

ESTUDO DO DESEMPENHO DO MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO ACIONADO A VELOCIDADE VARIÁVEL COM UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DIGITAIS

CÁSSIO ALVES DE OLIVEIRA¹, LUCIANO COUTINHO GOMES²

Resumo - O presente trabalho tem como objetivo apresentar técnicas para avaliar o desempenho dos motores de indução trifásicos. A metodologia proposta baseia-se no acionamento do motor via inversor de frequência e no desenvolvimento de uma plataforma de estudos práticos que contará com sensores e placas de aquisição de sinais. O software *LabVIEW* e o protocolo de comunicação *Modbus-RTU* serão utilizados de forma a aprimorar a supervisão de dados e de sinais. Grandezas como tensão, corrente, conjugado e velocidade poderão ser lidas diretamente via sensores, e os sinais mostrados em um monitor de computador. A plataforma desenvolvida tem como intuito permitir a interação do usuário em todos os estágios dos ensaios, desde a escolha do tipo de máquina a ser estudada até a verificação do seu comportamento dinâmico. O ponto de partida para obtenção dos resultados experimentais é executar o controle de uma máquina de corrente contínua operando como gerador, acionada por um motor de indução trifásico.

Palavras Chave - Inversor de Frequência, *LabVIEW*, motor de indução trifásico, placa condicionadora de sinais, protocolo *Modbus-RTU*.

¹ Aluno de graduação do Curso de Engenharia Elétrica, com ênfase em Sistemas de Energia Elétrica, da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - bolsista CNPQ UFU - Universidade Federal de Uberlândia - Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia - MG/ Brasil, CEP 38408-100. kass-07@hotmail.com.

² Orientador. Professor Doutor da Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) - Universidade Federal de Uberlândia - Campus Santa Mônica, Av. João Naves de Ávila 2121, Uberlândia - MG/ Brasil, CEP 38408-100. lbgomes2005@gmail.com.

Abstract - This paper aims to present techniques to assess the performance of induction motors. The proposed methodology is based on the motor drive via frequency inverter and developing a platform for practical studies that rely on sensors and signal acquisition boards. The LabVIEW software and Modbus-RTU communication protocol will be used in order to improve the supervision and data signals. Quantities such as voltage, current, torque and speed can be read directly via sensors, and signals displayed on a computer monitor. The developing platform has the intention to allow user interaction at all stages of the tests, from choosing the type of machine to be studied until analysis of dynamic behavior. The starting point for obtaining the experimental results is to execute the control of a continuous current machine operating as a generator, activated by a three phase induction motor.

Keywords - Frequency Inverter, LabVIEW, Modbus-RTU protocol, signal conditioner board, three phase induction motor.

1. INTRODUÇÃO

As máquinas elétricas são elementos fundamentais na conversão eletromecânica de energia, seja na geração elétrica ou em aplicações que envolvam acionamentos elétricos, estabelecendo-se então como agentes causadores de desenvolvimento tecnológico. O setor industrial brasileiro consome cerca de 40% da energia elétrica do país, e dois terços dessa energia são utilizados em sistemas motrizes [2].

Os motores de indução trifásicos (MIT's) são largamente utilizados em diversos setores industriais para efetuar a conversão de energia elétrica em energia mecânica. A utilização frequente desse tipo de motor está associada diretamente com as suas características construtivas. Os MIT's são em sua maioria robustos, de fácil manutenção e podem ser adaptados a variadas situações de carga. Comparados com motores de corrente contínua, os motores de indução trifásicos possuem menor peso, menor custo e maior durabilidade. Se estiver bem dimensionado, o MIT também pode apresentar considerável economia de energia elétrica. Na Figura 1 é apresentado um motor de indução trifásico.



Figura 1 O motor de indução trifásico.

Alguns pontos desfavoráveis, quando se utiliza motores de indução trifásicos, são a necessidade de rede de alimentação trifásica, o alto valor da corrente de partida e aspectos relacionados ao controle de velocidade.

O aumento da complexidade e heterogeneidade dos métodos produtivos (por exemplo, a necessidade de se trabalhar com uma faixa ajustável de velocidades), aliado a uma contínua busca por redução de custos ocasionou o investimento em técnicas de controle que não comprometessem significativamente o desempenho do MIT. A utilização de equipamentos conhecidos como inversores de frequência, vêm sendo comum em processos industriais,

devido ao fato de esses equipamentos apresentarem uma versatilidade de opções para o monitoramento desses processos.

Visando contribuir com estudos a respeito das técnicas de partida e de controle de velocidade dos motores de indução trifásicos, empregando aplicações práticas de medição e análise, o Laboratório de Acionamentos Elétricos (LAcE) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), propôs um estudo para avaliação do desempenho do MIT, em uma plataforma que utiliza um inversor de frequência para efetuar o acionamento, e que conta com métodos de sensoriamento para efetuar a aquisição de sinais.

2. DESCRIÇÃO DA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

A plataforma experimental foi desenvolvida para viabilizar a análise do desempenho de motores de indução trifásicos. Para facilitar a manipulação de todos os equipamentos do trabalho, toda a planta foi acomodada em uma bancada projetada para esse estudo. A bancada conta com os principais dispositivos de proteção contra eventuais falhas que possam ocorrer durante a realização dos ensaios.

Na Figura 2 é apresentado o diagrama funcional do sistema, destacando os principais elementos que o constituem e omitindo, por questão de simplicidade, os detalhes de controle, supervisão e proteção, além das chaves de conexão.

Com o propósito de adquirir, manipular e armazenar dados que possibilitem a verificação correta do princípio de funcionamento e do desempenho do MIT, a utilização de alguns equipamentos, bem como de ferramentas computacionais é de fundamental importância. Os principais elementos constituintes do sistema serão brevemente caracterizados nas subseções seguintes.

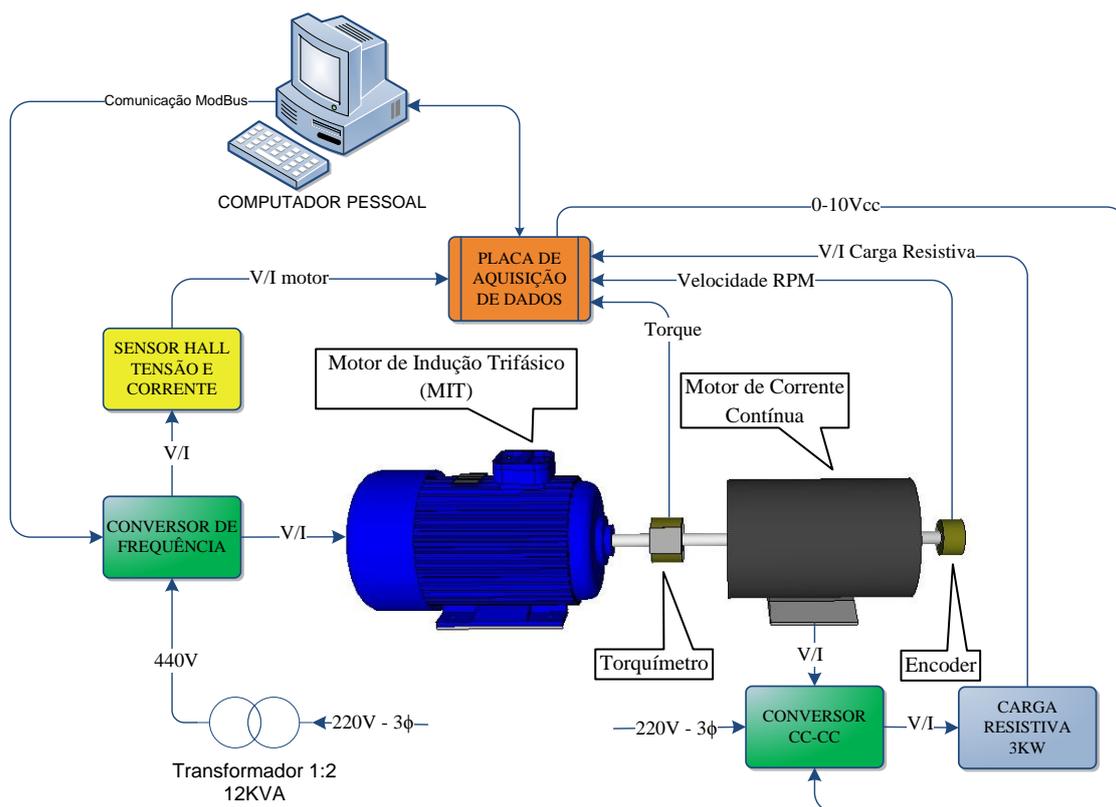


Figura 2 Diagrama em blocos da plataforma experimental.

2.1. MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Dispondo-se de três bobinas de metal em um circuito magnético estático, formado por chapas ferromagnéticas para conduzir as correntes de alimentação, é possível constituir a parte fixa de um motor de indução trifásico, à qual se dá o nome de estator. No meio dessas bobinas é posicionado o rotor, a parte móvel do MIT.

As correntes alternadas que fluem nas bobinas do estator produzem variação de fluxo no tempo e originam um campo magnético girante no estator. Essa variação de fluxo induz correntes também variantes no tempo e um campo magnético girante no rotor.

O campo magnético do rotor tenta se alinhar com o campo do estator, fazendo então com que o rotor comece a girar. A diferença de velocidades entre a velocidade síncrona do MIT (velocidade do campo magnético girante do estator) e a velocidade do rotor é denominada escorregamento.

O motor de indução trifásico pode ser visto com um transformador generalizado, onde existe transformação de potência elétrica entre o rotor e o estator, ocorrendo mudança de frequência e o aparecimento de uma potência mecânica [1].

Para que se tenha no eixo do MIT a potência mecânica pretendida, é necessário que perdas internas sejam vencidas. O estudo dessas perdas é efetuado através da análise do

circuito equivalente monofásico representado na Figura 3. Através da análise desse circuito é possível determinar as características eletromecânicas do MIT, bem como o efeito de carga apresentado pela máquina para a fonte de energia.

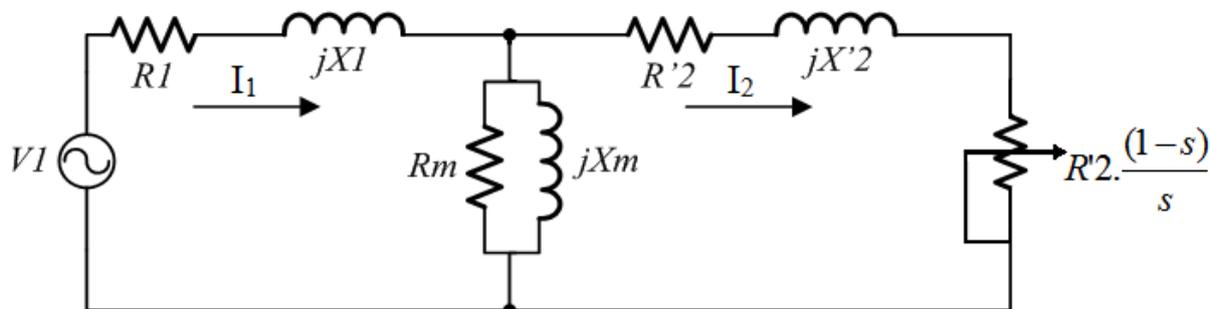


Figura 3 Circuito equivalente monofásico do MIT.

Os parâmetros do circuito da Figura 3 são definidos da seguinte forma:

- R_1 : Resistência efetiva do estator
- X_1 : Reatância de dispersão do estator
- R_m : Resistência de perdas no núcleo
- X_m : Reatância de magnetização
- R'_2 : Resistência do rotor
- X'_2 : Reatância de dispersão do rotor
- s : escorregamento

A determinação dos valores dos parâmetros do circuito equivalente de um motor de indução trifásico pode ser feita através de um ensaio a vazio, de um ensaio com rotor bloqueado e das medições das resistências CC dos enrolamentos do estator.

2.2. INVERSOR DE FREQUÊNCIA – MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Os inversores de frequência (também denominados conversores estáticos de frequência) configuram o método mais eficiente utilizado em processos industriais quando se deseja efetuar o controle de velocidade de motores de indução. Os inversores convertem a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis.

Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e, conseqüentemente, a velocidade mecânica de rotação da máquina [3].

Os inversores são compostos, fundamentalmente, por:

- Retificadores: para converter o sinal alternado da tensão de entrada em sinal contínuo.
- Filtro Capacitivo ou Barramento CC: para manter constante a tensão retificada.
- Inversor: para converter a tensão contínua do barramento CC em um sinal alternado, ajustável em magnitude e frequência.

O motor de indução, quando alimentado por um inversor de frequência, tem seu rendimento diminuído, se comparado a um motor alimentado por tensão puramente senoidal. Isso ocorre devido ao aumento nas perdas ocasionado pelas correntes harmônicas [3].

Em estudos de desempenho de motores de indução alimentados por conversores de frequência deve-se avaliar o rendimento do sistema (inversor + motor), e não apenas o do motor [3]. Na Figura 4 é ilustrado o diagrama em blocos do conjunto inversor-motor.

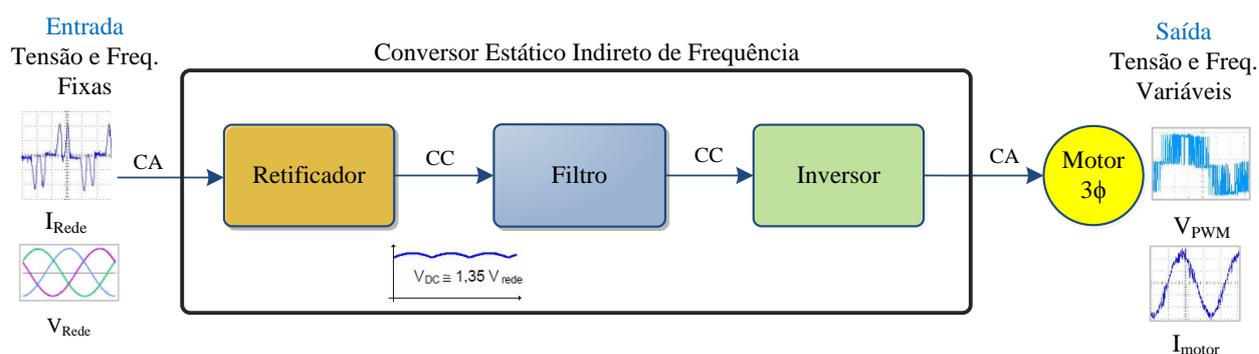


Figura 4 Diagrama em blocos do conjunto inversor-motor.

2.3. TRANSDUTORES DE EFEITO HALL E PLACA DE CONDICIONAMENTO DE SINAIS

Os transdutores de efeito Hall tem seu princípio de funcionamento baseado na conversão de sinais de tensão ou corrente, de amplitude maior, em sinais de tensão equivalentes, em geral de amplitude menor, multiplicados pela relação de transformação de cada componente. Os valores eficazes de tensão e corrente podem ser obtidos através de (1):

$$A = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_a \cdot a_i^2} \quad (1)$$

Sendo:

- A - Valor eficaz de um período de um sinal elétrico.
- n - Número de amostras no intervalo de um período.
- K_a - Fator de escala.
- a_i - Valor instantâneo de tensão ou de corrente.

A placa de condicionamento de sinais faz o tratamento e a adequação dos sinais obtidos pelos transdutores de efeito Hall. Na Figura 5 é mostrada uma das placas de condicionamento de sinais utilizadas, com um sensor Hall de tensão e um de corrente.

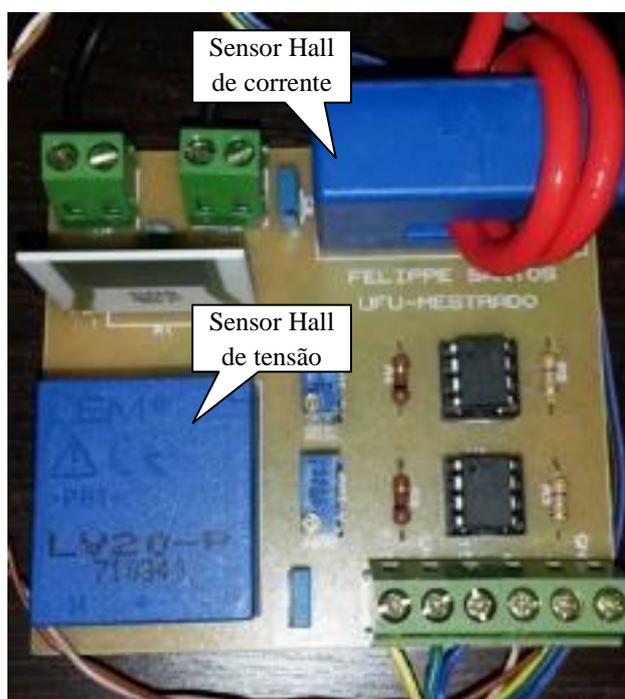


Figura 5 Placa de condicionamento de sinais.

2.4. TRANSDUTOR DE TORQUE

O transdutor de torque (ou conjugado) utilizado é o modelo T22/50NM do fabricante HBM. Esse transdutor é capaz de medir conjugado dinâmico e estático, possui fundo de escala de até 50 N.m., e necessita de um condicionador de sinais (conversor de frequência-tensão), que produz um sinal de tensão CC de -10 V a $+10\text{ V}$, proporcional ao torque. A velocidade é medida utilizando um *encoder* com resolução de 600 pulsos por volta.

O torque médio é calculado por (2):

$$T_{\text{médio}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n K_t \cdot t_i \quad (2)$$

Sendo:

K_t - Fator de escala para torque.

t_i - Valor instantâneo de torque para amostragem.

2.5. PLACA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

As placas de aquisição têm como função adquirir dados de maneira geral. Existem diversos equipamentos de diferentes fabricantes que possuem plataforma de aquisição de dados. A escolha do melhor equipamento geralmente leva em consideração fatores como: capacidade de expansão, taxas de aquisição pretendidas, níveis de ruído, preço, etc.

Para a montagem da plataforma experimental, será utilizado um kit da *National Instruments*, contendo uma placa de aquisição PCI 6229, que será conectada ao barramento PCI (*Peripheral Component Interconnect*) da CPU (*Central Processing Unit*) de um computador. A placa é composta por 32 entradas analógicas e 16 entradas digitais. Além disso, o kit também possui também um bloco para conectar os sinais recebidos das placas de condicionamento de sinais à placa de aquisição, e dois cabos para fazer a comunicação entre o bloco e essas placas. Na Figura 6 é mostrada a placa de aquisição PCI 6229.

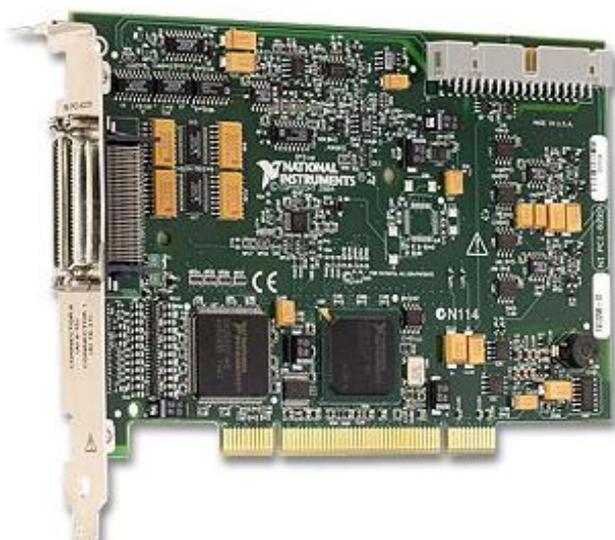


Figura 6 Placa de aquisição PCI 6229.

2.6. SOFTWARE DE AQUISIÇÃO DE DADOS LABVIEW

O software *LabVIEW*, desenvolvido pela *National Instruments*, é baseado em linguagem de programação gráfica, oferecendo também integração ente software e

hardware. É um software que agrega as principais ferramentas que auxiliam no desenvolvimento das mais variadas aplicações em um tempo consideravelmente menor.

Cada programa em *LabVIEW* é chamado de *Virtual Instrument* (Instrumento Virtual ou VI), uma vez que desempenham as funções dos instrumentos tradicionais, por exemplo, um osciloscópio.

Um Instrumento Virtual é composto por um painel frontal (*Front Panel*) e um diagrama de blocos (*BlockDiagram*).

No painel frontal encontram-se os controles e os indicadores, que são terminais iterativos de entrada e saída do VI. Os indicadores podem ser gráficos, tabelas, LED's, entre outros.

No diagrama de blocos estão contidas todas as informações que permitem a manipulação dos dados, ou seja, o código do programa. Um código é criado através da interligação de blocos e cada bloco é composto por funções.

Na Figura 7 é mostrado um exemplo de um dos primeiros programas em *LabVIEW*, desenvolvido em ensaios preliminares, para acionar o motor de indução trifásico via inversor de frequência. O VI apresenta o painel frontal e o diagrama de blocos. No painel frontal são mostrados os botões que permitem habilitar o inversor e acionar o MIT, fazendo-o girar no sentido horário ou anti-horário. O diagrama de blocos mostra as funções utilizadas para a execução dos comandos do painel frontal.

Para se desenvolver um programa em *LabVIEW*, o primeiro passo é determinar quais as variáveis que serão analisadas, como por exemplo, sinais de tensão e corrente, entre outros. O próximo passo é montar a interface gráfica de forma que seja simples e dinâmica. Por fim, deve ser feita a implementação do algoritmo de programação, o que requer do programador um bom conhecimento do que está sendo analisado, fato esse que irá determinar a resposta ideal do programa ao problema proposto.

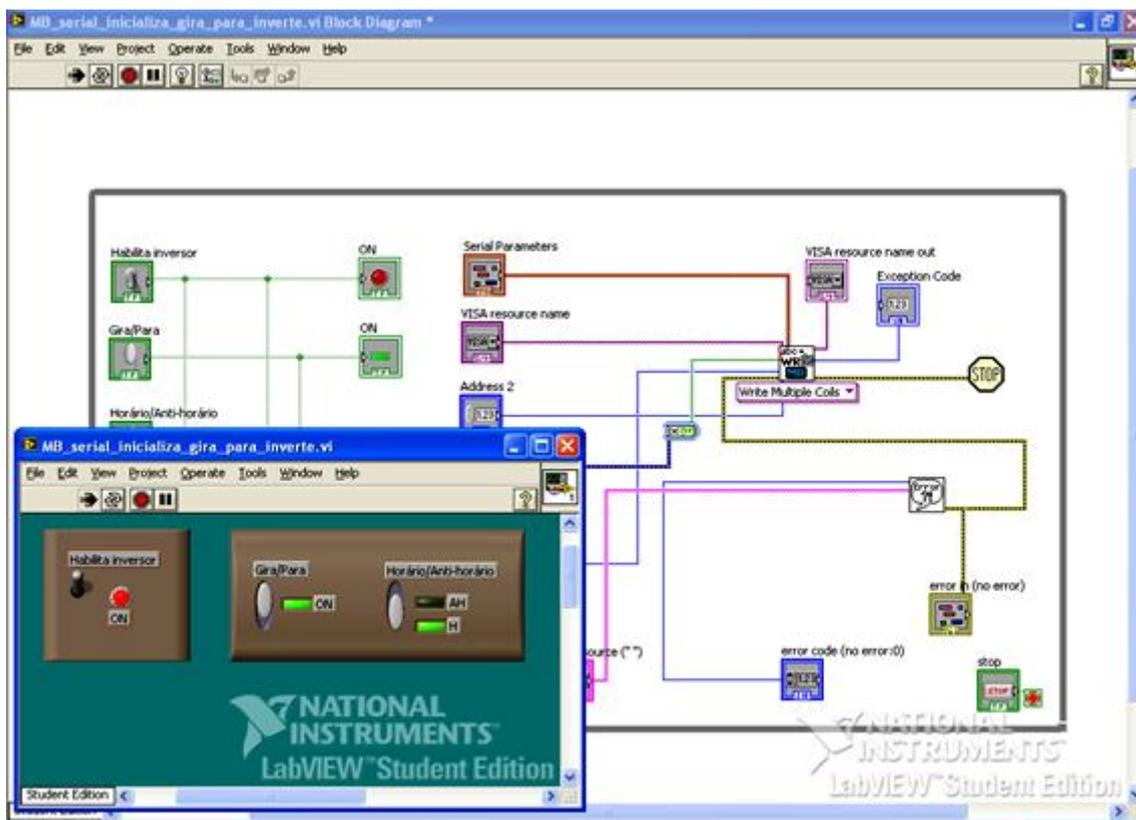


Figura 7 Instrumento virtual utilizado para habilitar o inversor, acionar o MIT e selecionar sentido de rotação.

2.7.PROTOCOLO DE COMUNICAÇÃO MODBUS-RTU

O protocolo de comunicação *Modbus* foi desenvolvido em 1979, e atualmente é um protocolo aberto difundido extensivamente e utilizado por muitos fabricantes em diversos equipamentos [7].

No modo RTU (*Remote Terminal Unit*) são transmitidos bytes de dados e cada byte define uma única palavra com valor em hexadecimal. Dessa forma, cada palavra transmitida possui 1 start bit, 8 bits de dados, 1 bit de paridade (opcional) e 1 stop bit (ou 2 stop bits, se o bit de paridade não for utilizado).

A comunicação *Modbus* é feita no sistema Mestre-Escravo, e sempre se inicia com o mestre fazendo uma solicitação a um escravo, e este envia a resposta ao que lhe foi solicitado [7]. A estrutura utilizada na comunicação é a mesma, tanto para o mestre quanto para o escravo: Endereço, Código da Função, Dados e CRC (*Cycling Redundancy Check*). O campo de dados é o único que pode ter tamanho variado, e depende do que está sendo solicitado. Na Figura 8 é ilustrada essa estrutura de comunicação.

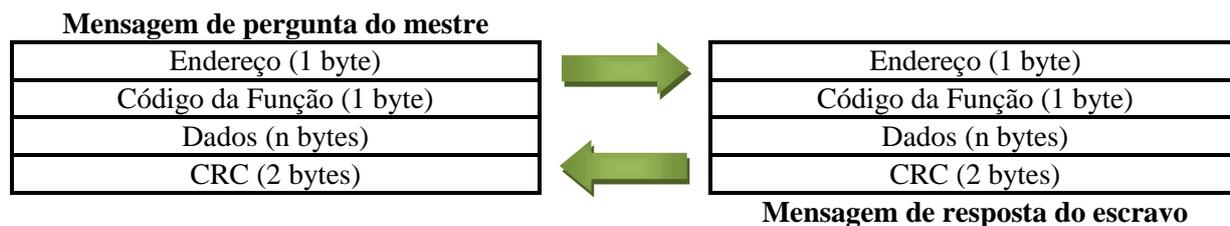


Figura 8 Estrutura de comunicação do protocolo *Modbus-RTU*.

Na rede *Modbus* podem existir até 247 escravos, porém, só pode haver um mestre. No trabalho desenvolvido, o software *LabVIEW* representa o mestre e o inversor de frequência funcionará como escravo.

2.8. MÁQUINA DE CORRENTE CONTÍNUA (MCC)

Com o avanço no campo da eletrônica em circuitos de grande potência, o conjunto conversor, comando e motor de corrente contínua mostram-se economicamente viáveis. Os motores de corrente contínua oferecem ampla faixa de variação de velocidade sem causar prejuízos no desempenho da máquina acionada.

Os acionamentos de corrente contínua, compostos por conversores CA/CC e motor, possuem excelente comando e regulação, garantindo regulação precisa de velocidade, aceleração constante e ampla, sob qualquer condição de carga, aceleração e/ou desaceleração controlada e conjugado constante com controle pela armadura [5].

Na Figura 9 é ilustrado o diagrama esquemático de um motor de corrente contínua com excitação independente, com suas variáveis elétricas e mecânicas.

No circuito de armadura estão representados: tensão nos terminais da armadura (V_a), corrente de armadura (i_a), resistência de armadura (R_a), indutância de armadura (L_a) e a força contra eletromotriz de armadura (e_a).

No circuito de campo são expressos: tensão nos terminais do campo (V_f), corrente de campo (I_f), resistência (R_f) e indutância de campo (L_f).

O eixo do motor gira na velocidade angular ω produzindo um torque T sobre uma inércia J que produz um torque de oposição ao movimento T_L , sujeito a um atrito viscoso b .

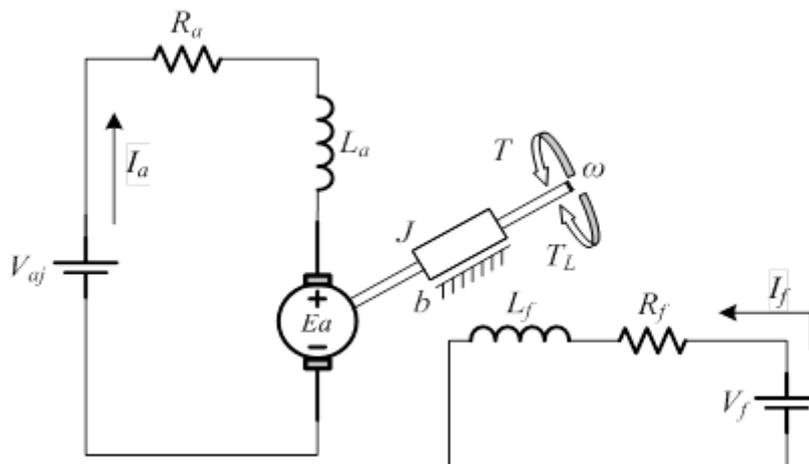


Figura 9 Representação esquemática de um motor de corrente contínua com excitação independente.

3. METODOLOGIA DE EXECUÇÃO E RESULTADOS OBTIDOS

O motor de indução utilizado no estudo possui as seguintes especificações:

- Fabricante: WEG
- Tipo: Motor de indução gaiola – 60 Hz – Categoria N
- Potência: 3 CV (2,2 KW)
- Velocidade: 3450 RPM
- Tensão nominal: 220/380 V
- Corrente nominal: 8,39/4,86 A
- Rendimento: 81,9%
- Fator de potência: 0,84

A plataforma do projeto conta com uma bancada, que foi projetada especificamente para alocar o MIT e todos os componentes para a avaliação do seu desempenho. Na Figura 10 é mostrado o desenho da bancada da plataforma experimental.

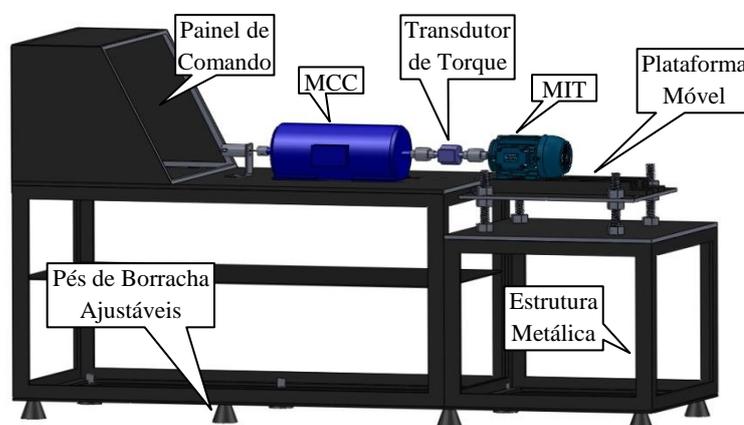


Figura 10 Desenho da base estrutural da bancada.

Na Figura 11 é mostrada a bancada com todos os elementos da plataforma experimental instalados.



Figura 11 Plataforma experimental.

3.1. ANÁLISE DO CIRCUITO EQUIVALENTE DO MIT

Conforme mencionado anteriormente, a análise do circuito equivalente do motor de indução é necessária para quantificar as perdas internas e verificar a potência fornecida no eixo da máquina.

A norma NBR5383-1 [8] prescreve ensaios para a determinação de características de desempenho de máquinas elétricas girantes, tais como: ensaio a vazio, ensaio com rotor bloqueado, ensaio de partida, ensaio térmico, entre outros.

Para determinar os parâmetros do circuito equivalente do MIT, além da medição da resistência CC do enrolamento do estator, são necessários dois ensaios: ensaio a vazio e ensaio com rotor bloqueado.

Antes de iniciar o ensaio a vazio, o motor deve funcionar por alguns minutos para a lubrificação dos mancais. Durante o ensaio, a máquina deve ser alimentada com tensão nominal e os instrumentos de medição devem estar calibrados. Na Tabela 1 são apresentados os resultados do ensaio a vazio.

Tabela 1 Resultados do ensaio a vazio.

Tensão de linha aplicada (V)	Potência total trifásica (W)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)	Velocidade (rpm)
220	311	4,40	4,38	4,49	3598

O ensaio com rotor bloqueado consiste em bloquear mecanicamente o eixo da máquina. O motor de indução é alimentado com um valor de tensão suficiente para que se atinja o valor da corrente nominal. Na Tabela 2 são apresentados os resultados do ensaio com rotor bloqueado.

Tabela 2 Resultados do ensaio com rotor bloqueado.

Tensão de linha aplicada (V)	Potência total trifásica (W)	I_a (A)	I_b (A)	I_c (A)
44,96	348,1	9,02	8,72	8,25

Os resultados dos ensaios a vazio e com rotor bloqueado, juntamente com a medição da resistência CC do enrolamento do estator, são aplicados à teoria de circuitos elétricos e de máquinas elétricas para determinar os parâmetros do circuito equivalente do MIT.

É importante salientar que, os parâmetros do circuito equivalente do MIT são calculados por fase, de modo que as leituras de tensão e corrente, bem como de potência, devem ser convertidas para valores de fase, de acordo com o tipo de configuração (estrela ou triângulo) usada nos ensaios. Na Tabela 3 são apresentados os parâmetros do circuito equivalente do motor em estudo.

Tabela 3 Parâmetros do circuito equivalente do MIT.

R_1	X_1	R_m	X_m	R_2	X_2
2,86 Ω	3,845 Ω	1066,54 Ω	81,66 Ω	1,77 Ω	3,845 Ω

Após a determinação dos parâmetros do circuito equivalente, é possível estimar, através da teoria de circuitos elétricos, a potência de entrada, a potência no eixo, as perdas internas e o rendimento do motor de indução. Na Tabela 4 são exibidos os resultados.

Tabela 4 Potência e rendimento do MIT.

Potência de Entrada (P_E)	2890,035 W
Potência no eixo (P_M)	2280,038 W
Perdas internas: $P_E - P_M$	609,997 W
Rendimento: $(P_M/P_E) \cdot 100$	78,89%

É possível notar que, os resultados apresentados na Tabela 4, se comparados com as especificações nominais da máquina, diferem pouco, o que atesta a análise do circuito equivalente a partir dos ensaios realizados.

Os parâmetros do circuito equivalente também foram utilizados para implementar um algoritmo em MATLAB® para plotar as curvas típicas de conjugado (torque) e corrente, em função da velocidade da máquina. Na Figura 12 são apresentadas essas curvas características.

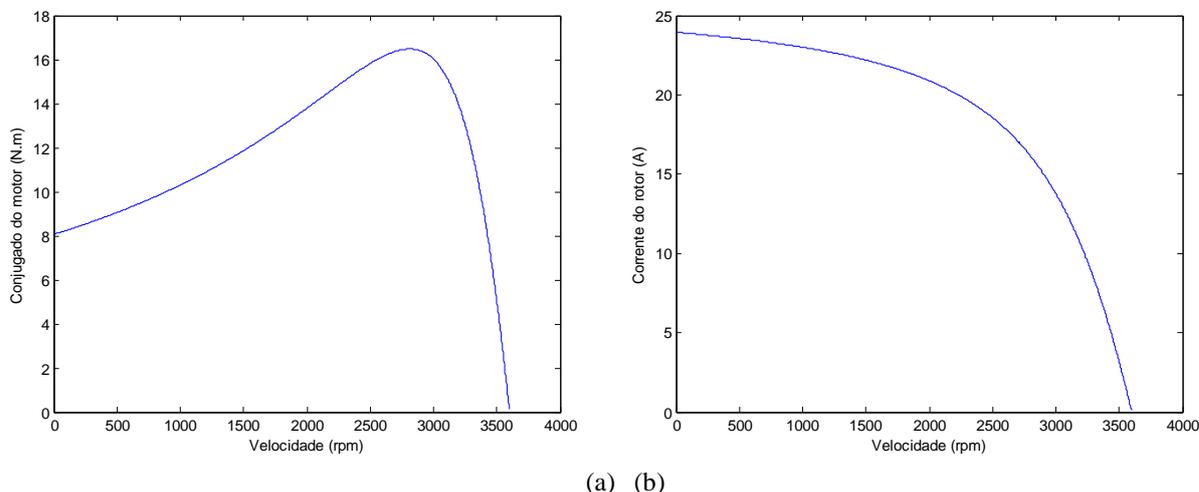


Figura 12 Curvas características do MIT em função da velocidade. (a) Conjugado, (b) Corrente.

A partir das curvas mostradas na Figura 12, é possível avaliar algumas das características de funcionamento do MIT:

- A corrente é elevada durante a partida, e diminui com o aumento da velocidade.
- O conjugado de partida é inferior ao conjugado máximo, uma particularidade em motores de indução da categoria N.

Os valores de conjugado e corrente tendem a tornarem-se constantes, quando o motor atingir a velocidade síncrona.

3.2. MONTAGEM DA PLATAFORMA E CRIAÇÃO DO SISTEMA SUPERVISÓRIO

Conforme o esquema apresentado na Figura 2, o MIT deverá ser acionado através de um inversor de frequência, e o seu eixo será acoplado diretamente a um freio eletromagnético, representado por uma máquina de corrente contínua com excitação independente, funcionando como gerador.

O inversor de frequência tem como principal função variar a velocidade, além de promover partida e frenagem de maneira suave. Valores de corrente, potência, frequência e tensão podem ser verificados diretamente em seu painel através de uma HMI (Interface Homem-Máquina). Para aprimorar a utilização dessa tecnologia e os recursos do equipamento, foi implementada uma interface utilizando o software *LabVIEW* e o

protocolo de comunicação *Modbus-RTU*, que permitirá ao usuário acessar parâmetros do inversor e monitorar o desempenho do MIT via computador.

Os transdutores de efeito Hall fornecem sinais de tensão e corrente em cada uma das fases, na entrada do conjunto inversor-motor. Esses sinais são convertidos em sinais de tensão de baixa amplitude e transmitidos ao *LabVIEW*, através de uma placa de aquisição de sinais, incorporada ao computador.

O conjugado é medido por meio de um transdutor de torque (torquímetro) e o sinal transmitido ao *LabVIEW* também através da placa de aquisição.

A velocidade é monitorada por um *encoder* e o sinal é transmitido a uma placa que converte sinais de frequência em sinais de tensão de baixa amplitude, que, da mesma forma, serão enviados à placa de aquisição.

A máquina de corrente contínua tem o enrolamento de campo alimentado em 180 V por intermédio de uma excitatriz. O eixo da MCC é acoplado diretamente ao eixo do MIT.

O acionamento do motor de indução promove a rotação do eixo da MCC, fazendo com que no seu enrolamento de armadura seja gerada uma força eletromotriz, configurando o funcionamento dessa máquina como gerador. A corrente que circula na armadura será monitorada ao se conectar os seus terminais a um banco de resistências.

A interface do *LabVIEW* foi desenvolvida em vários estágios a título de teste, quando adequações e tratamentos de erros foram efetuados, antes de se idealizar o supervisor final.

O sistema supervisor final conta com instrumentação virtual, permitindo ao usuário interagir remotamente em todos os estágios dos ensaios.

Para colocar a plataforma de estudos em funcionamento, é necessário inicialmente atuar no painel frontal da bancada, ligando o disjuntor geral e os demais disjuntores de proteção. Em seguida, é feito o acionamento do MIT via inversor de frequência, com a possibilidade de se ajustar a velocidade e o sentido de rotação. Posteriormente, é inserida a carga mecânica (MCC).

Na Figura 13 é mostrada a última versão do diagrama de blocos do supervisor. Para tornar o código mais “enxuto”, algumas funções, como, por exemplo, as rotinas de comunicação do protocolo *Modbus-RTU*, foram agrupadas em subcódigos, pertencentes ao programa principal.

Na Figura 14 é apresentada a primeira tela do painel frontal (nomeada como “TENSÃO E CORRENTE”) do sistema supervisor, onde podem ser visualizados os botões para habilitar o inversor de frequência via comunicação serial (protocolo *Modbus-RTU*), acionar o MIT, mudar sentido de rotação, acionar a MCC, entre outros. Além disso, também é possível visualizar os sinais de tensão e corrente em cada fase do sistema inversor de frequência-motor de indução trifásico, conjuntamente com os sinais de tensão e corrente na carga (representada, na plataforma de estudos, por um banco de resistências).

Os resultados apresentados na Figura 14 foram obtidos acionando-se o MIT em velocidade nominal, com uma carga nominal de perfil parabólico.

As cargas parabólicas são aquelas que possuem torque proporcional ao quadrado da velocidade, tais como ventiladores, bombas centrífugas, compressores etc.

Para simular os perfis de carga, foi criado um VI no *LabVIEW*, onde foi formulada uma lógica para quatro categorias principais de perfil de carga: constante, linear, parabólica e hiperbólica. A simulação desses perfis é importante para observar situações próximas àquelas encontradas em aplicações reais.

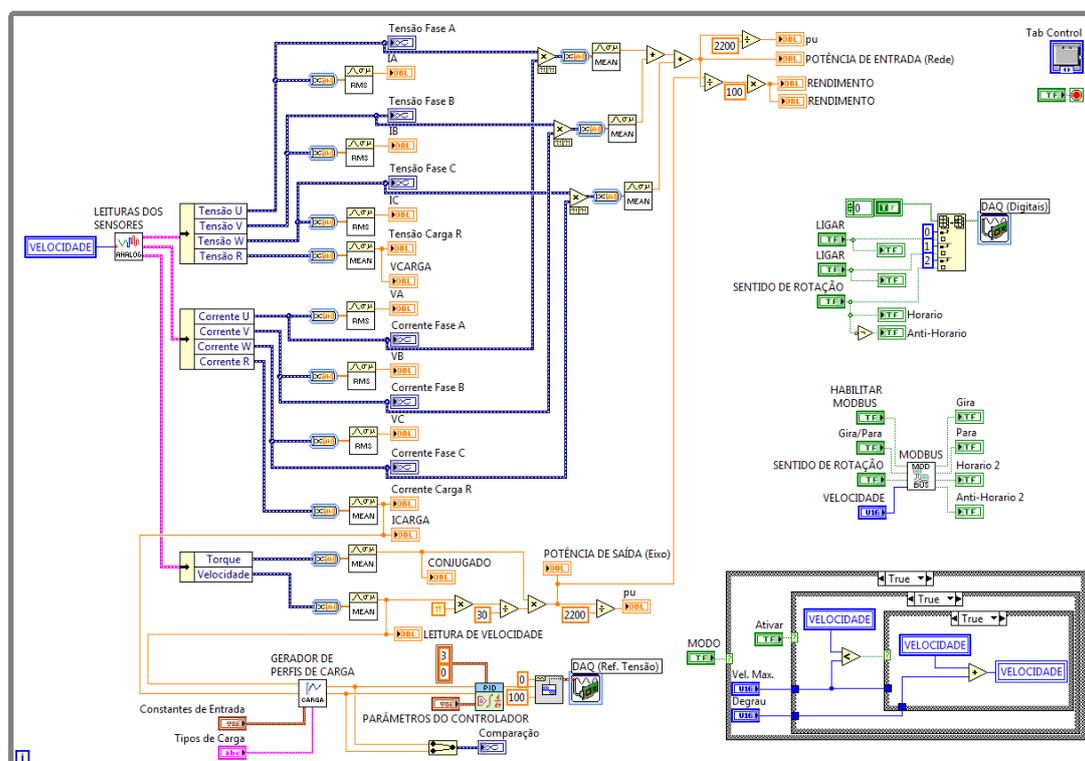


Figura 13 Diagrama em blocos do sistema supervisor.

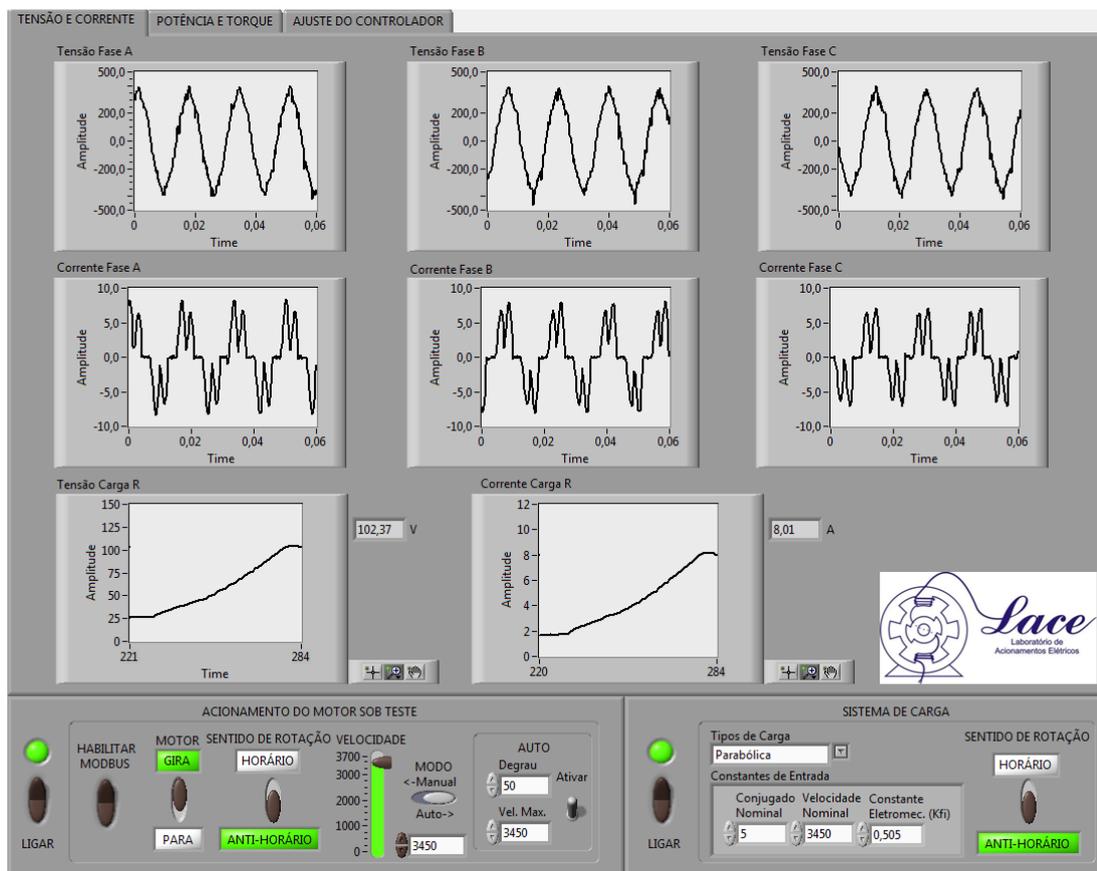


Figura 14 Primeira tela do painel frontal do sistema supervisorío desenvolvido em *LabVIEW*.

A segunda tela do sistema supervisorío (nomeada “POTÊNCIA E TORQUE”) é apresentada na Figura 15. Para permitir maior interação ao usuário, optou-se por tornar autônomo o sistema de controle do acionamento do MIT e da MCC independentemente de novas abas que fossem criadas. A ideia é que se possa interferir no controle sempre que necessário.

A segunda aba exibe ainda a potência de entrada do sistema inversor-motor, a potência no eixo do motor de indução, as curvas de rendimento e conjugado, além dos valores eficazes de tensão e corrente no MIT e na MCC.

Na Figura 15 é possível observar a curva de conjugado de carga parabólica. Nota-se que, existe um valor inicial de conjugado para manter o sistema em movimento. Aumentando a carga de forma quadrática, a curva de conjugado reproduz a forma parabólica prevista, até que o valor nominal de torque seja atingido. A partir daí, a curva descreve uma trajetória constante.

Outra consideração da Figura 15 é o rendimento do conjunto inversor de frequência-motor de indução trifásico, cujo valor indicado é de 70,52%. Se o MIT fosse alimentado por tensão puramente senoidal, o rendimento esperado, em condições nominais, seria de 81,9%.

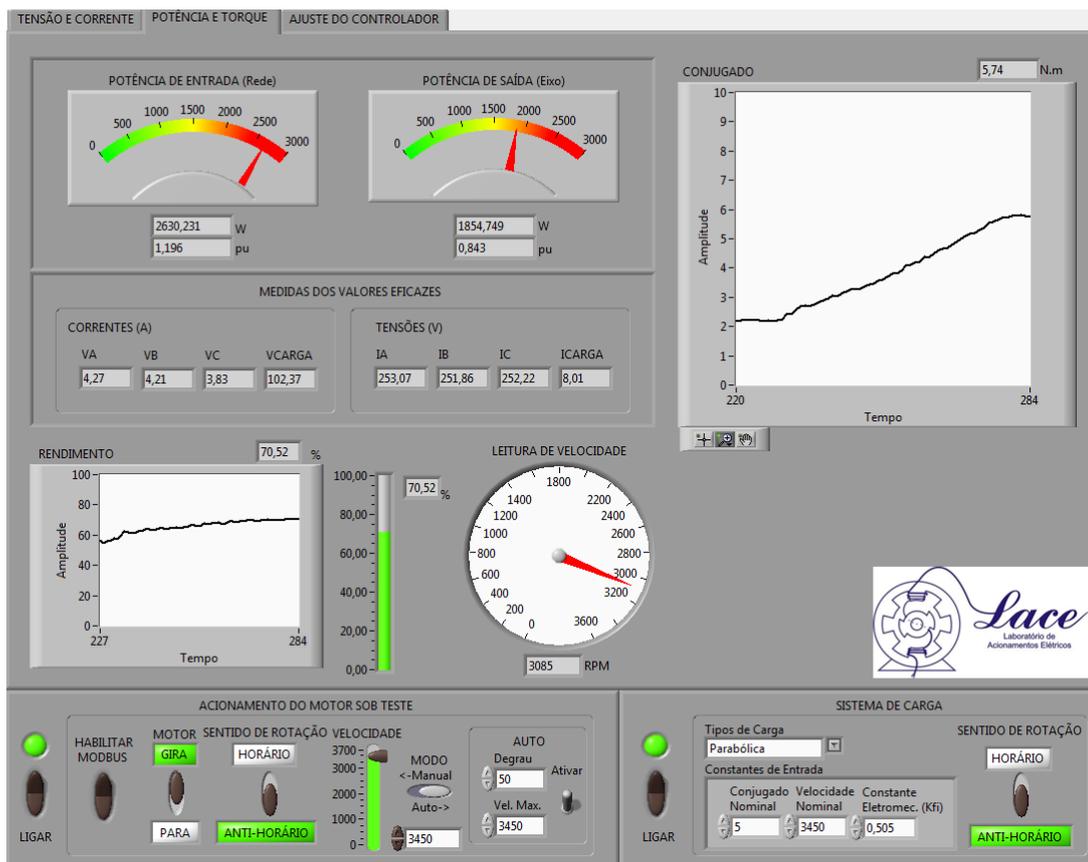


Figura 15 Segunda tela do sistema supervisorio da plataforma experimental.

A terceira e última tela do sistema supervisorio é apresentada na Figura 16. A interface foi elaborada para estudo do comportamento da característica de conjugado das cargas mecânicas.

Um compensador proporcional integral (PI) foi implementado no supervisorio, na tentativa de eliminar erros de regime permanente.

A interface apresentada na Figura 16 reproduz a curva de conjugado da carga, calculado por meio da corrente de armadura da MCC, e a curva de conjugado de referência (também chamada de *setpoint*), para efeito de comparação.

Para um ensaio com carga parabólica é possível constatar, observando a Figura 16, que controlador PI atua no sentido de manter o conjugado próximo da resposta solicitada pelo sistema, tornando-se constante quando atinge o valor de 0,81 por unidade (pu) com um *set point* de 0,82 por unidade.

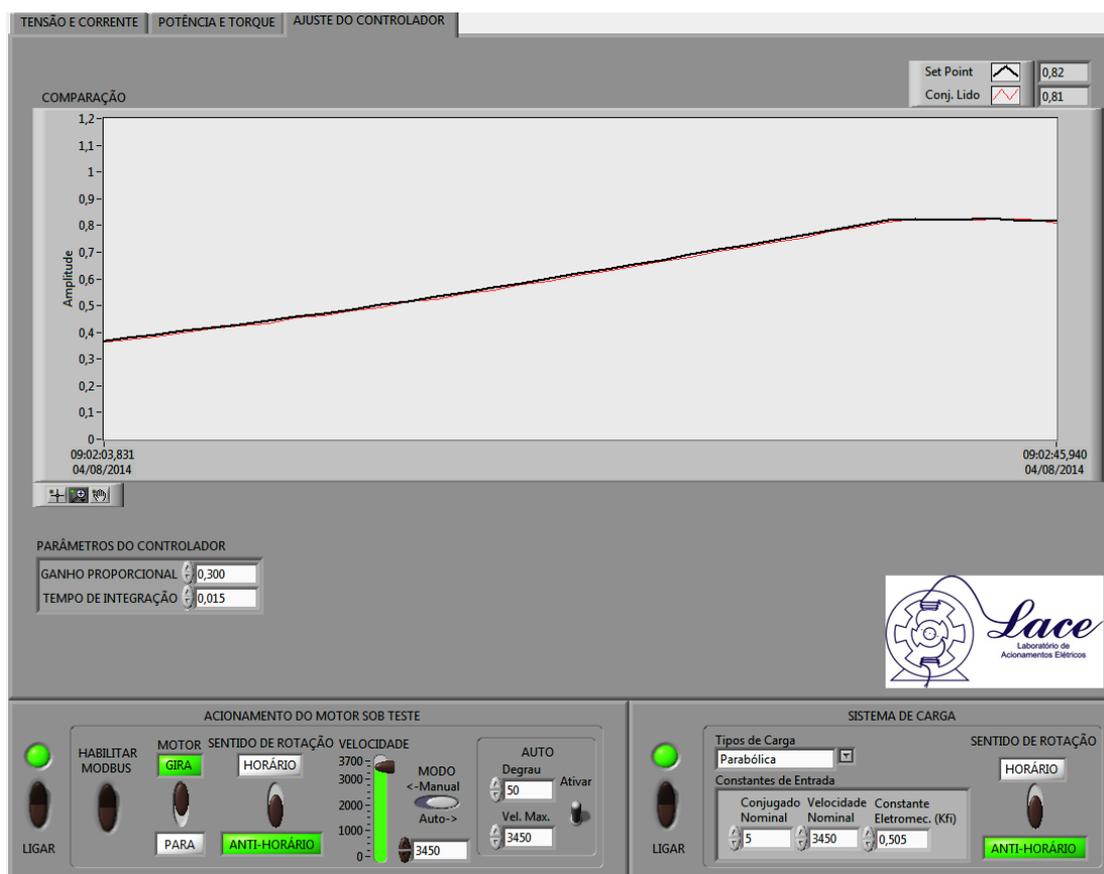


Figura 16 Última tela do sistema supervisório nomeada como “AJUSTE DO CONTROLADOR”.

4. CONCLUSÃO

O desenvolvimento desse estudo favoreceu o conhecimento do software *LabVIEW*, uma ferramenta interessante de aquisição e análise de dados, que conta com um ambiente de trabalho prático que permite agilizar a resolução de problemas de engenharia. Aliado ao protocolo de comunicação *Modbus-RTU*, o *LabVIEW* possibilita o acesso a dados com maior precisão, rapidez e eficiência.

Outro ponto importante foi o acionamento do motor de indução trifásico utilizando o inversor de frequência, que é um equipamento já bastante difundido, usado para a partida e variação de velocidade de motores.

Conhecendo novas técnicas de acionamento, é possível desenvolver estudos de novas soluções em software e hardware, que sejam voltados para a supervisão das máquinas elétricas, para avaliar o seu desempenho e aperfeiçoar processos industriais.

Sob o ponto de vista econômico, deve-se ressaltar que, as novas técnicas de acionamento e de variação de velocidade influenciam diretamente em aspectos relacionados à proteção dos sistemas elétricos e também na questão da eficiência energética.

Dessa forma, pode-se inferir que o estudo potencializa o aprendizado multidisciplinar, uma vez que permite a aplicação de conhecimentos de forma funcional.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação (PROPP) da Universidade Federal de Uberlândia pela colaboração, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento da proposta CNPQ2013-ENG015, ao Prof. Dr. Augusto Wohlgemuth Fleury pelo incentivo, a toda a equipe do Laboratório de Acionamentos Elétricos e, por fim, a todos que estiveram direta ou indiretamente envolvidos na realização desse trabalho.

6. REFERÊNCIAS

- [1] A. E. Fitzgerald, C. K. Júnior, S. D. Umans, *Máquinas Elétricas*, Bookman, 6ª Edição, 2006.
- [2] Eletrobrás (2013). *Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica (PROCEL)*. Disponível em: <http://www.eletrobras.gov.br/ELB/procel/main.asp?TeamID={FBFB8D50-65B6-4135-9477-B0B2711D7AD8}>. Acesso em: 19 de Dezembro de 2013.
- [3] WEG (2013). *Motores de indução alimentados por inversores de frequência PWM*. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-inducao-alimentados-por-inversores-de-frequencia-pwm-027-artigo-tecnico-portugues-br.pdf>. Acesso em: 19 de Janeiro de 2014.
- [4] Academia.edu (2013). *Desenvolvimento de Algoritmo de Controle para Máxima Eficiência Energética do Motor de Indução Trifásico*. Disponível em: [http://www.academia.edu/2715166/Desenvolvimento de Algoritmo de Controle para Máxima Eficiência Energética do Motor de Indução Trifásico](http://www.academia.edu/2715166/Desenvolvimento_de_Algoritmo_de_Control_e_para_Maxima_Eficiencia_Energetica_do_Motor_de_Inducao_Trifasico). Acesso em: 10 de Maio de 2013.
- [5] WEG (2014). *Motores de Corrente Contínua*. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-motores-de-corrente-continua-50005370-catalogo-portugues-br.pdf>. Acesso em: 19 de Janeiro de 2014.
- [6] National Instruments (2014). *Ambiente gráfico de desenvolvimento de sistemas LabVIEW*. Disponível em: <http://www.ni.com/labview/pt/>. Acesso em: 14 de Fevereiro de 2014.
- [7] WEG (2013). *CFW-09 Manual do Usuário*. Disponível em: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-cfw-09-manual-do-usuario-0899.5298-4.0x-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 15 de Janeiro de 2013.
- [8] ABNT NBR 5383-1. *Máquinas elétricas girantes - Parte 1: Motores de Indução Trifásicos - Ensaios*. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, 2002.

[9] CARVALHO, W. J. ; ANDRADE, D. A.; SILVEIRA, A. W. F. V.; Gomes, L. C.; CARVALHO, D. P.; BERNADELLI, V. R.; BISSOCHI JR, C. A.. Controle Direto de Conjugado do Motor de Indução Trifásico através da Modulação Discreta de Vetores Espaciais. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. v. 01.

[10] Gomes, L. C.; ANDRADE, D. A.; SILVEIRA, A. W. F. V.; CARVALHO, W. J. Acionamento Vetorial do MIT nas regiões de enfraquecimento de campo e altas velocidades utilizando controle digital. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2008, Juiz de Fora. Anais do XVII Congresso Brasileiro de Automática. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2008. v. 01.

[11] SILVEIRA, A. W. F. V.; ANDRADE, D. A.; GOMES, L. C.. Stator Flux Estimation for Three Phase Induction Motor Drives. In: 9th Brazilian Power Electronics Conference, 2007, Blumenau. Proceedings of COBEP 2007. Blumenau : FURB Editora, 2007. p. 711-716.

[12] GOMES, L. C.; ANDRADE, D. A.; SILVEIRA, A. W. F. V.; TAVARES, T. S.. Proposta de controle vetorial para operar o MIT nas regiões de enfraquecimento de campo e altas velocidades. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador. Anais do CBA 2006, 2006. v. CDROM. p. 989-994.

[13] SILVEIRA, A. W. F. V.; ANDRADE, D. A.; TAVARES, T. S.; GOMES, L. C.. Um estudo comparativo entre três técnicas de estimativa do fluxo estático para motores de indução trifásicos.. In: XVI Congresso Brasileiro de Automática, 2006, Salvador. Anais do CBA 2006, 2006. v. CDROM. p. 1573-1578.