de sobrecarga. Na Figura 29, torna-se mais ilustrável a forma como as curvas de conjugado de um motor de indução variam com a tensão de alimentação. Os pontos de operação

Figura 29 – Controle de velocidade por variação da tensão de linha de um motor de indução



Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

1 e 2, são possíveis para as curvas I e II, respectivamente, porém para a curva de conjugado III, nenhum ponto de operação (em relação à carga em questão) é possível.

6 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho teve como principais motivações a validação de uma estratégia de controle de torque — de forma assíncrona — em cascata com uma malha de velocidade. Para isto foram necessários o conhecimento de todos os dispositivos da bancada, bem como seus aspectos mais relevantes para o desenvolvimento do trabalho. A partir disso, identificou-se a parte da bancada referente a malha de velocidade e com base na no modelo estimado, foi projetado e sintonizado um controlador de torque. Foram verificados os resultados experimentais e estes foram comparados com os resultados simulados. Nesta seção, serão feitas considerações finais referentes a este trabalho e em seguida serão propostas sugestões de estudos futuros.

6.1 Conclusões

Através do estudo minucioso de todos os dispositivos, cuja a bancada experimental para ensaio de motores é composta, bem como a leitura de seus respectivos manuais, selecionou-se as informações mais relevantes para a realização do objetivo principal deste trabalho, o qual veio a ser o controle de torque com acionamento de velocidade variável. Esta parte foi concluída de maneira satisfatória visto que muitos equipamentos, tais como o INVT4Q e a PAD, proporcionaram muitas horas de estudo, leitura e experimentos individuais para a absorção de suas funcionalidades mais relevantes a este trabalho. Toda esta pesquisa inicial foi documentada, a fim de que trabalhos futuros na estrutura não necessitem percorrer todo o caminho do início.

Com a familiarização dos componentes da estrutura, a próxima etapa foi entender de forma clara o princípio de funcionamento desta bancada, como por exemplo os sentidos de rotação das máquinas elétricas e a forma como o sistema recupera a energia elétrica e a retorna à rede. O manuseio do *software TIA PORTAL*[®], bem como seu comissionamento, foram efetuados com êxito, porém a grande dificuldade residiu na necessidade de se configurar parâmetros mais intrínsecos ao inversor, tais como o dimensionamento das entradas analógicas, partida automática e retirada das rampas de aceleração e desaceleração.

Os algoritmos projetados para a aquisição e envio de sinais foram amplamente testados com o auxílio do osciloscópio, antes de serem implementados diretamente na bancada. Isso possibilitou a realização, com segurança e eficiência, de todo o processo de identificação da planta de velocidade. Portanto, a função de transferência necessária para o projeto do controlador

foi estimada com êxito. Esta, atingiu uma exatidão de quase 90% em relação ao modelo original.

A resposta da planta em malha fechada a uma entrada em degrau unitário proporcionou excelentes resultados na simulação e foram capazes de gerar confiança para a implementação prática. Porém, encontrou-se um problema em relação ao sinal de controle. Este não conseguiu ser reproduzido muito bem na simulação, pois encontraram-se dificuldades em replicar as reais condições operacionais via pacote computacional. Portanto, decidiu-se realizar o processo empírico, ou seja, com base no modelo estimado da planta de velocidade, optou-se por uma estratégia de controle na qual o ganho da planta identificada fosse retirado e este fosse restaurado através do controlador. Dessa forma, o sinal de controle não saturou e o mesmo conseguiu realizar o controle do torque na bancada para uma referência no valor de $1 \text{ N}\cdot\text{m}$.

O controlador de torque desenvolvido obteve sucesso tanto em sua implementação por simulação quanto na bancada em laboratório. A diferença na velocidade de atuação entre a malha de torque e a malha de corrente do INVT4Q, possibilitou a implementação bem sucedida do controle assíncrono entre as malhas. O comportamento do perfil de torque constante permaneceu dentro do especificado em projeto, mesmo o ruído tendo apresentado ordem de grandeza maior que o máximo sobressinal desejado. Ao se aplicar uma perturbação — com a redução na tensão de alimentação do MSE — o controlador se mostrou robusto, rejeitando a perturbação e retomando o ponto de operação referencial.

6.2 Trabalhos futuros

Como futuros trabalhos, sugere-se:

- **Embarcar o controlador projetado neste trabalho em um CLP:** é possível realizar a implementação do controle de torque desenvolvido neste trabalho, de forma assíncrona, em um CLP. Assim, tem-se um estudo de aspectos práticos voltados para a indústria;
- **Análise de robustez do controlador de torque:** é possível uma análise mais profunda de robustez, utilizando o mesmo controlador PI, na topologia *RST*;
- **Estudo, projeto e implementação de outros controladores de torque:** é possível a utilização de outros controladores de torque, como por exemplo Proporcional Integral Derivativo (PID) ou Linear Quadrático Gaussiano (LQG), e com isso fazer um comparativo de robustez, rejeição ao ruído, etc;
- **Controle de velocidade constante da bancada:** controle de velocidade cons-

tante com atuação na malha de torque, ou seja, a saída do controlador de velocidade produz as referências da malha controlada de torque. Seria um controle em cascata, sendo a malha de corrente a mais interna, enquanto a malha da variável mecânica (torque) seria posicionada mais externamente e por fim a malha de velocidade realizando o controle assíncrono da bancada;

- **Controle de potência da bancada:** através das malhas de torque e velocidade, é possível um estudo e implementação de uma malha de potência mecânica;
- **Testes automatizados, de longa duração, para o ensaio de eficiência de motores de indução:** é possível utilizar o controlador de torque deste trabalho para automatizar a bancada com o objetivo de se realizar os ensaios para medição do rendimento de motores de indução polifásicos, segundo a norma *IEEE 112-2017 - IEEE Standard Test Procedure for Polyphase Induction Motors and Generators* (Procedimentos de Teste Padrão para Motores e Geradores de Indução Polifásicos);
- **Simulação de perfis de cargas para a bancada de ensaios:** é possível emular outros tipos de curva de carga, além do perfil de torque constante. Para isso se faz necessário testes no controlador usado neste trabalho a fim de saber se o mesmo é capaz de controlar perfis parabólicos, hiperbólicos, do tipo rampa e etc. Além disso, é possível o estudo e implementação de outros controladores para a mesma finalidade.

REFERÊNCIAS

- AGAMLOH, E. B.; KIM, D. won; JEONG, J.-Y. An automated test system for induction motor efficiency measurement to ieee and iec standards. In: **Proceedings of the 7th International Conference EEMODS'11, Energy Efficiency in Motor Drive System - Alexandria, VA, EUA.** [S.l.: s.n.], 2011. p. 426–434.
- AGUIAR, V. P. B. **Avaliação Técnico-Econômica do Aumento do Rendimento em Motores de Indução Trifásicos de Baixa Potência após Rebobinagem.** 2018. 108 f. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) — Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.
- Aguiar, V. P. B.; Pontes, R. S. T.; Ferreira, F. J. T. E. Technical and economic evaluation of efficiency improvement after rewinding in low-power induction motors: A brazilian case. In: **Energies 2018.** [S.l.: s.n.], 2018. v. 11, n. 7, p. 1701.
- AGUIRRE, L. A. **Introdução à identificação de sistemas: técnicas lineares e não-lineares aplicadas a sistemas reais.** 2. ed. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2004. ISBN 85-7041-400-5.
- ÅSTRÖM, K. J.; WITTENMARK, B. **Computer-controlled systems: theory and design.** 4. ed. Upper Sadle River: Prentice Hall, 1997.
- CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas.** 5. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.
- COELHO, A. A. R.; SANTOS, C. L. dos. **Identificação de sistemas dinâmicos lineares.** 1. ed. Florianópolis - UFSC: Editora UFSC, 2004.
- de Oliveira, C. M. R.; de Aguiar, M. L.; Guazzelli, P. R. U.; de Castro, A. G.; Santos, S. T. C. A. d.; Monteiro, J. R. B. A. Analysis of the dynamic emulation problem for validation of position control algorithms in machine drives. In: **2018 13th IEEE International Conference on Industry Applications (INDUSCON).** [S.l.: s.n.], 2018. p. 1266–1273.
- FADALI, M. S.; VISIOLI, A. **Digital control engineering: analysis and design.** [S.l.]: Elsevier Inc., 2009.
- GYNTHER, L.; MUSTONEN, S.; SAARIVIRTA, E. **Policies and Measures for Promoting Efficient Electric Motors in Industry.** [S.l.]: World Energy Council (WEC), 2016.
- HASHID, M. H. **Eletrônica de Potência: Dispositivos, circuitos e aplicações.** 4. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil, 2014. ISBN 978-85-430-0594-2.
- INSTRUMENTS, N. **NI USB-6008/6009 Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device.** 1. ed. Texas, EUA, 2017.
- LANDAU, I. D.; ZITO, G. **Digital control systems: design, identification and implementation.** [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2006.
- MAGTROL. **Model 3411 Torque Display User's Manual.** 2. ed. Friburgo, Suíça, 2017. Revisão A.
- MAGTROL. **TM 300 Series In-Line Torque Transducers User's Manual.** 1. ed. Friburgo, Suíça, 2017. Revisão H.

MATHWORKS. **Documentation Home – System Identification Toolbox – Linear Model Identification – Input/Output Polynomial Models**. 2018. Disponível em: <<https://www.mathworks.com/help/ident/input-output-polynomial-models.html>>. Acesso em: 30 Junho 2019.

NATIONAL INSTRUMENTS. **USB-6009 Dispositivo de E/S multifuncionais**. 2019. Disponível em: <<http://www.ni.com/pt-br/support/model.usb-6009.html>>. Acesso em: 30 Fevereiro 2019.

NELLES, O. **Nonlinear system identification: from classical approaches to neural networks and fuzzy models**. 1. ed. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2001. ISBN 978-3-642-08674-8.

NISE, N. S. **Engenharia de sistemas de controle**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2013. ISBN 978-0470-54756-4.

QUINTINO, A.; ABRANTES, N.; FERREIRA, F. J. T. E.; ALMEIDA, A. T. de. Four-quadrant electric motor test bench with a fully programmable load profile. In: **Proceedings of the 7th International Conference EEMODS'11, Energy Efficiency in Motor Drive System - Alexandria, VA, EUA**. [S.l.: s.n.], 2011. v. 11, p. 176–185.

SIEMENS. **SINAMICS G120 Converters with the CU240B-2 and CU240E-2 Control Units**. 2. ed. Nurembergue, Alemanha, 2018.

SKOGESTAD, S.; POSTLETHWAITE, I. **Multivariable feedback control: Analysis and design**. 2. ed. New York, USA: John Wiley Sons, 2005.

Song-Manguelle, J.; Ekemb, G.; Mon-Nzongo, D. L.; Jin, T.; Doumbia, M. L. A theoretical analysis of pulsating torque components in ac machines with variable frequency drives and dynamic mechanical loads. **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, v. 65, n. 12, p. 9311–9324, Dec 2018. ISSN 0278-0046.

Suchý, L.; Kyslan, K.; Ferková, Z.; Durovský, F. Dynamic emulation of mechanical loads - analysis and implementation into industrial drive. In: IEEE. **2016 ELEKTRO**. [S.l.], 2016. p. 238–242.

WAIDE, P.; BRUNNER, C. U. **Energy-Efficiency Policy Opportunities for Electric Motor-Driven Systems**. [S.l.]: International Energy Agency (IEA), 2011.

WEG. **Catálogo de Motores Elétricos Trifásicos de Baixa Tensão para Uso Geral**. 2019. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-Elétricos/Trifásico---Baixa-Tens~ao/Uso-Geral/W22/W22-IR2/W22-IR2-5-cv-2P-100L-3F-220-380-V-60-Hz-IC411---TFVE---B3D/p/11368858>>. Acesso em: 30 Janeiro 2019.