

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA
CURSO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

YANN REIS DIAS SULINO

ACIONAMENTO DE CARGAS COM ALTO TEOR INERCIAL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016

YANN REIS DIAS SULINO

ACIONAMENTO DE CARGAS COM ALTO TEOR INERCIAL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial e obtenção do título de Engenheiro Eletricista pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Cornélio Procópio.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro Goedtel.

Co-orientador: Prof. MsC. Demerval Mizuyama.

CORNÉLIO PROCÓPIO

2016



Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Cornélio Procópio
Departamento de Engenharia Elétrica
Curso de Engenharia Elétrica



FOLHA DE APROVAÇÃO

Yann Reis Dias Sulino

Acionamento de cargas com alto teor inercial

Trabalho de conclusão de curso apresentado às 14:00hs do dia 09/06/2016 como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Eletricista no programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho aprovado.

Prof(a). Dr(a). Alessandro Goedel - Presidente (Orientador)

Prof(a). Me(a). Demerval Mizuyama - (Membro)

Prof(a). Dr(a). Romeu Rony Cavalcante da Costa - (Membro)

A folha de aprovação assinada encontra-se na coordenação do curso.

Dedico primeiramente a Deus, pela sua misericórdia e compaixão, que sem sua graça jamais concluiria esta etapa de minha vida.

Dedico este trabalho ainda a minha família, à minha mãe Jane Maria Dias, meu pai Moacir Sulino de Araújo e ao meu irmão Ivan Dias Sulino, que durante todo esse tempo de estudos, sempre me deram o seu apoio, carinho e se fizeram presentes nos momentos em que mais precisava.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me concedido tantas vitórias e permitido que aqui estivesse para cumprir esta jornada. Agradeço à Deus, pelos obstáculos superados, que foram decisivos para que me tornasse um ser humano melhor, mais humilde e ciente de meu papel na sociedade.

Agradeço aos meus pais, por todo carinho e compreensão durante estes anos de estudos. Agradeço especialmente minha mãe, Jane Maria Dias, pela sua ajuda em todos os momentos, sendo sábia a me aconselhar nos instantes importantes aqui vividos, pela sua garra e amor, por mim nunca abdicados; por ser este exemplo de retidão e honestidade inabaláveis. Agradeço a meu pai, Moacir Sulino de Araújo, por sua ajuda e atenção a mim prestados, pelos instantes pelo qual suas palavras sempre me ajudavam a refletir; pela sua inteligência, perspicácia, que sempre foram motivos de exemplo para mim. Ao meu irmão, Ivan Dias Sulino, pela sua compreensão, carinho e alegria ofertados.

Agradeço a todos familiares, que de uma forma e de outra, sempre estiveram ao meu lado, apoiando meus sonhos e sempre me incentivando. Em especial meu agradecimento a minha avó Adonira Ana Dias, pelo amor incomensurável durante estes anos e a meu tio, Christiano Sulino do Nascimento, pela sua presteza a mim concedidas. Agradeço aos amigos em geral, sempre presentes em minha vida. Agradeço em especial, o amigo Júnior de Paula Rodrigues, pela sua simplicidade, clareza de espírito e sabedoria que me fizeram compreender a importância de estudos na vida do ser humano.

Gostaria de agradecer também ao meu orientador Prof. Dr. Alessandro Goedtel, exemplo de pesquisador, comprometido com o desenvolvimento da ciência e da pesquisa de excelência. Sou imensamente grato pela oportunidade e confiança a mim concedida. Ao Prof. Me. Demerval Mizuyama, pela sua ajuda e co-orientação dada, sem sua contribuição, este trabalho jamais seria possível. Aos professores e colegas do Laboratório de Sistemas Inteligentes, o meu agradecimento pelo apoio e toda contribuição prestada.

Fica aqui registrado o meu sincero agradecimento ao servidor Ademir Barbosa de Araújo, do setor de Divisão de Obras e Manutenção de Imóvel da UTFPR – Campus Cornélio Procópio, que em todas as solicitações, sempre se pôs à disposição do LSI, efetuando excelente trabalho com suas habilidades em marcenaria. Também gostaria de expressar minha sincera gratidão à empresa de serviços mecânicos HIDRAUFORT, localizada na Rua José Pileggi, nº31, cidade de Cornélio Procópio-PR, representada pelo proprietário Jorge Haring Junior, pela

gentileza e generosidade em realizar o balanceamento do volante inercial, sem qualquer tipo de ônus financeiro ao grupo de pesquisa.

Ao projeto Casadinho/Procad, o agradecimento por todo suporte financeiro investido para a concretização deste trabalho. Também dedico o meu agradecimento ao Prof. Dr. Adailton Silva Borges e sua equipe de alunos (Henrique Sidney Rissá, Marcos Hiroshi Takahama), que em todos os momentos sempre foram muito atenciosos em nos ajudar a encontrar soluções para as vibrações apresentadas pelo protótipo.

Aos demais professores e funcionários da UTFPR – Campus Cornélio Procópio, os meus sinceros votos de agradecimento, pela confiança e principalmente pela prestatividade em poder me ajudar nas minhas demandas durante estes preciosos anos aqui vividos na universidade.

“Todavia, Deus, que é rico em misericórdia, pelo grande amor com que nos amou, deu-nos a vida juntamente com Cristo, quando ainda estávamos mortos em transgressões – pela graça vocês são salvos” Efésios 2: 4-5.

“Porque Deus tanto amou o mundo que deu o seu filho Unigênito, para que todo o que nele crer não pereça, mas tenha a vida eterna” João 3:16.

RESUMO

SULINO, Yann Reis Dias. **Acionamento de cargas com alto teor inercial**. 2016. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica: Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

Este trabalho apresenta o estudo e desenvolvimento de um protótipo de acionamento de cargas com alto conteúdo inercial. Isso significa verificar os aspectos mecânicos e elétricos que estas cargas ocasionam aos motores de indução trifásicos, amplamente difundidos na indústria. Assim, propõe-se a construção de um protótipo com o qual são investigadas e monitoradas cargas com alta inércia e, ainda permita a abertura de estudos relacionados ao reaproveitamento energético (cinético), análise de vibrações e qualidade de energia. Enfim, o protótipo permitirá a abertura de novos campos de pesquisa e estará ao serviço de estudos específicos. Resultados experimentais são apresentados com o objetivo de validar o acionamento das referidas máquinas.

Palavras-chave: Motor de indução trifásico, volante inercial, acionamento de cargas.

ABSTRACT

SULINO, Yann Reis Dias. **Driving loads with high content inertial**. 2016. 79 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Curso de Engenharia Elétrica: Ênfase em Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Cornélio Procópio, 2016.

This paper presents the study and development of a prototype of drive loads with high inertia content. It means checking the mechanical and electrical aspects of these loads may cause in the three-phase induction motors, widespread in the industry. In this way, it is proposed to build a prototype that is investigated and monitored with high inertia loads, and it also allows the start of new researches related to reuse energy (kinetic), vibration analysis, and power quality. Furthermore, the prototype will allow the start of a new field of research and it can be used in specific studies. Experimental results are presented in order to validate the drive of these machines.

Keywords: three-phase induction motor, inertial wheel, load drive.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 – Curva característica de conjugado <i>versus</i> velocidade do MIT..... | 20 |
| Figura 2 – Partida Direta MIT– diagramas de comando e força. | 23 |
| Figura 3 – Chave Estrela-Triângulo MarGirius modelo CET 830. | 24 |
| Figura 4 – <i>Soft-Starter</i> WEG modelo SSW05..... | 25 |
| Figura 5 – Chave Compensadora..... | 26 |
| Figura 6 – Inversor de Frequência WEG modelo CFW100. | 28 |
| Figura 7 – Carga constante. | 29 |
| Figura 8 – Carga linear. | 30 |
| Figura 9 – Carga quadrática. | 30 |
| Figura 10 – Carga inversa..... | 31 |
| Figura 11 – Momento de inércia da massa. | 33 |
| Figura 12 – Cilindro. | 34 |
| Figura 13 – Reação do sensor <i>hall</i> quando submetido a campo magnético externo. | 35 |
| Figura 14 – Montagem do volante..... | 39 |
| Figura 15 – Fusível tipo D (<i>Diazed</i>). | 42 |
| Figura 16 – Relé Térmico de sobrecarga mod. T16. | 44 |
| Figura 17 – Sistema de medição..... | 46 |
| Figura 18 – Bancada de acionamento..... | 47 |
| Figura 19 – Modificações na base de sustentação. | 48 |
| Figura 20 – Protótipo finalizado..... | 49 |
| Figura 21- Tensão V_{ab} | 53 |
| Figura 22- Corrente I_a | 53 |
| Figura 23 – Processo coleta de dados pelo inversor de freq..... | 54 |
| Figura 24 – Processo coleta de dados em partida direta..... | 54 |
| Figura 25- Variáveis de M1 – 50% frequência em M2. | 55 |
| Figura 26- V_{ab} e I_a – 50% frequência em M2. | 55 |
| Figura 27- V_{ab} e I_a – 70% frequência em M2. | 56 |
| Figura 28- V_{ab} e I_a (ampliado) – 70% frequência em M2..... | 57 |
| Figura 29- Análise de resultado (V_{ab} e I_a) – 100% frequência em M2..... | 58 |
| Figura 30- Análise de resultado (tensões e correntes) – Partida direta. | 59 |

| | |
|---|----|
| Figura 31- Análise de resultado (V_{ab} e I_a) – Partida direta. | 59 |
| Figura 32- Estimativa tempo - M1. | 60 |
| Figura 33- Estimativa tempo – M2..... | 61 |
| Figura 34- Período de transição entre estados – 50% frequência em M2. | 62 |

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 – Resumo dos meios de partida do MIT..... | 22 |
|--|----|

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Função matemática de cargas mecânicas | 31 |
| Tabela 2 - Dados para cálculo do volante..... | 37 |
| Tabela 3 - Comparação de resultados..... | 38 |
| Tabela 4 - Dados reais do volante inercial | 38 |
| Tabela 5 - Resultados de cálculo correntes nominais..... | 40 |
| Tabela 6- Resultados da seção de condução..... | 42 |
| Tabela 7 - Resultados - construção da bancada de acionamento..... | 47 |
| Tabela 8 - Ganhos das variáveis elétricas..... | 52 |
| Tabela 9 – Dados comparativos – 50% frequência em M2..... | 56 |
| Tabela 10 – Dados comparativos – 70% frequência em M2..... | 57 |
| Tabela 11 – Dados comparativos – 100% frequência em M2..... | 58 |
| Tabela 12 – Dados comparativos – Partida direta..... | 60 |
| Tabela 13 – Estimativa – Motor Weg..... | 60 |
| Tabela 14 – Estimativa – Motor Siemens..... | 61 |

LISTA DE ABREVEATURAS

| | |
|---------------|--|
| MIT | Motor de indução trifásico |
| CC | Corrente contínua |
| NBR | Norma brasileira |
| CV | Cavalo-vapor |
| NA | Normalmente aberto |
| NF | Normalmente fechado |
| <i>Taps</i> | Terminais de ligação |
| AC | <i>Alternate current</i> |
| DC | <i>Direct current</i> |
| IGBT | <i>Insulated gate bipolar transistor</i> |
| PWM | <i>Pulse with modulation</i> |
| Jc | Momento de inércia |
| ρ | Densidade do ferro |
| η | Rendimento |
| $\cos\varphi$ | Fator de potência |
| <i>Shunt</i> | Sistema de ligação em paralelo |
| M1 | Motor Weg |
| M2 | Motor Siemens |
| LSI | Laboratório de sistemas inteligentes |
| RPM | Rotações por minuto |

SUMÁRIO

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | INTRODUÇÃO | 16 |
| 1.1 | MOTIVAÇÃO..... | 17 |
| 1.2. | JUSTIFICATIVA..... | 18 |
| 1.3 | OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS | 18 |
| 2. | FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA..... | 19 |
| 2.1 | MÁQUINA DE INDUÇÃO..... | 19 |
| 2.2. | ACIONAMENTOS ELÉTRICOS | 22 |
| 2.2.1. | Partida Direta..... | 23 |
| 2.2.2. | Partida Estrela-Triângulo..... | 24 |
| 2.2.3. | Partida via Soft-Starter | 24 |
| 2.2.4. | Partida via Chave Compensadora..... | 26 |
| 2.2.5. | Partida via Inversor de Frequência | 27 |
| 2.3. | CARGAS MECÂNICAS ACOPLADAS AO MOTOR DE INDUÇÃO | 28 |
| 2.4. | MOMENTO DE INÉRCIA | 32 |
| 2.5. | SENSORES HALL..... | 35 |
| 3. | O PROTÓTIPO | 37 |
| 3.1 | CÁLCULO DO ROTOR INERCIAL | 37 |
| 3.2. | CÁLCULO DA BANCADA DE ACIONAMENTO | 39 |
| 3.2.1. | Condutores de alimentação..... | 39 |
| 3.2.2. | Contatores, fusíveis e relé térmico..... | 42 |
| 3.2.3. | Sistema de medição | 45 |
| 3.2.4. | Resumo – Componentes elétricos da bancada inercial | 47 |
| 3.3. | CHAPA DE AÇO | 48 |
| 3.4. | FINALIZAÇÃO CONSTRUTIVA | 48 |
| 3.5. | ACIONAMENTOS DE CARGAS COM ALTO TEOR INERCIAL | 49 |
| 3.6. | CALIBRAÇÃO DOS SENSORES..... | 52 |
| 3.7. | RESULTADOS EXPERIMENTAIS..... | 53 |
| 3.7.1. | Inversor de frequência – 50%..... | 55 |
| 3.7.2. | Inversor de frequência – 70%..... | 56 |
| 3.7.3. | Inversor de frequência – 100%..... | 57 |
| 3.7.4. | Partida direta..... | 58 |
| 3.7.5. | Tempo | 60 |
| 3.7.6. | Conclusão dos resultados..... | 61 |
| | CONCLUSÃO | 63 |
| | REFERÊNCIAS | 65 |
| | ARQUIVOS EM ANEXO..... | 69 |

1. INTRODUÇÃO

Motores de indução trifásicos são os motores mais utilizados no ambiente industrial. Por meio dele, permite-se obter uma gama de características muito apreciadas, principalmente quanto a sua versatilidade de adaptação às cargas e rendimento, como também em relação ao baixo custo e simplicidade de manuseio. Ainda o motor de indução trifásico, com rotor em gaiola (MITRG), é o tipo mais utilizado de todos os motores, devido a sua simplicidade, robustez, baixo custo e velocidade constante, dentre outras importantes características (Moura, 2009, p. 20).

O consumo de energia muitas vezes está ligado diretamente com a forma no qual o motor está dimensionado para um tipo de carga. O trabalho de Augusto Júnior (2005, p.245) afirma que grandes parcelas dos motores instalados no Brasil estão trabalhando com cargas inferiores a 50% da potência nominal do motor e operando por longos períodos sem carga. Logo, um motor superdimensionado acarreta num baixo rendimento, aumentando assim o consumo de energia de todo processo. Cabe salientar que o tipo de controle no qual o MIT é submetido, pode aumentar ou diminuir o consumo de energia.

O MIT pode ser acionado através da ligação diretamente à rede elétrica, porém sua corrente pode chegar em torno de sete vezes a corrente nominal de partida durante o período transitório. Sua situação ainda pode se agravar caso a carga mecânica acoplada possua uma grande massa inercial, o que acarretará numa extensão maior de tempo para o motor atingir sua velocidade de operação. É válido lembrar que, dependendo da situação que se encontra este motor, a rede pode não suportar tamanha demanda de corrente, vindo a se danificar e ou agravar o correto funcionamento de outros equipamentos conectados ao barramento. Entretanto, existem outros meios do MIT ser acionado, são eles: chave estrela-triângulo, chave compensadora, inserção de resistências na linha, inserção de resistências no circuito do rotor (para caso de rotores de bobinados), *soft-starters* e inversores de frequência segundo Seixas (2012, p.50).

Uma carga mecânica ao ser acionada requer sempre uma determinada potência elétrica; ou seja, significa dizer que tal carga mecânica possui a necessidade de um determinado conjugado e velocidade de rotação (DIAS E LOBOSCO, 1988). As cargas industriais ou mecânicas são classificadas em seis grandes grupos: constante, linear, quadrática, inversa, não

uniforme e as que não necessitam de conjugado (DIAS E LOBOSCO, 1988; SILVA, 2007). Entretanto, as cargas mais encontradas são as cargas do tipo constante, linear, quadrática e inversa (Melo et al., 2013, p.3).

O termo inércia é definido como a resistência pelo qual um corpo oferece ao entrar em movimento (Hibbeler, 2011). Logo uma carga de elevada inércia é aquela que requer maior potência elétrica (torque) do motor em seu acionamento, e, menor torque para mantê-la em movimento. Este tipo de carga é normalmente associado com máquinas que se comportam como volantes para fornecer a maior parte da energia de operação, conforme Petruzella (2013, p. 153).

A partir do texto supracitado, propõe-se o desenvolvimento de um protótipo que permita estudos sobre o acionamento de uma carga mecânica com alto teor inercial. Assim, tem-se a possibilidade da avaliação experimental da interação motor de indução trifásico com as cargas de maior conteúdo inercial, partindo do pressuposto do impacto direto e indireto que estas mesmas cargas podem oferecer nas características elétricas e mecânicas do MIT.

Assim, uma das contribuições deste trabalho consiste no desenvolvimento de uma bancada de testes que sirva de instrumento científico e didático na busca de soluções dos problemas que cercam o MIT quando acoplado a uma carga com alto teor inercial. Esta bancada também permitirá o desenvolvimento de estudos futuros relacionados a regeneração de energia por meio da transformação de parte da energia cinética em energia elétrica.

1.1 MOTIVAÇÃO

Pode-se concentrar a motivação em dois aspectos: os aspectos construtivos e os aspectos teóricos. Os aspectos de ordem construtiva partem das necessidades de se construir um protótipo que atenda as especificações inicialmente traçadas pelo grupo de pesquisa.

Já nos aspectos teóricos, este equipamento continuará a contribuir para uma variada gama de estudos, principalmente relacionado à partida de motores de indução com alta carga inercial (quais são as variáveis e fatores relacionados); ao diagnóstico de falhas em máquinas com carga de alto teor inercial bem como a possibilidade de regeneração de energia contida na forma cinética em cargas industriais; além de estudos relacionados a qualidade de energia elétrica, quando submetida a um motor com grande teor de inércia.

1.2. JUSTIFICATIVA

Este projeto justifica-se pela importância da pesquisa e do protótipo desenvolvido para a comunidade acadêmica. Isso se deve ao fato de realizações de novas pesquisas pertinentes ao processo de acionamento, frenagem, diagnóstico de falhas, eficiência energética de motores de indução sujeitos a cargas com expressivo teor inercial. Assim, por meio destas pesquisas será possível explorar novos horizontes do conhecimento científico, que é de suma importância para a modernização e progresso do setor industrial.

Sobre a questão educacional, projeta-se a possibilidade de um enriquecimento técnico muito importante que este protótipo permitirá aos estudantes. Ele será o elo de ligação entre conteúdo teórico e prático dos cursos de engenharia. Será possível executar na prática situações que grande parte dos profissionais encontraram no cotidiano do meio industrial, principalmente relativo ao comportamento dinâmico associado de variáveis elétricas e mecânicas.

1.3 OBJETIVOS GERAIS E ESPECÍFICOS

Construir uma bancada de testes que permita analisar as deficiências apresentadas pelo MIT, ao ser acionado para movimentar uma carga com alto teor inercial. O objetivo geral deste trabalho de conclusão de curso consiste em desenvolver um protótipo que permita fazer uma análise sobre o comportamento do motor de indução mediante a partida de uma alta carga inercial com vários tipos de acionamentos e estratégias de controle.

Os objetivos específicos deste trabalho são os seguintes:

- Analisar o desempenho dinâmico e estático de variáveis elétricas e mecânicas envolvidas no acionamento do MIT mediante uma carga de alto teor inercial;
- Construção da estrutura mecânica e do comando elétrico para acionamento;
- Instrumentação e aquisição de dados do protótipo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÁQUINA DE INDUÇÃO

Denomina-se máquina de indução àquela máquina na qual a tensão no rotor é induzida nos enrolamentos do rotor. Assim, toda tensão induzida, corrente circulante e conseqüentemente, o campo magnético produzido no rotor, acontece por meio da indução eletromagnética. Logo, este tipo de motor não necessita de corrente contínua para poder funcionar (CHAPMAN, 2013).

Para este tipo de máquina, tem-se dois tipos importantes de configuração para o rotor, são eles: tipo gaiola de esquilo e rotor bobinado. O rotor do tipo gaiola de esquilo, como o próprio nome já sugere, possui barras de material condutor que são inseridas nas ranhuras do rotor e são curto-circuitadas em suas extremidades, lembrando assim uma gaiola de esquilo. Este tipo de motor é amplamente utilizado devido a sua simplicidade e robustez apresentada. Para o rotor do tipo bobinado tem-se enrolamentos bobinados inseridos no rotor (enrolamentos semelhantes ao do estator), no qual as suas extremidades são conectadas à anéis deslizantes sobre o eixo, de forma isolada (Fitzgerald et al., 2006, p.184).

O MIT é um equipamento multifuncional muito utilizado no setor produtivo, o qual permite sua utilização numa ampla gama de aplicações. Contudo, o MIT também está suscetível a falhas que podem comprometer seu funcionamento. De acordo com Bonnett (2008, p. 31) cita que dentre as falhas encontradas, cerca de 69% são devidas a rolamentos, 21% ao enrolamento do estator, 7% a barra do eixo e 3% ao eixo. Portanto, diagnosticar precocemente as possíveis falhas do motor de indução, é uma forma de agregar confiabilidade ao sistema no qual o motor encontra-se inserido, uma vez que se deixa de haver ônus com uma eventual parada no processo produtivo (SANTOS et al, 2012). Trabalhos correlatos com falhas em máquinas elétricas são encontradas em Palácios et al (2015) e Godoy et al (2015).

Segundo Castro (2016, p.3), as principais vantagens do MIT são relacionadas ao custo, que é bem menor se compararmos com um motor de corrente contínua com a mesma potência; a manutenção do MIT é relativamente simples e barata. A principal desvantagem do MIT está na dependência entre fluxo e tensão do estator, que não ocorrem com os motores CC de excitação independente, limitando assim a faixa de variação de velocidade quando este estiver

controlado por variação de tensão no estator. Cunha (2016, p.3) afirma que dentre as vantagens de se utilizar o MIT com rotor tipo gaiola é que o rotor possui menor inércia e é mais adequado a atmosferas explosivas ou agressivas. Ainda, dentre as desvantagens do referido MIT está o modelo dinâmico mais complicado, controle e acionamento mais complexo.

Neste momento é importante que esteja claro a relação entre velocidade e conjugado do motor de indução, pois algumas considerações devem ser apresentadas. A parte fundamental do estudo começa a ser descrita por Chapman (2013, p. 336) onde é possível fazer algumas considerações em relação ao conjugado do motor de indução e sua velocidade. De acordo com a Figura 1, tem-se:

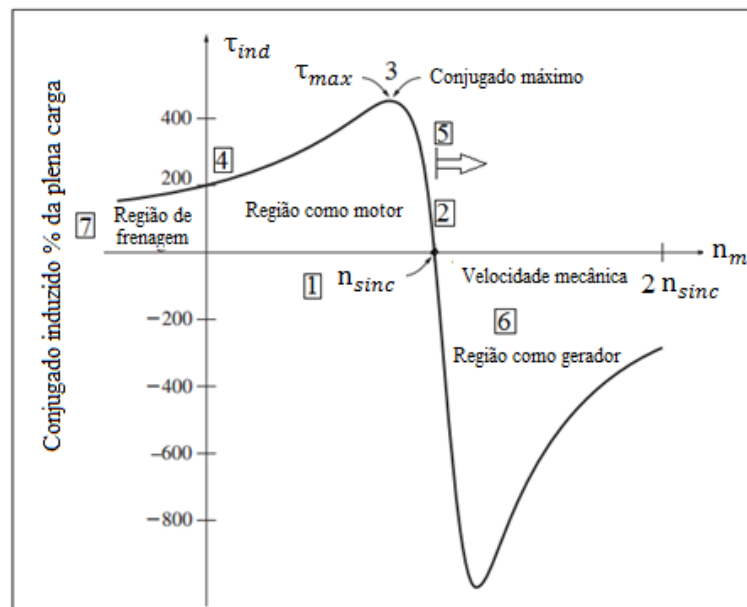


Figura 1 – Curva característica de conjugado versus velocidade do MIT.
Fonte: Adaptado de Chapman (2013, p. 336).

1. O conjugado induzido no motor é zero estando o rotor na velocidade síncrona;
2. É aproximadamente linear a curva de conjugado versus velocidade com o motor à vazio ou a plena carga;
3. O conjugado de partida é ligeiramente superior ao conjugado de plena carga, de modo que o motor colocara em movimento qualquer carga que ele puder acionar a plena potência;
4. O conjugado máximo é aproximadamente duas a três vezes o conjugado nominal;
5. Caso o motor seja acionado e a velocidade no eixo supere a velocidade síncrona, a máquina passará atuar como gerador;

6. O conjugado do motor varia com o quadrado da tensão para um determinado escorregamento;
 7. A inversão de fases causa a inversão do sentido de rotação dos campos magnéticos, o que acarreta uma frenagem extremamente rápida no sentido de rotação da máquina com elevação substancial das correntes de linha as quais podem ser comparadas a partida da máquina.
- Gerador de indução

Pelo exposto anteriormente, observa-se que no instante que o motor de indução recebe uma força motriz em seu eixo ocasionando a elevação da velocidade no rotor acima velocidade síncrona, o mesmo passa a se comportar como gerador (escorregamento negativo). A medida que este conjugado no eixo aumenta, cresce também a potência produzida pela máquina. Entretanto, existe a ocorrência de um conjugado máximo induzido. Isso quer dizer que se uma máquina motriz aplicar ao eixo do “gerador” de indução um conjugado maior do que o conjugado máximo como gerador, a velocidade do gerador irá disparar. (CHAPMAN, p. 388)

Segundo Kosov (2005, p.342-343), qualquer motor de indução, independentemente do tipo, poderá operar como gerador. Sua saída depende do valor do escorregamento negativo ou de quão rápido seu eixo é acionado acima da velocidade síncrona e mesmo sentido de rotação. O gerador apenas gerará potência quando for acionado acima da velocidade síncrona e estiver ligado a uma fonte de tensão e frequências fixas. A máquina de indução atuando na faixa de operação como gerador, pode oferecer determinadas características muito significativas, entre elas pode operar como corretor de fator de potência (embora não seja muito utilizado para esta finalidade), pois sempre fornece uma corrente adiantada a linha; como também pode operar na frenagem dinâmica de motores de indução. Isso quer dizer que, no momento do aumento de velocidade do rotor acima da velocidade síncrona (instante de passagem de atuação como motor para gerador), a máquina passa a ação de frenagem.

Neste trabalho aborda-se a região de transição entre motor para gerador e vice-versa, no ponto limite da velocidade síncrona. É neste momento que ter-se a oportunidade de observar o impacto direto da carga inercial no motor e sua respectiva resposta em contraponto, bem como sua interação com a rede elétrica.

2.2. ACIONAMENTOS ELÉTRICOS

O termo acionamento elétrico deve ser entendido como o sistema de ferramentas e ou procedimentos que permitem acionar um equipamento elétrico a fim de realizar um determinado trabalho, ou seja, converter a energia elétrica em mecânica motriz. Alguns tipos de acionamentos serão apresentados neste trabalho. São eles: partida direta, estrela-triângulo, *soft-starters* e inversores de frequência. O Quadro 1, apresenta um pequeno resumo dos principais meios de partida do MIT.

| Partida | Controle | Vantagem | Desvantagem |
|------------------------|---------------------|--|--|
| Chave Compensadora | Tensão | <ul style="list-style-type: none"> - Limitação da corrente de partida; - Baixo custo; - Utilizada para cargas de baixa inércia. | <ul style="list-style-type: none"> - Há uma queda também do conjugado, o que pode acarretar problemas na partida se esta não for considerada; - Mudança brusca nos Taps; - Inadequado para cargas com altas inércias; - Vida útil limitada (número de manobras); - Possibilidade de gerar faíscas ou arcos de tensão devido as partes móveis serem mecânicas. |
| <i>Soft-Starter</i> | Tensão | <ul style="list-style-type: none"> - Limitação da corrente de partida; - Partida suave (existe uma rampa controlada de tensão por meio de tiristores); - Vida útil ilimitada. | <ul style="list-style-type: none"> - Preço devido ao uso de componentes eletrônicos em alta tensão; - Problemas para cargas com altas inércias e conjugado constante. |
| Inversor de Frequência | Tensão e Frequência | <ul style="list-style-type: none"> - Limitação da corrente de partida (próxima a nominal); - Acionamento de cargas com altas inércias; - Controle de velocidade do motor; - Opera acima da rotação nominal do motor. | <ul style="list-style-type: none"> - Preço elevado; - Motor deve ter isolamento adequado (a operação do inversor gera picos de tensão no isolamento do motor); - Harmônicas; - Podem ser usados filtros para reduzir ou eliminar os efeitos prejudiciais do inversor ao motor, entretanto, o custo deles é muito alto. |
| Direta | - | <ul style="list-style-type: none"> - Melhor condição para o motor. | <ul style="list-style-type: none"> - Pior condição para a rede de alimentação. |

Quadro 1 – Resumo dos meios de partida do MIT.
Fonte: Adaptado de Naturesa (2014, p. 29).

2.2.1. Partida Direta

O trabalho de Franchi (2008, p.154) afirma que a partida direta ocorre quando um motor de indução é acionado diretamente da rede. Este tipo de partida é indicado quando o conjugado de partida é elevado; há baixa potência do motor de modo a limitar as perturbações originadas pelo pico da corrente e o equipamento no qual deseja-se acionar não necessita de uma aceleração progressiva. Entretanto, a ABNT NBR 5410 (2004, p. 154), afirma que para partida direta de motores com potência acima de 3,7 kW (5 CV), em instalações alimentadas diretamente pela rede de distribuição em baixa tensão, deve-se consultar a empresa de distribuição local

A partida direta é um dos meios mais utilizados por ser de baixo custo e de fácil implementação. Entretanto, a mesma possui algumas desvantagens, tais como: queda de tensão no sistema de alimentação da rede, a corrente de partida elevada na partida e redução proporcional ao aumento da velocidade, cabos do sistema de alimentação devem ser superdimensionados devido à alta corrente de partida, entre outras (FRANCHI, 2008).

A Figura 2, ilustra a estratégia de partida direta do MIT. Onde L1, L2, L3 são as fases da entrada trifásica; F1, F2, F3 os respectivos fusíveis de proteção por curto-circuito; K1 o contator; FT1 o relé térmico que efetua a proteção por sobrecarga.

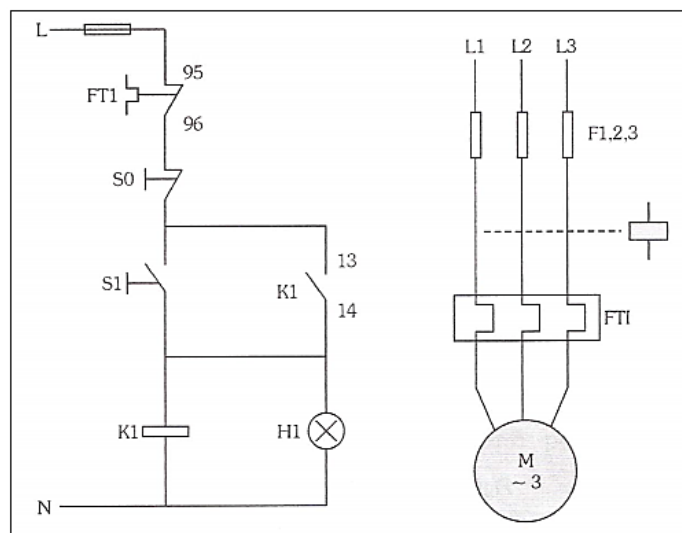


Figura 2 – Partida Direta MIT– diagramas de comando e força.
Fonte: Adaptado de Franchi (2008, p. 156).

A lógica de comando da Figura 2 funciona quando a botoeira S1 é acionada. Neste momento a bobina do contator K1 é magnetizada instantaneamente, ou seja, aqueles contatos que são normalmente fechados (NF) são abertos e aqueles que são normalmente abertos (NA) são fechados. No caso da partida direta, o motor é acionado por S1 e desligado por S0.

2.2.2. Partida Estrela-Triângulo

A estratégia de partida Estrela-Triângulo, ou também conhecida com Y- Δ , é um método muito utilizado no meio industrial, o qual permite o motor partir com uma redução de aproximadamente 58% da tensão nominal nas bobinas do motor no instante da partida. Esse procedimento proporciona a redução de aproximadamente 33% da corrente de partida da máquina. Isso acontece porque no instante da partida o motor está ligado do modo estrela e depois que o rotor alcançou uma velocidade próxima da nominal, passa-se para o modo triângulo, aplicando a tensão nominal inteiramente nas bobinas do motor (FRANCHI, 2008).

Mas todo este processo acima apenas poderá ser efetuado se o MIT obtiver uma dupla ligação de tensão. A partida estrela-triângulo é indicada para motores que partem com carga reduzida, se possível a vazio (BRITO, 2007). A Figura 3 ilustra uma típica chave estrela-triângulo.



**Figura 3 – Chave Estrela-Triângulo MarGirius modelo CET 830.
Fonte: Adaptado do Fabricante MARGIRIUS (2014).**

2.2.3. Partida via Soft-Starter

As *Soft-Starters* são chaves de partidas que permitem controlar a rampa de tensão aplicada ao motor no instante da partida, utilizando-se tiristores. Esta estratégia permite que a

corrente de partida seja sempre a menor possível, pois o torque do motor é ajustado de forma automática com a carga (BRUNA, 2012). O ângulo de disparo dos tiristores é controlado por um sistema eletrônico microprocessado que aplica uma tensão variável nos terminais do MIT, elevando suas amplitudes na partida. Por este motivo é que o motor não possui saltos ou arranques bruscos na sua partida, além de não apresentar arcos elétricos e ruídos como acontece em outras chaves (BRITO, 2007). A chave *Soft- Starter* por ser mais sofisticada que as demais e apresenta um valor de aquisição mais expressivo pelas suas atribuições. Segundo Solveson et al (2006, p. 973), as chaves *Soft- Starter* são amplamente utilizadas nas indústrias.

Franchi (2008, p. 182) afirma que a chave *Soft- Starter* consegue assegurar a proteção térmica do motor, além de dominar o controle das características de funcionamento, especialmente entre o intervalo de partida e de parada. A chave ainda consegue assegurar a proteção mecânica da máquina por redução da corrente de partida e por supressão de vibrações mecânicas. O referido autor ainda cita que este tipo de chave, além de ter as funções que acima foram descritas, ainda possui funcionalidades programáveis que podem ser adequadas conforme as necessidades do usuário. Algumas dessas funções são: controle das rampas de aceleração e desaceleração; limitação da corrente ajustável; conjugado de partida; frenagem por injeção de corrente contínua; proteção por acionamento de sobrecarga; proteção do motor contra aquecimentos devido a sobrecargas ou a partidas demasiadamente frequentes e detecção de desequilíbrio ou falta de fases e de defeitos nos tiristores.

A Figura 4 ilustra um modelo comercial, utilizado para motores de 0,75 a 60 cv.



Figura 4 – *Soft- Starter* WEG modelo SSW05.
Fonte: Adaptado do Fabricante WEG (2014).

2.2.4. Partida via Chave Compensadora

As chaves compensadoras são dispositivos que permitem ao MIT ser acionado com uma redução da tensão aplicada por meio de “*taps*” do autotransformador. Com uma tensão de partida menor, logo, reduz-se também a corrente de partida. Normalmente o motor pode ser ligado a “*taps*” que podem corresponder 50%, 65% ou 80% da tensão nominal. Após acelerar, o motor é ligado diretamente à rede, de acordo com Seixas (2012, p. 49).

O trabalho de Silva et al (2010, p. 3), afirma que a chave compensadora apresenta um bom desempenho, porém é recomendada a motores de grande potência ou que necessitam de um maior conjugado de partida, se comparado com a chave estrela-triângulo. Este método possui a vantagem de variação discreta e gradual da tensão conforme número de *taps*; não limita-se pelo tipo de ligação ou de número de terminais do motor. Ainda, o autotransformador limita os picos de corrente durante as comutações internas, através de suas reatâncias internas. Já as desvantagens são: custo maior e aumento das perdas de energia em relação a chave estrela-triângulo; maior volume dimensional e restrição do número de partidas.

A Figura 5 ilustra uma chave compensadora para motores entre 5 CV a 600 CV.



Figura 5 – Chave Compensadora.
Fonte: Adaptado do Fabricante SILITRAFO (2014).

2.2.5. Partida via Inversor de Frequência

O autor G. Nascimento (2013), traz uma versão interessante sobre a características funcionais dos inversores de frequência. Segundo o autor, os inversores de frequência:

“Trazem a possibilidade de variar a velocidade de motores de indução trifásicos, permitindo variar a velocidade do processo, produção ou máquina, aliando ao baixo custo de manutenção desses motores com esta função”. Nascimento (2013, p. 184).

Para Senai (2012, p. 36) os inversores de frequência, também são conhecidos como conversores de frequência ou inversores AC. Entretanto, a nomenclatura mais utilizada é inversora de frequência. Assim o inversor é um dos componentes internos deste equipamento, pelo qual é constituído essencialmente por quatro blocos. O primeiro é chamado de circuito de entrada, composto basicamente por diodos retificadores, para converter a tensão alternada em contínua. O segundo bloco é o circuito intermediário, que inclui um banco de capacitores eletrolíticos e circuito de filtragem de alta frequência, que permite uma suavização quanto as variações de tensão e gera uma saída com tensão DC fixa. No circuito inversor, compreendido por transistores IGBT (Transistor Bipolar de Porta Isolada, proveniente do inglês *Insulated Gate Bipolar Transistor*), que chaveiam a tensão DC advinda do circuito intermediário e gera uma saída PWM (*Pulse With Modulation*) para a carga, muito próxima da forma de onda senoidal. Já o circuito de controle, é o local onde são controlados os disparos dos pulsos que acionam os IGBTs e geram as formas de ondas necessárias para o controle de velocidade e torque dos motores, além de armazenar a parametrização do inversor de frequência.

Dentre os conversores de frequências existem os de controle vetorial, controle direto de torque e o escalar. O controle escalar baseia-se por sistemas que se restringem ao controle da velocidade do motor, sem o controle de torque desenvolvido e sem o conhecimento da dinâmica do processo no controle em malha aberta (FRANCHI, 2008). Já o de controle vetorial, é mais complexo, porém baseia-se através do controle do tipo de tensão e de fluxo. Este controle melhora a dinâmica da interação motor-carga. Os inversores com controle vetorial de fluxo mantêm o fluxo magnético no motor constante (SENAI, 2012).

A principal diferença entre os inversores escalares e os vetoriais deve-se à capacidade dos inversores vetoriais de impor o torque necessário ao motor, de forma precisa e rápida mesmo em baixas velocidades, permitindo uma elevada velocidade de resposta dinâmica a

variações bruscas de carga. Os inversores escalares apresentam uma resposta dinâmica bem mais lenta, demorando mais para reagir a qualquer alteração de velocidade ocorrida ou solicitada. Os inversores escalares são indicados para cargas que possuam patamar de controle de torque constante para variação de velocidade, ou mesmo de funções quadráticas (bombas, ventiladores, calandras, etc.).

No caso do controle vetorial, o mesmo é indicado para operações que requerem alto desempenho dinâmico, grande precisão de velocidade, pequenas oscilações no conjugado do motor em casos de variações na carga e operação suave no intervalo de velocidades do inversor (FRANCHI, 2008; SENAI, 2012). No mercado há diversos fabricantes que produzem os inversores para as mais variadas aplicações bem como funcionalidades adicionais de operação. A exemplo de ilustração, o inversor de frequência CFW100 da WEG, é um inversor que de acordo com o fabricante, permite um equipamento com acionamento de velocidade variável, compacto, de alta performance para motores de indução trifásicos além de oferecer flexibilidade e excelente custo determinadas funções especiais. A Figura 6 ilustra inversor de frequência da WEG modelo CFW100.



Figura 6 – Inversor de Frequência WEG modelo CFW100.
Fonte: Adaptado do Fabricante WEG (2016).

2.3. CARGAS MECÂNICAS ACOPLADAS AO MOTOR DE INDUÇÃO

Os motores de indução são equipamentos elétricos que possuem uma variada aplicabilidade na indústria. Estes são muito utilizados devido as suas características construtivas robustas, ser de fácil manutenção, adaptação a diversas situações de cargas e

operação econômica quando bem especificado (GOEDTEL et al, 2013). Porém, é importante entender o comportamento dinâmico e estático das cargas mecânicas acopladas em seu eixo.

De acordo com as afirmações de Silva (2007, p. 25), qualquer carga mecânica requer uma potência para o regime transitório e no regime permanente. Este, por sua vez, necessita do produto de um conjugado e da velocidade de forma a atender a demanda de potência no eixo da máquina. Alguns tipos de cargas mecânicas em função de suas características de conjugado versus velocidade, a saber:

- 1) Carga Constante: São independentes da rotação. Demonstram pouca ou nenhuma variação do conjugado exigido do motor. São utilizadas em guinchos, guindastes, transportadores de correia sobre carga permanente.

A Figura 7, esboça exemplo de carga constante.

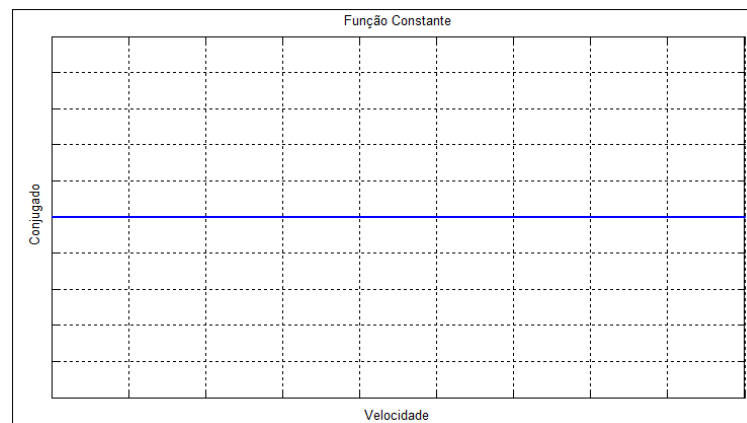


Figura 7 – Carga constante.
Fonte: Autoria própria.

- 2) Cargas Lineares: Variam linearmente com a rotação. Estas cargas são encontradas em moinhos de rolos, bombas pistão e serras para madeiras (Figura 8).

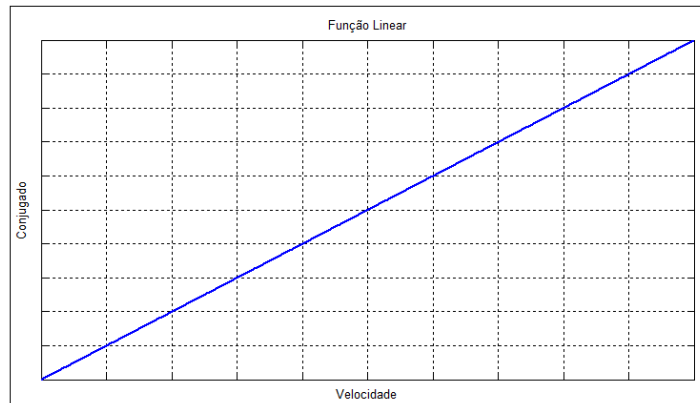


Figura 8 – Carga linear.
Fonte: Autoria própria.

- 3) Cargas Quadráticas: Variam com o quadrado da rotação. São empregadas em ventiladores, exaustores e centrifugas (Figura 9).

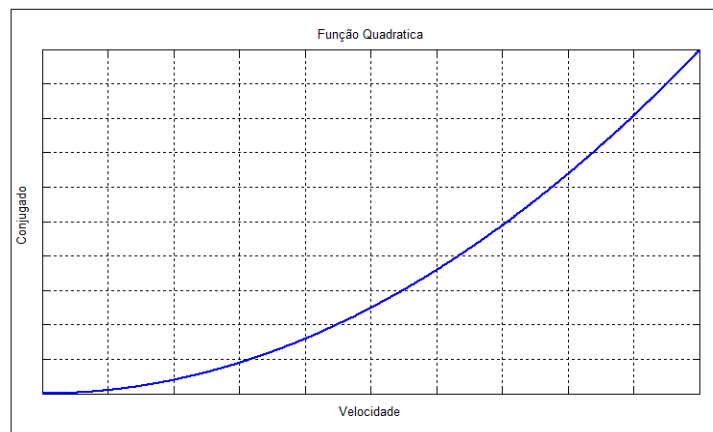


Figura 9 – Carga quadrática.
Fonte: Autoria própria.

- 4) Carga Inversa: Apresentam uma variação inversamente à rotação e proporcionam potência constante. Máquinas operatrizes apresentam uma grande gama de aplicação deste tipo de carga (Figura 10).

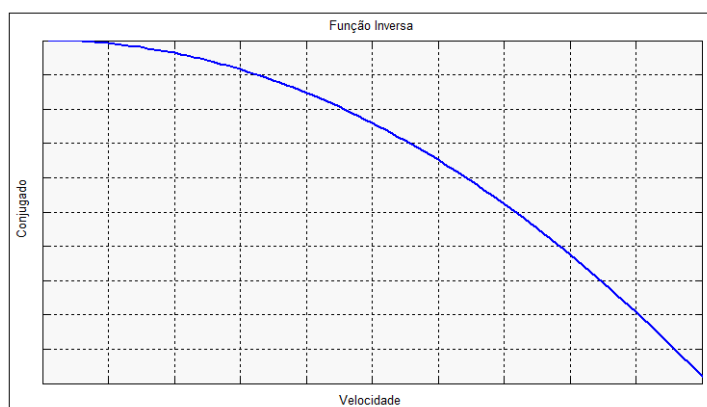


Figura 10 – Carga inversa.
Fonte: Autoria própria.

- 5) Cargas que não solicitam conjugado: São chamadas de volantes e tem a finalidade de liberar parte da energia cinética armazenada para sustentar a demanda de energia exigida pela máquina pelo qual está sendo acionada. Costuma-se ser de ferro fundido e estar de forma alinhada e balanceada para que se evite o aparecimento de vibrações no eixo do motor. São empregadas em prensas de perfuração e estampagem profundas.
- 6) Carga não uniforme: o seu conjugado de carga varia de ordem não uniforme com a rotação e não possui uma função matemática que a descreva de forma eficiente o seu comportamento. Fornos rotativos de grande porte são exemplos de cargas não uniformes.

A Tabela 1, ilustra as funções matemáticas das cargas industriais mais importantes.

Tabela 1 - Função matemática de cargas mecânicas

| Tipo de carga | Função matemática |
|---------------|--|
| Quadrática | $f(\omega) = T(\omega) = K + \alpha * \omega^2$ |
| Linear | $f(\omega) = T(\omega) = K + \alpha * \omega$ |
| Constante | $f(\omega) = T(\omega) = K$ |
| Inversa | $f(\omega) = T(\omega) = \alpha * \varepsilon^{-b*\omega} + K$ |

Fonte: Adaptado de Silva (2007, p. 51).

2.4. MOMENTO DE INÉRCIA

O momento de inércia polar, também conhecido por inércia rotacional, é uma medida de resistência no qual um corpo oferece ao movimento de rotação. Logo, verifica-se que tal variável mecânica possui elevada importância no dimensionamento de um motor elétrico. A norma NBR 7094:1996 regulamenta o valor do momento de inércia que um MIT pode acionar. Já o valor mínimo do momento de inércia, estando o motor girando a vazio, é o valor do momento de inércia fornecido pelo fabricante (Goedtel et al, 2007) apud NBR 7094.

$$J_c = 0,04 * P_n^{0,9} * p^{2,5} \quad (1)$$

A Equação 1, também pode ser utilizada para obter o momento de inércia de uma carga que pode ser acoplada, conforme as características elétricas, em um motor. Na referida equação, J_c é o momento de inércia medido em kgm^2 , P_n é a potência nominal do motor em kW e p é o número de pares de pólos (Goedtel et al, 2007). Levando-se em consideração o momento de inércia da carga, Mamede Filho (2001, p. 252), propõe que, em um todo, não apenas a inércia da carga interfere na rotação do motor, mas a própria “inércia do rotor é um obstáculo para sua aceleração”.

Logo, a inércia a ser vencida pelo motor é descrita pela Equação 2. Esta equação resume o somatório de toda inércia contida no conjunto de motores e rotor. Lembrando que J_m é o momento de inércia do rotor do motor, J_r é o momento de inércia do volante inercial (rotor) e J_{mc} , é o momento de inércia total do sistema motor e carga.

$$J_{mc} = J_m + J_r \quad (2)$$

O desconhecimento do momento de inércia da carga é um dos elementos que levam ao dimensionamento incorreto de um motor elétrico (DIAS E LOBOSCO, 1988). Entretanto, a característica inercial no qual a carga possui deve ser analisada com cuidado, pois ela interfere diretamente no funcionamento do motor. A partida, por exemplo, é uma situação que demanda um pico de corrente para o motor atingir sua velocidade de operação, pois deve magnetizar o núcleo e vencer a inércia inicial do rotor (POMILIO, 2014).

Da mesma maneira que deve-se considerar a forma no qual a carga começará a girar, também é de suma importância, ter um dispositivo que a faça parar sem que haja comprometimento da integridade dos equipamentos, bem como de quem os opera. Pensando nisso, dispositivos de frenagem foram agregados ao MIT de maneira a permitir que a parada do motor seja efetivada com segurança. Aliado a essas características, surge o motofreio, o qual é um dispositivo que possui dois tipos de atuação do freio, o normalmente fechado e o normalmente aberto. Este último, amplamente utilizado em cargas com alto teor inercial que não podem ser freadas rapidamente. Seu sistema de frenagem é independentemente do funcionamento do motor (VOGES, 2011).

Hibbeler (2011, p.413) define que o momento de inércia da massa do corpo como uma relação ao eixo “z”, dada pela Equação 3, onde I é exclusivo para cada eixo em relação ao qual é calculado.

A Figura 11, ilustra a exemplificação dos termos abordados na Equação 3.

$$I = \int_m r^2 dm \quad (3)$$

Onde: r é a distância perpendicular do eixo a um elemento arbitrário;
 dm é um elemento de massa arbitrário.

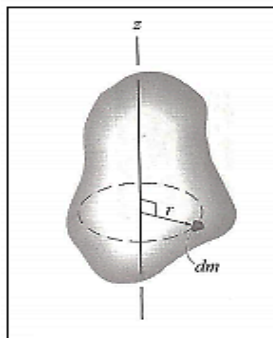


Figura 11 – Momento de inércia da massa.
Fonte: Adaptado de Hibbeler (2011, p. 413).

Logo para o caso do cilindro, o volume será expresso por dV (Equação 4), pelo qual encontra-se os seguintes cálculos:

$$dV = (2 * \pi * r) * h dr \quad (4)$$

$$dm = \rho * dV = \rho * ((2 * \pi * r) * h dr) \quad (5)$$

Onde: ρ é o coeficiente de densidade de massa;

h é o comprimento do cilindro;

dV é a variação de volume.

A Figura 12 aborda a forma adotada para o cálculo do volante inercial.

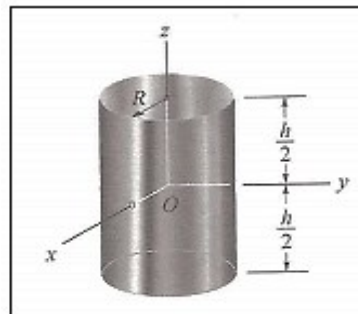


Figura 12 – Cilindro.

Fonte: Adaptado de Hibbeler (2011, p. 414).

Integrando toda a região do cilindro e tendo base que o elemento inteiro está a mesma distância “ r ” do eixo “ z ”, o momento de inércia do cilindro será:

$$I_z = \int_m r^2 dm = \rho * 2\pi * h \int_0^R r^3 dr = \frac{\rho * \pi * R^4 * h}{2} \quad (6)$$

Levando-se em consideração a massa do cilindro, temos:

$$m = \int_m dm = \rho * 2\pi * h \int_0^R r dr = \rho * \pi * h * R^2 \quad (7)$$

Onde: m é a massa do cilindro;

R é o raio do cilindro.

Assim, o momento de inércia do cilindro (I_Z) será definido pela Equação (8).

$$I_Z = \frac{1}{2} * m * R^2 \quad (8)$$

Logo, com a equação acima calcula-se o momento de inércia, considerando raio e massa de um cilindro, disponíveis para o cálculo. Lembrando que, deve-se estar atento quanto as respectivas unidades utilizadas, pois caso não sejam consideradas haverá comprometimento dos resultados obtidos.

2.5. SENSORES HALL

Edwin H. Hall, observou em 1879 as circunstâncias que sucedem quando a corrente elétrica em circulação em um condutor retilíneo estiver sob influência de um campo magnético perpendicular em direção da corrente. Hall verificou que nesta situação o campo magnético exterior cria uma força magnética que atua sobre as cargas em circulação no condutor, ocasionando um desvio do fluxo das cargas. Assim, regiões com diferença de potencial são criadas. Contudo, é possível ainda observar o sentido da corrente, pois estando o fluxo contra ou a favor do campo magnético perpendicular, a concentração das cargas se modifica, tão logo como o sinal da diferença de potencial gerada. (ENDALÉCIO, 2013). A Figura 13, ilustra o efeito *hall*.

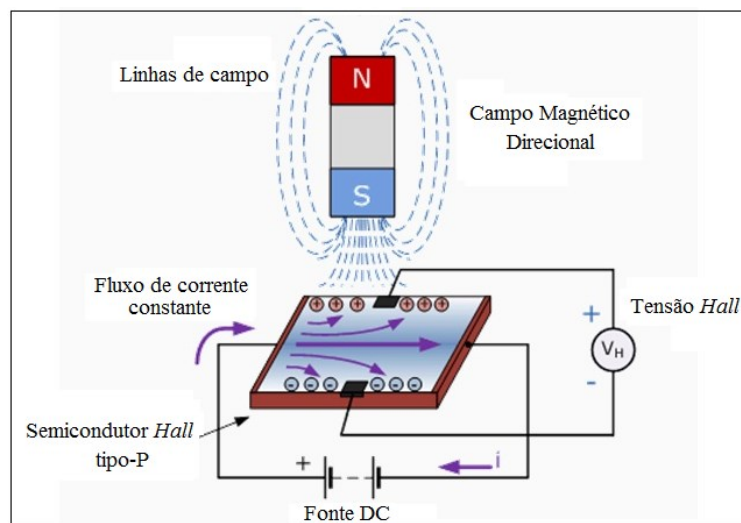


Figura 13 – Reação do sensor *hall* quando submetido a campo magnético externo.
Fonte: Adaptado de IF-UFRGS (2016).

Na mesma perspectiva, o sensor *hall* utiliza o campo magnético pelo qual está em observação na conversão de uma tensão elétrica. Essa tensão gerada (V_H), apenas surge quando o fluxo magnético em torno do sensor ultrapassa limites pré-estabelecidos. O sensor *hall* é constituído de uma placa pequena de material semicondutor dopado, por meio do qual a corrente flui em um certo sentido, no instante que for aplicada tensão nos terminais de alimentação. Como dito anteriormente, estando o sensor exposto a um campo magnético, as linhas de fluxo ocasionaram o desvio do fluxo de carga para as extremidades, resultado da força de Lorentz (intensidade de força que dependerá principalmente da magnitude do campo magnético quanto da velocidade do deslocamento do fluxo de carga). O efeito *hall* pode ser encontrado em todos materiais, entretanto sua eficácia é maior quando este material possui a mobilidade do elétron alta, caso do arsenieto de gálio (GaAs) (IF-UFRGS, 2016).

Como pode-se observar, os sensores *hall*, possui uma gama de utilidades, sendo utilizados para medições de diversas grandezas físicas. No trabalho em específico, os sensores de tensão e corrente foram utilizados ambos da empresa LEM, modelos LV25-P para tensão e LAH 25-NP para corrente.

3. O PROTÓTIPO

Passa-se então para a descrição de todo o processo inerente ao cálculo, dimensionamento e construção do protótipo, pelo qual está condicionado a existência de uma bancada de acionamento (partida, medição e segurança) e o conjunto inercial (motores e volante inercial).

3.1 CÁLCULO DO ROTOR INERCIAL

Esta etapa dedicou-se em buscar nas literaturas especializadas documentos sobre o cálculo do momento de inércia para uma determinada massa de um tarugo de aço liga 1040. A princípio, foram condicionadas duas situações iniciais para a pesquisa por decisão espontânea da orientação. São elas:

- 1) Caso: Somatório do momento de inércia para o motor de dois (2) pólos acrescidos de 10% deste respectivo valor;
- 2) Caso: Momento de inércia igual ao do motor de dois (2) pólos.

A Tabela 2, ilustra os principais dados para o início do cálculo.

Tabela 2 - Dados para cálculo do volante

| | |
|---|--------------------------------|
| Momento Inércia do motor Siemens 2 cv (Dados fornecidos pelo fabricante) | 0,05761587 [kgm ²] |
| ρ_{ferro} (densidade) | 7870 kg/m ³ |
| r (raio do cilindro) | 13 cm |

Fonte: Autoria Própria.

A partir dos dados apresentados na Tabela 2, é possível conhecer os valores aproximados da massa e do comprimento do cilindro. Substituindo os dados da Tabela 2 na Equação 8 que descreve o respectivo momento de inércia, obtêm-se a massa. Conhecendo a

massa do tarugo, pode-se calcular o respectivo comprimento, através da Equação 7, o qual relaciona a massa com a densidade e o volume específico do cilindro. A Tabela 3 compara os resultados obtidos nos dois casos descritos anteriormente.

Tabela 3 - Comparação de resultados

| Parâmetros | Caso 1 | Caso 2 |
|------------------|-----------|---------|
| Massa (kg) | 30,001163 | 27,273 |
| Comprimento (cm) | 28,72 | 26,1084 |

Fonte: Autoria Própria.

Os resultados encontrados nortearam o caminho a ser seguido no projeto e para balizar as decisões práticas construtivas. Entretanto, devido às variações das características dos materiais não foi possível seguir à risca tanto os parâmetros do caso 1 quanto do caso 2. Assim, opta-se por aproximar o volante pelo peso do caso 1. O material utilizado na construção do volante foi o aço liga 1040, apesar dos cálculos terem sido todos efetuados sobre o ferro. O aço foi escolhido pela sua facilidade de manuseio e disponibilidade (sem relevantes alterações para o projeto).

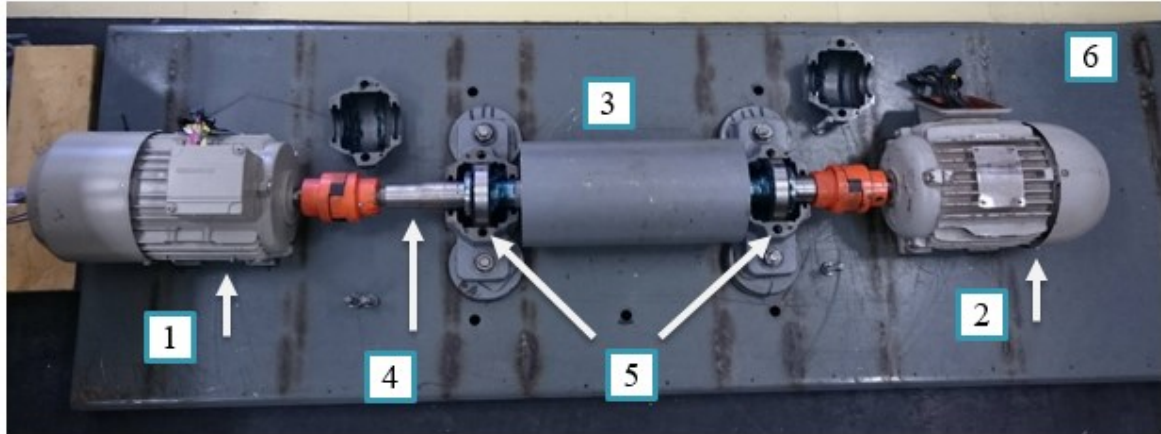
Na Tabela 4, permite-se notar os valores reais apresentados pelo rotor inercial.

Tabela 4 - Dados reais do volante inercial

| Momento de Inércia (kgm^2) | Massa (kg) | Comprimento (cm) | Diâmetro (cm) |
|--------------------------------|------------|------------------|---------------|
| 0,063377457 | 30 | 25 | 16,5 |

Fonte: Autoria Própria.

Por meio da Figura 14, temos a representação do volante inercial confeccionado, prestes a ser montado na base de sustentação.



Legenda 1 – Motor Siemens; 3 – Volante; 5 – Mancais e rolamentos;
2 – Motor Weg; 4 – Eixo; 6 – Base de sustentação.

Figura 14 – Montagem do volante.
Fonte: Autoria própria.

3.2. CÁLCULO DA BANCADA DE ACIONAMENTO

Depois da construção do sistema inercial, inicia-se o projeto e a construção de painel de acionamento que será a responsável por acionar, supervisionar e proteger a rede de alimentação, bem como os próprios motores trifásicos que pertencem ao conjunto inercial. Assim, tem-se a necessidade de se calcular condutores, fusíveis, contadores e relés para o bom desempenho do protótipo.

Basicamente, as partidas dos motores de indução serão efetuadas por meio da partida direta, mesmo sentido de rotação, com sistema preciso de análise de comportamento de tensão e corrente por efeito *Hall*, do MIT de quatro pólos, 1 cv.

3.2.1. Condutores de alimentação

No caso da bancada que possui dois motores trifásicos, Niskier (2008, p.182) determina que para o cálculo dos alimentadores deve-se levar em consideração algumas afirmações.

Dentre elas, a corrente do alimentador, dada pela Equação 9 e a corrente nominal do motor trifásico é calculada pela Equação 10.

$$I_{\text{alimentador}} \geq \sum_{i=1}^n FS_i * I_{n_i} \quad (9)$$

Onde: FS é o fator de serviço (determinado pelo fabricante);

I_n é a corrente nominal do motor.

$$I_n = \frac{736 * P}{\sqrt{3} * U * \cos\varphi * \eta} \quad (10)$$

Onde: η é o rendimento do motor (determinado pelo fabricante);

$\cos\varphi$ é o fator de potência (determinado pelo fabricante);

P é a potência em cavalo-vapor (cv);

U é a tensão de operação do motor.

Substituindo os dados encontrados nas equações 9 e 10, e resolvendo as operações matemáticas, encontram-se os respectivos valores na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultados de cálculo correntes nominais

| Dados | Motor Weg M1 | Motor Siemens M2 | $I_{n1 - M1}$ | $I_{n2 - M2}$ | $I_{\text{alimentador}}$ |
|---------------|-----------------|---------------------|---------------|---------------|--------------------------|
| η | 0,706 | 0,835 | 3,6 A | 5,61 A | 10,59 A |
| $\cos\varphi$ | 0,76 | 0,84 | | | |
| P | 1 cv | 2 cv | | | |
| U | 220 V | 220 V | | | |
| FS | 1,15 | 1,15 | | | |
| I_p/I_n | 6,1 | 7,5 | | | |
| I_p | 21,96 A | 42,07 A | | | |

Fonte: Autoria Própria.

Para o método de queda de tensão, de acordo com a Equação 11 e o método Ampères x Metro, dado pela Equação 12 para circuitos trifásicos, segundo Niskier (2008, p.183-184).

$$S = \frac{\sqrt{3} * \sum I * l}{u * 56} \quad (11)$$

$$I \times l \quad (12)$$

Onde: S é a seção do condutor em mm²;

I é a intensidade de corrente aparente em ampères;

l é o comprimento do trecho onde a corrente passa;

u é a queda de tensão absoluta em volts.

Nota 1: A Equação 11 refere-se exclusivamente para condutores de cobre.

Nota 2: Considera-se valor de 2% de queda entre o quadro geral até alimentadores e demais ramais. E 4% para o motor mais afastado.

Já para o método Ampère x metro, utiliza-se uma tabela proposta por Niskier (2008, p. 185), encontrada no Anexo A deste trabalho, pelo qual é possível determinar a seção pela máxima queda de tensão. Considerando ainda um incremento de 25% sobre o valor da corrente nominal.

$$I = 1,25 * (In1 + In2) = 11,51 A$$

$$I * l = 11,51 * 7 = 80,58 A$$

Entretanto, a ABNT NBR 5410 (2004), determina que para os circuitos de força a bitola mínima exigida é de 2,5 mm² para cobre. Logo conclui-se também que, para os demais circuitos alimentação, o condutor de 2,5 mm² atenderá perfeitamente as exigências da norma. Todavia, por questões de disponibilidade, escolheu-se o condutor de 4 mm² para energizar os equipamentos entre o quadro geral do laboratório até o ponto de entrada da bancada. Lembrando que a mesma NBR supracitada, afirma como capacidade de condução de corrente de 26 A para condutores de 2,5 mm² e 35 A para os de 4 mm², para circuitos de três condutores carregados instalados em eletrocalha, atendendo as necessidades elétricas da bancada de acionamento.

A Tabela 6, resume os resultados obtidos.

Tabela 6- Resultados da seção de condução

| | |
|--|-----------------------|
| Máxima distância entre os motores e o quadro geral | 7 m |
| Seção encontrada – Queda de tensão | 0,453 mm ² |
| Seção encontrada – Ampère x metro | 1,5 mm ² |
| Seção utilizada no trabalho – Alimentador | 4 mm ² |
| Seção utilizada no trabalho – motores | 2,5 mm ² |

Fonte: Autoria Própria.

3.2.2. Contatores, fusíveis e relé térmico

Após finalizado o cálculo da seção dos condutores elétricos, especificou-se contatores, fusíveis e relé térmico, para o bom desempenho e segurança da bancada de acionamento.

- Fusíveis

Os fusíveis são parte de um sistema imprescindível para a segurança do circuito pelo qual é instalado. Sua função é proteger o sistema de um eventual curto-circuito. O fusível aqui utilizado, é do tipo D (*Diazed*), amplamente difundido na indústria e em residências, com indicação de correntes nominais entre 2A à 63 A. A Figura 15, ilustra o fusível tipo D.

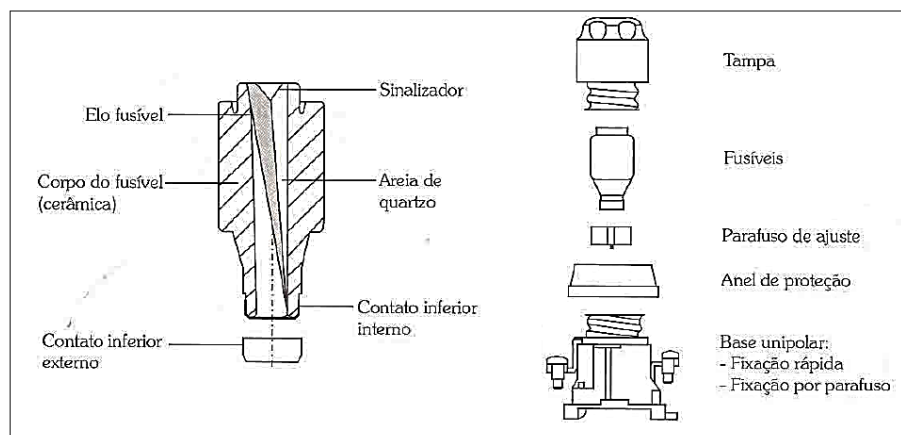


Figura 15 – Fusível tipo D (*Diazed*).
Fonte: Adaptado de Franchi (2008, p. 120-121).

O tipo D é constituído de fusível (substituível e possui a função de limitar a corrente acima da referência); Base (parte fixa de porcelana responsável pela entrada/saída de corrente e abriga os componentes de segurança D); a Tampa (cuja finalidade é de fixar o fusível a base); Anel de segurança (permite que não haja incidentes acidentais na troca do fusível); Parafuso de Ajuste (faz a união da entrada de energia para o fusível e impede o uso de fusíveis de capacidade de corrente superior à indicada) e por fim o Sinalizador (pelo qual permite-se averiguar se o fusível está em boas condições de trabalho ou deve ser repostado por outro em perfeitas condições de operação) (FRANCHI, 2008).

Para dimensionamento do fusível, foi necessário conhecer alguns aspectos importantes em relação aos motores trifásicos utilizados no protótipo (conforme Tabela 5). Franchi (2008, p. 123) afirma que no caso dos fusíveis retardados, deve-se levar em consideração o tempo de fusão virtual – significa que, durante a partida o fusível deve suportar sem se fundir, a corrente de partida do motor (I_p) no tempo que o motor requer para partir (T_p), dado por segundos ou menos que isso -; além disso, o fusível deve suportar uma corrente mínima até 20% acima da corrente nominal (Equação 13) e proteger os contadores e relés de carga (Equação 14).

$$I_{\text{Fusível}} = 1,2 \times I_n \quad (13)$$

$$I_{\text{Fusível}} \leq I_{\text{Fmáx}} \quad (14)$$

Levando-se em consideração dos dados dos motores de indução utilizados no trabalho e aplicando as respectivas equações acima descritas e com base na análise da curva característica do fusível tipo D, apresentada no Anexo B, conclui-se que os fusíveis mais indicados são:

- Fusível Tipo D de 10A para o Motor Weg;
 - Fusível Tipo D de 16A para o Motor Siemens.
-
- Relé térmico de sobrecarga

Os relés possuem lâminas bimetálicas que sofrem deflexão, quando uma corrente superior a especificada passa sobre as mesmas, interrompendo a circulação de corrente (NASCIMENTO; 2013, p. 39). No dimensionamento do relé, deve ser levado em conta a correta

inclusão da corrente nominal do motor na faixa de ajuste. Isto implica na regulagem das lâminas bimetálicas, que por sua vez, podem atuar fora do padrão de funcionamento adequado.

Franchi (2008, p. 132), afirma que o ajuste de corrente nos relés deve ser realizado entre 1,15 até $1,25 \times I_n$.

No caso de motores com fator de serviço igual ou superior a 115% ou motores com elevação de temperatura admissível de 40 °C, o ajuste pode ser até 125% da corrente nominal ($1,25 \times I_n$). Nos demais casos, os relés térmicos devem ser ajustados em 115% na corrente nominal ($1,15 \times I_n$). (FRANCHI; 2008, p. 132).

O dimensionamento do relé térmico, segundo Fergütz (2013, p. 3), determina que a corrente nominal do relé (I_{RT}) deva ser igual a 25% a mais da corrente nominal do motor (I_{NM}), de acordo com a Equação 15.

$$I_{NK} = 1,25 \times I_{NM} \quad (15)$$

Aplicando os dados respectivos dos motores (já explícitos anteriormente na equação acima) e de posse do catálogo de relés térmicos disponível pelo Anexo C, conclui-se que o relé de sobrecarga **RW17-1D**, permitirá o atendimento mínimo quanto as necessidades dos motores, haja visto a regulagem nas faixas de atuação do relé, em conformidade com a operação dos motores de indução. A Figura 16, ilustra um relé térmico de sobrecarga.



Figura 16 – Relé Térmico de sobrecarga mod. T16.

Fonte: Adaptado de ABB (2016).

- Faixa de ajuste: (4-6,3A) - Motor Weg
- Faixa de ajuste: (5,6-8A) - Motor Siemens

- Contator

Os contadores são instrumentos muito utilizados na indústria, principalmente na área de automatização, onde é empregado em infinitudes de sistemas elétricos. É caracterizado por uma chave de operação não manual, mas eletromagnética. Formado por contatos em seu interior, no instante que sua bobina é energizada, seus contatos normalmente fechados (NF) tornam-se abertos, o inverso acontece também quando seus contatos normalmente abertos (NA), tornam-se fechados. Todo este processo acontece, porque quando sua bobina é alimentada, um campo magnético envolve o núcleo de ferro para o interior da bobina, alterando o estado mecânico de seus contatos. Após a interrupção de energia para a bobina, uma mola é responsável por proporcionar o retorno dos contatos para sua posição de repouso. Para o dimensionamento, Fergütz (2013, p. 3), afirma que a corrente nominal do contator (I_{NK}) deva ser maior ou igual a 15% da corrente nominal do motor (I_{NM}), de acordo com a Equação 16.

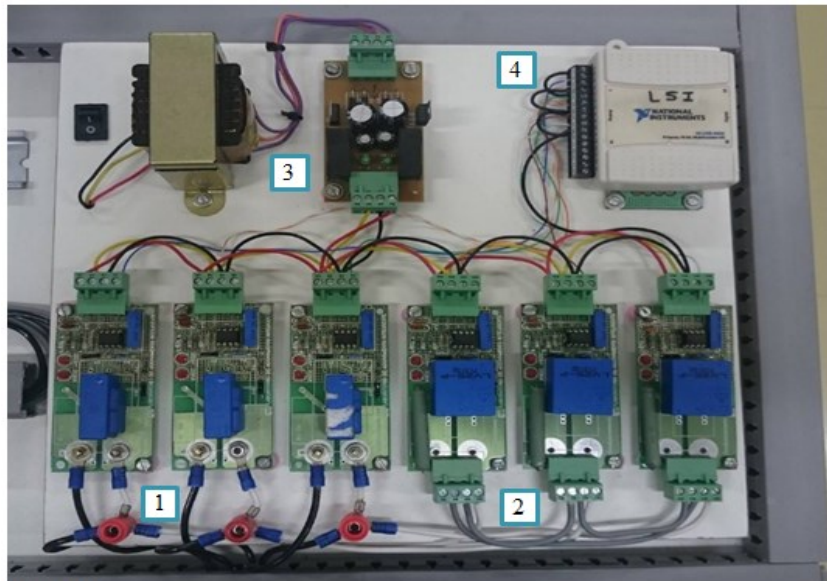
$$I_{NK} \geq 1,15 \times I_{NM} \quad (16)$$

De posse dos dados da Tabela 5, e aplicando-os na equação acima, chega-se à conclusão que, para ambos os motores trifásicos, um contator de até 7 A, seria a condição mínima para operação - de acordo com o catálogo de componentes da WEG, disponível no Anexo C, deste trabalho.

3.2.3. Sistema de medição

O sistema de medição é composto de um conjunto de alimentação, placa de aquisição de dados e sensores *Hall* de corrente e tensão. Todo este aparato possui a finalidade de coletar os dados elétricos do motor Weg (M1), quando o mesmo estiver sobre a influência mecânica do rotor inercial, bem como a do próprio motor de alta rotação (M2) da Siemens.

A Figura 17 ilustra o sistema de medição do protótipo.



Legenda

- | | |
|---|-------------------------|
| 1 - Tríplex conjunto de sensores <i>Hall</i> de corrente; | 3 - Fonte simétrica; |
| 2 - Tríplex conjunto de sensores <i>Hall</i> de tensão; | 4 - Placa de aquisição. |

Figura 17 – Sistema de medição.

Fonte: Autoria própria.

O conjunto de alimentação (fonte simétrica) é constituído de um transformador e um circuito de retificação, que permite a alimentação CA (220 Vac) seja transformada e retificada em pontos CC com 0V, -15V e +15V para a alimentação da placa de aquisição e sensores. Já os sensores *Hall*, possuem a função de captar as variações de tensão e corrente do motor WEG (M1), durante o processo de operação do conjunto inercial e transformar os dados em sinal digital para que sejam enviados diretamente a placa de aquisição da *National Instruments* (modelo NI USB-6009). Os sensores de corrente encontram-se na parte inferior esquerda (um para cada fase), enquanto os sensores de tensão na parte inferior direita da Figura 17. A placa de aquisição, possui a finalidade de fazer a interface entre computador e protótipo, proporcionado a viabilidade de se averiguar os dados captados em *software* específico, de forma a dar tangibilidade e clareza dos resultados obtidos.

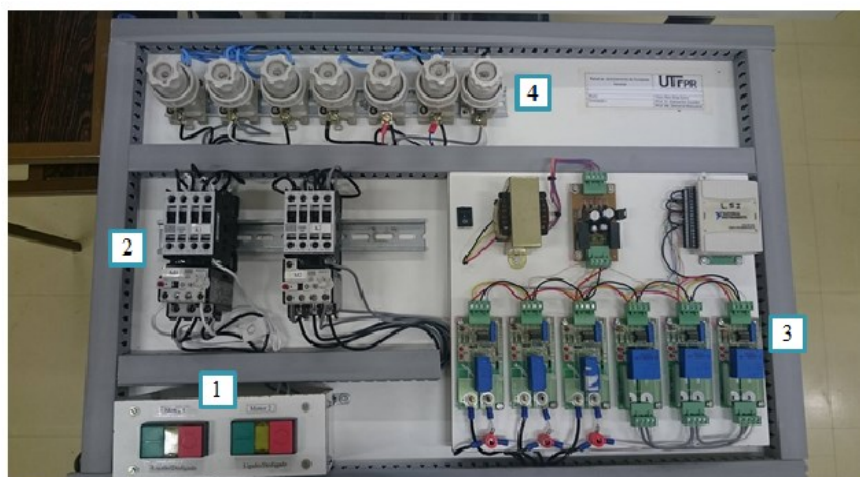
3.2.4. Resumo – Componentes elétricos da bancada inercial

A Tabela 7 descreve os materiais elétricos que foram utilizados na construção do painel de acionamento da bancada inercial. Apesar de todo efetivo de cálculo para os elementos, houve-se a necessidade de se adequar o aspecto construtivo do painel com a disponibilidade de materiais do Laboratório de Sistemas Inteligentes, pelo qual, este projeto encontra-se subordinado. Assim, os cálculos demonstrativos atestam para condições mínimas de operação, o que não interfere na possibilidade de valer-se de elementos com capacidade de trabalho superior a estas condições, respeitando sempre a operabilidade e a segurança em geral. A Figura 18 ilustra a estrutura elétrica (painel) finalizada da bancada inercial.

Tabela 7 - Resultados - construção da bancada de acionamento

| <u>Descrição</u> | <u>Motor Weg</u> | <u>Motor Siemens</u> |
|-------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
| Condutores de alimentação - bancada | 4 mm ² | 4 mm ² |
| Condutores de alimentação - motores | 2,5 mm ² | 2,5 mm ² |
| Fusíveis | 10 A | 16 A |
| Relé de Sobrecarga | Mod. RW27 Faixas 4 – 6,3 A | Mod. RW27 Faixas 5,6 – 8 A |
| Contator | CW09 | CW09 |

Fonte: Autoria própria.



Legenda

- 1 – Botões de acionamento;
- 2 – Conjunto contator/relé de sobrecarga;
- 3 – Sistema de medição;
- 4 – Fusíveis de proteção (M1, M2 e circuito de comando).

Figura 18 – Bancada de acionamento.

Fonte: Autoria própria.

3.3. CHAPA DE AÇO

Com a montagem do volante inercial acoplado aos dois motores de indução sobre a base de sustentação, durante o processo de teste, verificou-se que apesar de terem sido tomadas todas as providências como alinhamento dos eixos e a utilização de mecanismos anti-choque, era inviável dar continuidade ao projeto por apresentar vibrações de grau considerado, comprometendo a própria pesquisa no futuro. Para mais detalhes e aprofundamento da análise de vibração, podem ser obtidas no Anexo D deste trabalho. A Figura 19, ilustra os reforços realizados na base de sustentação.

Apesar das mudanças efetuadas na base de sustentação, como podem ser demonstradas pela Figura 19, verificou-se a necessidade de balanceamento do volante inercial. Assim, o volante foi encaminhado a empresa, denominada HIDRAUFORT, na cidade de Cornélio Procópio, para proceder o balanceamento.



**Figura 19 – Modificações na base de sustentação.
Fonte: Autoria própria.**

3.4. FINALIZAÇÃO CONSTRUTIVA

Depois de adequações no projeto inercial, já não havia indícios que às vibrações expressivas do protótipo em funcionamento pudessem causar danos ou interferir no prosseguimento da pesquisa. Resolvidos todos os empasses, a estrutura de motores e rotor inercial foi montada, juntamente com a capa de proteção sobre o rotor, para inserção de

segurança adicional na operação ao sistema. A Figura 20, mostra o conjunto inercial já finalizado e pronto para operação.

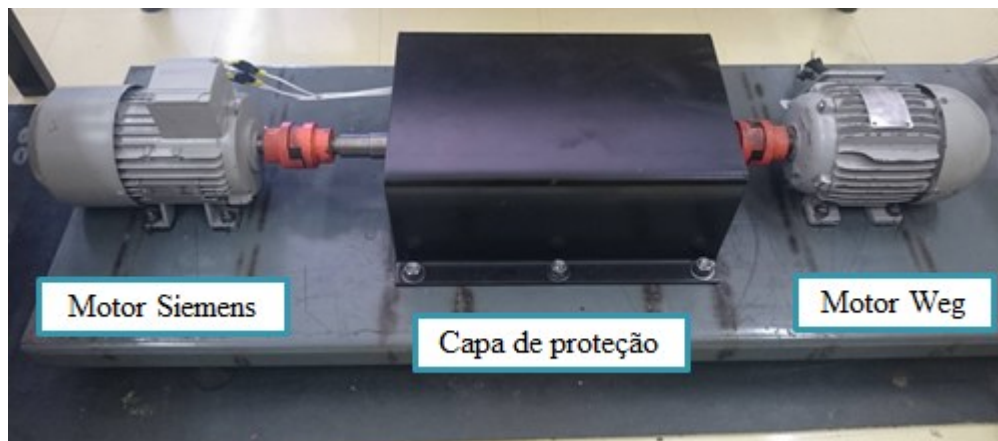


Figura 20 – Protótipo finalizado.
Fonte: Autoria própria.

3.5. ACIONAMENTOS DE CARGAS COM ALTO TEOR INERCIAL

Grande parte da literatura acadêmica aborda os sistemas conservativos de energia misto com diversas fontes alternativas e armazenamento, muitas vezes denominado de *flywheels*. Apesar deste trabalho obter margem de estudos para o campo de conservação de energia, o foco está voltado para a linha de acionamento de carga com alta inércia.

Quando existe a necessidade de partir uma carga mecânica, primeiramente devem ser respeitados alguns aspectos importantes, entre eles a corrente, tensão e torque. Mas, quando se exige muito do motor, consequentes danos podem ser causados, entre eles o sobreaquecimento do motor (perdas por efeito Joule no rotor ($I^2 \times R$)), queda de tensão na linha e alta demanda de corrente da linha, que por muitas vezes, devem ser respeitadas as normas da concessionária de energia.

O tempo de aceleração da carga é inversamente proporcional ao torque de aceleração, ou seja, quanto maior o torque, menor o tempo para atingir a aceleração completa do sistema. Por sua vez, quando o torque de aceleração for menor, maior será o tempo para se chegar a velocidade de operação. Logo, é de grande importância recorrer a metodologias de partida que se enquadrem as necessidades da partida em questão.

Rockweel Automation (1998, p. 4-11), afirma aspectos importantes (abaixo) sobre os principais mecanismos de acionamentos aqui abordados em relação as cargas com alto teor inercial.

- Partida direta

Acionando-se uma carga pesada pelo método da partida direta, ocorre que pela própria demora de aceleração acarretada, é exigido por si só sistemas de proteção e fiação mais robustos, devido a corrente de partida geralmente entorno de 6-8 vezes maior que a corrente nominal. Entretanto, caso o motor também se encontre longe do sistema de alimentação, os cabos alimentadores devem suportar este tempo requerido com grandes fluxos de corrente. Outro ponto a se observar é a questão mecânica envolvida, pois caso a característica da partida não seja compatível com o grau de exigência mecânica, danos podem ocorrer em caixas de engrenagens ou sistemas de transmissão e similares (Rockweel Automation, 1998).

- Estrela-delta

O método estrela-delta é muito indicado para sistemas que requerem elevado tempo de partida. Entretanto, seus pontos negativos encontram-se na questão de custos que devem ser levados em consideração caso a caso, pois necessita de sistema de acionamento realizados por contadores; além disso, durante a transição entre os estados, podem ocorrer picos de tensão e por consequência causar algum dano ao sistema elétrico. Possui, porém, apenas duas opções de torque na partida (600% ou a 33%) (Rockweel Automation, 1998).

- Autotransformador

Em relação a partida com autotransformador, é um método que oferece determinadas características interessantes quanto as cargas de alto teor inercial. Permite que a partida não seja limitada pelas imposições da concessionária (normas), devida a propriedade de relação amperes-espiras do transformador, porém o conjugado é limitado pelas características de tensão de seus respectivos *taps*. Infelizmente, também possui a necessidade de realizar a transição de tensão durante a partida, ocasionando picos de correntes que podem comprometer o sistema elétrico inserido, mas existem meios para redução dessa problemática, entretanto possuem custo

para tal tratamento. Sobre as cargas inerciais, possui a vantagem de ser utilizada em qualquer estilo de motor e fornece mais torque por corrente na linha de entrada. As desvantagens são consideradas pelo custo em relação a outras formas de acionamento por tensão reduzida; o tamanho físico disponibilizado e geralmente é sobredimensionado afim de não sofrer danos térmicos pelo tempo de partida requerido pelo motor (Rockweel Automation, 1998).

- *Soft-starters*

As *soft-starters* permitem um acionamento suave e redução de tensão no instante da partida. Quando se utiliza este método para se partir uma carga com alta inércia, a primeira coisa a se fazer é limitar a quantidade de corrente para o motor, isso significa que pode-se proporcionar características desejadas na partida, semelhantes a outros métodos, sem, no entanto, expor o motor à riscos. Não apenas isso, mas este dispositivo oferece facilidades quanto a supervisão de eventual perda de fase ou proteção, bem como mecanismos de economia energética. Dentre as vantagens já mencionadas, existem ainda a inexistência de corrente de pico de transição (efeitos encontrados em outros métodos de redução de tensão); o preço assemelha-se a outros métodos de partida, quando utilizado em motores com alta potência; utilização em conjunto com outros sistemas de acionamento e escolha do tempo de partida da carga. Em contrapartida, requer mais corrente de linha para obter toque equivalente a outras metodologias de partida (Rockweel Automation, 1998).

- Inversores de frequência

Por fim, os inversores de frequência que dominam o controle de velocidade e torque dos motores de indução, possuem características importantes em relação as cargas com elevado teor inercial, são elas: flexibilidade e bom desempenho do toque; controle preciso de aceleração e requer menos corrente de linha do que as *soft-starters*. Infelizmente, o preço é um fator importante, pois é relativamente maior em relação a outros métodos; também existe possibilidade da criação de harmônicos por alguns exemplares, acima dos limites estabelecidos pela rede. Quando utilizado a tecnologia IGBT, existe o risco de criar harmônicos de alta frequência, que pode ocasionar danos a motores menos sofisticados e a sistema de alimentação dos mesmos (Rockweel Automation, 1998).

Apesar de existir a necessidade da realização de maiores estudos na área de acionamentos de cargas com alto teor inercial, alguns trabalhos, como o de McElveen (2001, p. 144), pelo qual afirma que, embora podem se encontrar vários métodos de partida disponíveis no mercado para utilização com cargas de elevada inércia, fatores como o aquecimento do motor, tempo de aceleração, e custo devem ser considerados na escolha do motor apropriado em referência a carga inercial a ser acionada. Além disso, o autor ainda conclui que as *soft-starters* são uma excelente opção para iniciar aplicações de carga de alta inércia quando algum tipo de redução da tensão ou corrente é necessária.

3.6. CALIBRAÇÃO DOS SENSORES

Nesta etapa, é feita a averiguação das medidas de tensão e corrente coletadas. É de fundamental importância que todos os meios de captação estejam calibrados para que o resultado final não receba interferências internas e externas, comprometendo assim todo trabalho desenvolvido.

No entanto, para se iniciar este processo, é relevante que se saiba as medidas reais de tensões e correntes de M1, para que sejam adaptadas as equações do *Matlab*, permitindo uma fidelidade maior dos dados lidos pela placa de aquisição. A Tabela 8, ilustra os respectivos valores de ganhos de tensão e corrente utilizados para aproximação real de resultados. Essas constantes são proporções entre dados obtidos pelo *Matlab* e osciloscópio.

Tabela 8 - Ganhos das variáveis elétricas.

| Vab | Vbc | Vca | Ia | Ib | Ic |
|---------|---------|---------|-------|--------|--------|
| 46,82 V | 48,15 V | 45,91 V | 5,3 A | 5,71 A | 5,14 A |

Fonte: Autoria própria.

A Figura 21, mostra a tensão V_{ab} apresentada pelo osciloscópio.

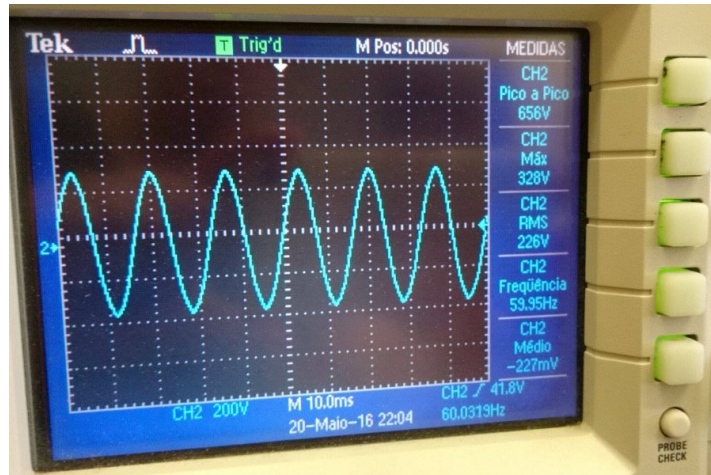


Figura 21- Tensão V_{ab} .
Fonte: Autoria Própria.

Já a Figura 22, temos como exemplo a ilustração da corrente de linha I_a .

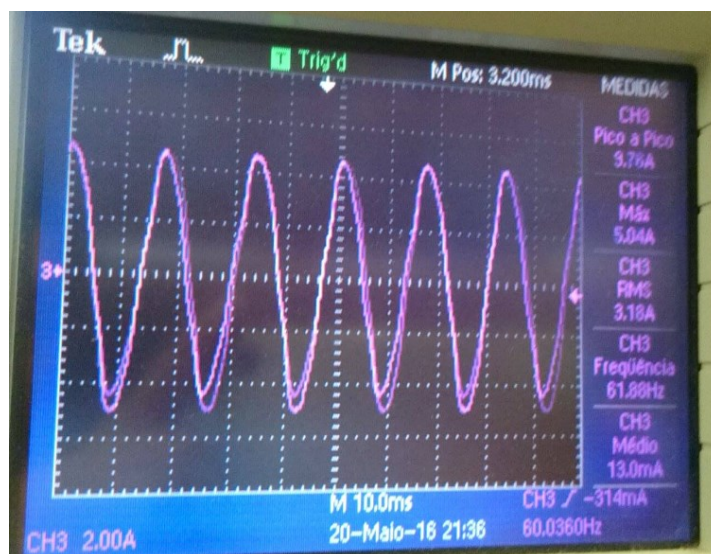


Figura 22- Corrente I_a .
Fonte: Autoria Própria.

3.7. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

O processo de coleta de dados passa por dois processos de partida. No primeiro, os resultados serão obtidos do acionamento de M2 através do inversor de frequência. Já o segundo

processo, se distingue pela partida direta de ambos motores pela rede de energia. Esses dois métodos de partida serão averiguados e comparados entre si. A Figura 23 exemplifica o mecanismo de aquisição de dados pelo inversor de frequência.

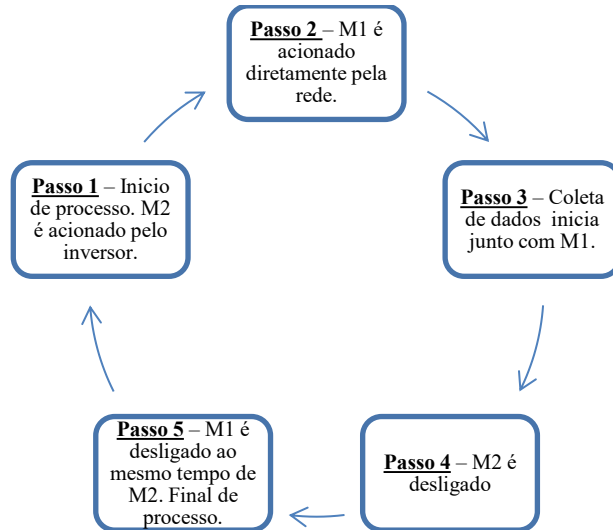


Figura 23 – Processo coleta de dados pelo inversor de freq.
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 24 ilustra o processo de coleta de dados através da partida direta.

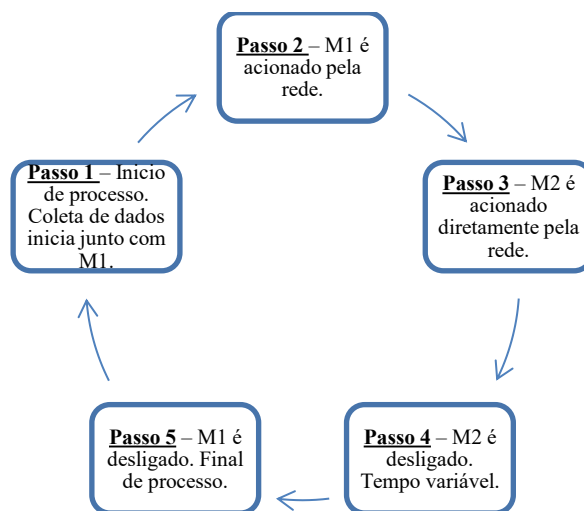


Figura 24 – Processo coleta de dados em partida direta.
Fonte: Autoria Própria.

3.7.1. Inversor de frequência – 50%

Com 30 Hz, M2 consegue atingir uma velocidade muito próxima acima da velocidade síncrona de M1, em torno de 1800 RPM. Isso é importante porque é a partir deste intervalo de velocidade que se conseguirá observar o comportamento de M1 operando como gerador e em consequência, a influência inercial que o volante pode proporcionar a M1. A Figura 25, ilustra o comportamento obtido do protótipo na situação supracitada. Na referida figura, encontram-se todas as correntes e tensões de M1. Na Figura 26 tem-se a ilustração da tensão V_{ab} (a) e a corrente I_a (b) para efeito de comparações com diferenciação das demais variáveis.

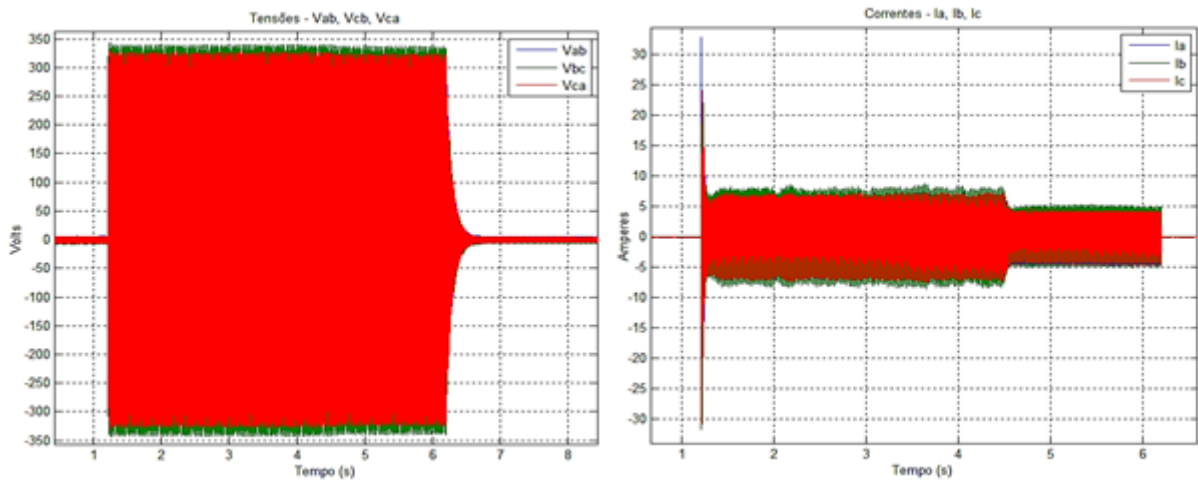


Figura 25- Variáveis de M1 – 50% frequência em M2.

Fonte: Autoria Própria.

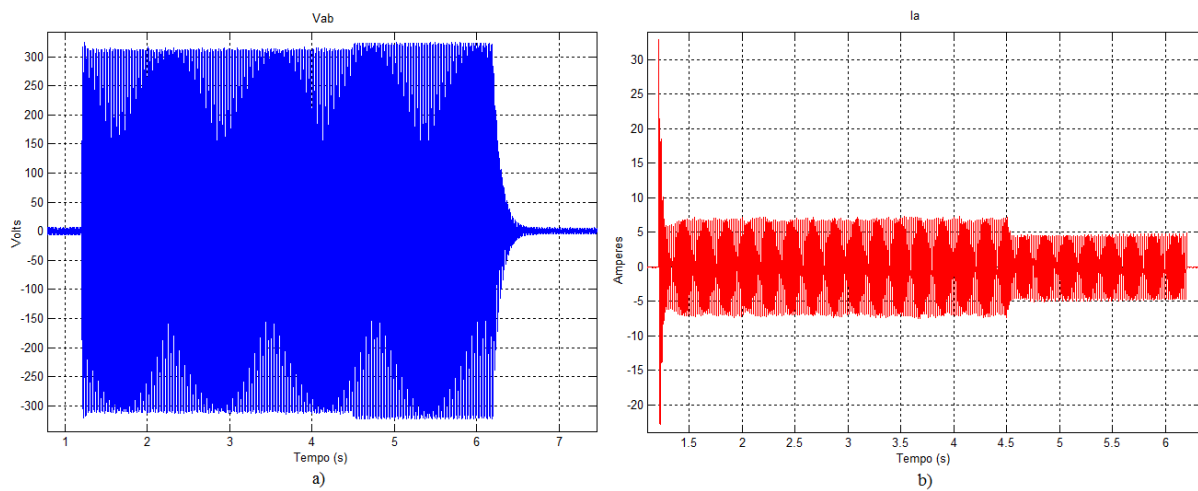


Figura 26- V_{ab} e I_a – 50% frequência em M2.

Fonte: Autoria Própria.

Pelas figuras 25 e 26, nota-se que a corrente possui uma resposta mais rápida quanto a tensão (exige mais tempo para se recompor ao estado inicial). Também fica nítido o momento em que a máquina de indução (M1) muda seu estado de operação, ora como gerador (tensão baixa e corrente alta), ora como motor (inverso das características como gerador). Sua inversão de trabalho acontece no tempo de 4.5s. Antes desse tempo a máquina parte e atua como gerador, após 4.5s seu estado muda de gerador para motor. Durante a partida, a corrente I_a chega ao valor de 32,93 A. A Tabela 9 explicita os valores de pico de tensão e corrente em ambas situações de operação de M1.

Tabela 9 – Dados comparativos – 50% frequência em M2.

| Motor | | | Gerador | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Vab | 323,9 V | 5,022 s | Vab | 315,1 V | 3,088 s |
| Ia | 4,325 A | 5,016 s | Ia | 7,221 A | 3,084 s |

Fonte: Autoria própria.

3.7.2. Inversor de frequência – 70%

Com 70% da frequência (42 Hz) aplicado em M2, mesmo partindo antes de M1, nota-se que em razão ao comportamento de gerador, o incremento de corrente proporciona o decréscimo de tensão em M1. A inversão de funcionamento acontece no instante 27.78s, antes desse período M1 opera como gerador, logo, depois desse tempo, M1 passa a operar como motor. A Figura 27, esboça os resultados obtidos de Vab (a) e Ia (b).

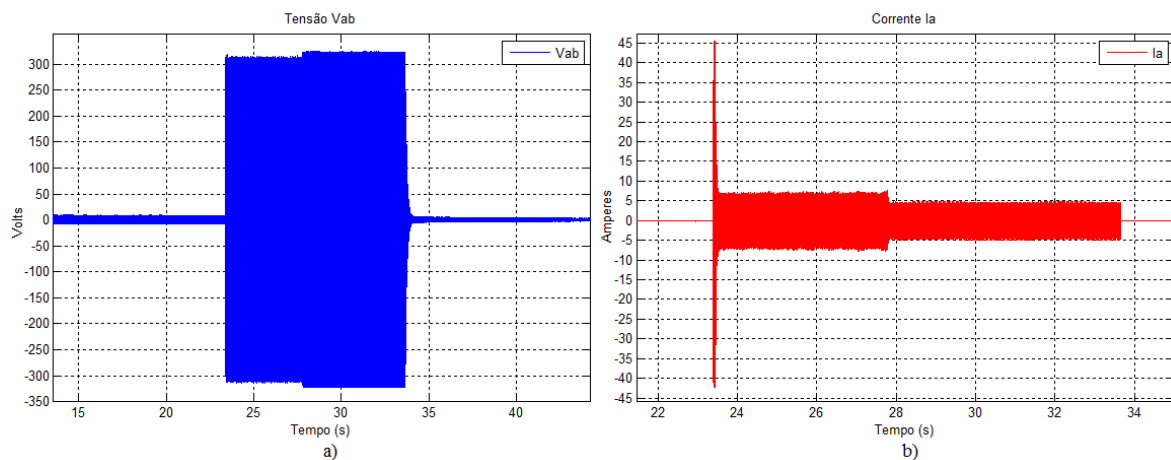


Figura 27- Vab e Ia – 70% frequência em M2.

Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 10 é possível observar os dados de pico de V_{ab} e I_a nas diferentes configurações de operação. A corrente de partida I_a chega ao valor de 45,38 A.

Tabela 10 – Dados comparativos – 70% frequência em M2.

| Motor | | | Gerador | | |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| V_{ab} | 323,3 V | 30,85 s | V_{ab} | 312,3 V | 26,11 s |
| I_a | 4,487 A | 30,37 s | I_a | 7,292 A | 26,11 s |

Fonte: Autoria própria.

Pela Figura 28 é possível identificar o momento de transição entre os estados de operação de M1. Observe que no momento em que M2 é retirado do sistema (desligado), há a ocorrência de uma leve inclinação na corrente de M1, fruto da energia cinética acumulada do volante inercial e transferida para M1.

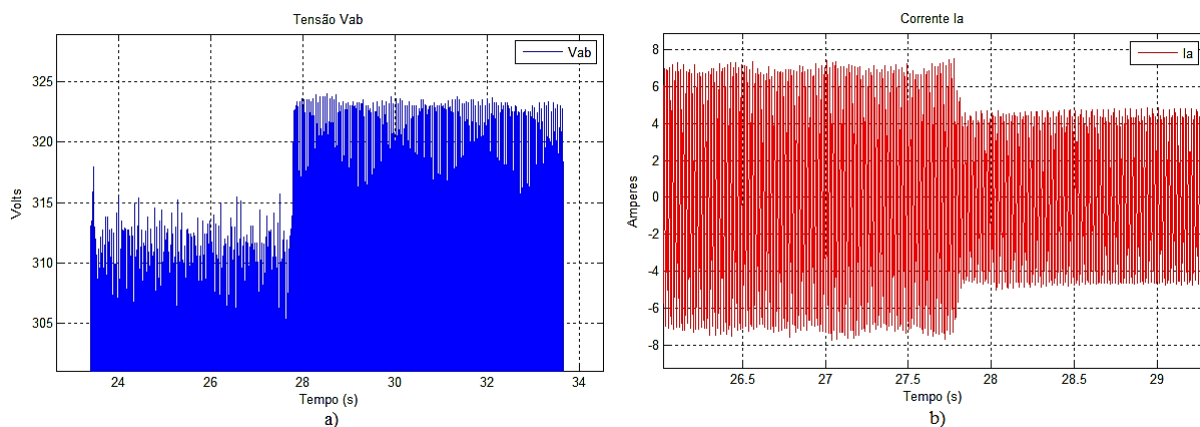


Figura 28- V_{ab} e I_a (ampliado) – 70% frequência em M2.

Fonte: Autoria Própria.

3.7.3. Inversor de frequência – 100%

Os resultados desta nova configuração podem ser observados pela Figura 29. Note que graficamente não existem muitas alterações das demais configurações, entretanto o que as diferencia são os valores das grandezas de corrente (aumenta) e tensão (diminui) com o incremento da frequência – consequente aumento de velocidade no eixo de M2.

A Figura 29 esboça a tensão V_{ab} e I_a nesta configuração do inversor.

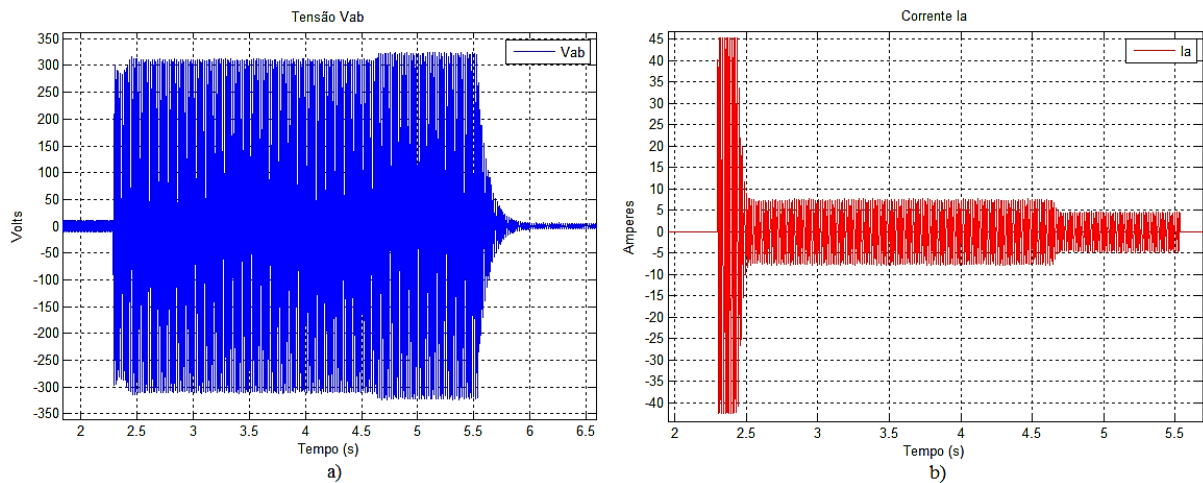


Figura 29- Análise de resultado (V_{ab} e I_a) – 100% frequência em M2.
Fonte: Autoria Própria.

Na Tabela 11 tem-se os valores de tensão e corrente medidos durante a realização do teste. Durante a partida, a corrente I_a obteve o maior valor dentre as demais configurações utilizando o inversor de frequência, conseguindo atingir pico de 45,41 A.

Tabela 11 – Dados comparativos – 100% frequência em M2.

| Motor | | | Gerador | | |
|----------|---------|---------|----------|---------|---------|
| V_{ab} | 322,9 | 5,205 s | V_{ab} | 309,2 V | 3,772 s |
| I_a | 4,568 A | 5,149 s | I_a | 7,7 A | 3,768 s |

Fonte: Autoria própria.

3.7.4. Partida direta

Nesta etapa, o comportamento do volante inercial será avaliado através do acionamento direto dos motores que compõem o conjunto inercial. O processo é relativamente simples, M1 é acionado, e sucessivamente depois, M2 é inserido repentinamente no sistema por diversas vezes. Essa metodologia utilizada não causa complicações ao sistema, pelo contrário, permite averiguar repetidas vezes a transição de operação em M1.

A Figura 30, ilustra a representação das tensões (a) e das correntes (b) de M1.

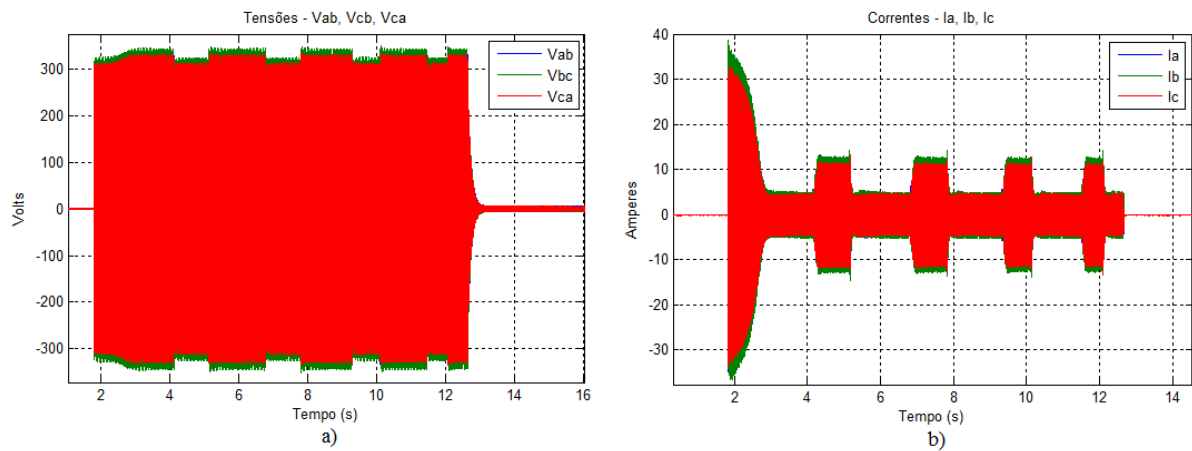


Figura 30- Análise de resultado (tensões e correntes) – Partida direta.
Fonte: Autoria Própria.

Pela Figura 31, tem-se o comportamento de Vab e Ia. Note que M2 é inserido quatro vezes no sistema. A corrente de partida Ia atinge 33,8 A.

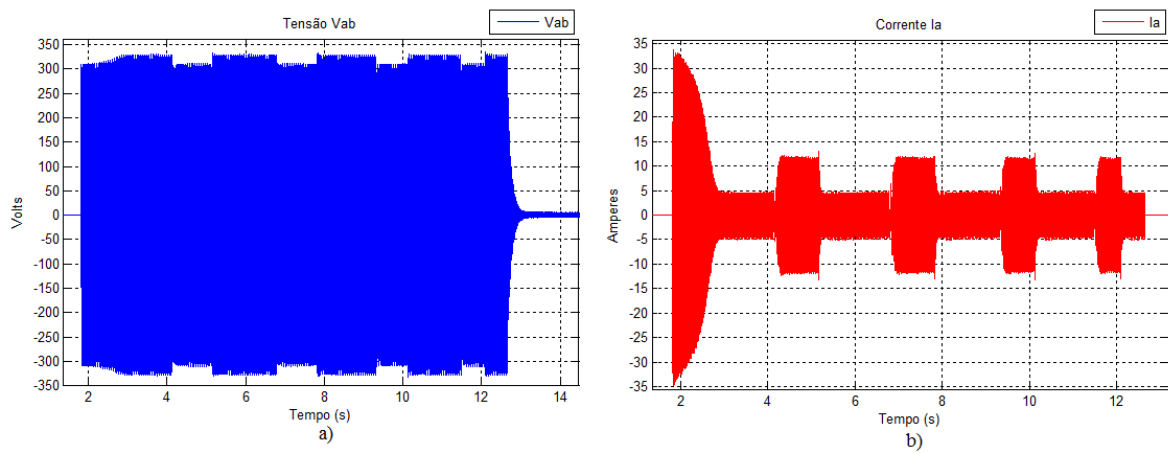


Figura 31- Análise de resultado (Vab e Ia) – Partida direta.
Fonte: Autoria Própria.

A Tabela 12 exemplifica numericamente os resultados obtidos pela partida direta.

Tabela 12 – Dados comparativos – Partida direta.

| Motor | | | Gerador | | |
|-------|---------|---------|---------|---------|---------|
| Vab | 329.6 | 6 s | Vab | 307,1 V | 4,141 s |
| Ia | 4,623 A | 6,063 s | Ia | 12,14 A | 4,383 s |

Fonte: Autoria própria.

3.7.5. Tempo

É importante se conhecer sobre a contribuição que o volante inercial tem a oferecer ao sistema pelo qual está inserido. Em base disso, procurou-se observar qual o impacto proporcionado pelo volante inercial sendo acionado por M1 e M2 diretamente. Assim, medições foram efetuadas de forma a estimar o tempo de inicialização do volante até seu estado final de repouso. A Figura 32 ilustra a tensão Vab, quando M1 é acionado diretamente (sozinho no sistema). Pela Tabela 13, tem-se o comparativo de dados desde o acionamento até o estado de repouso da máquina citada.

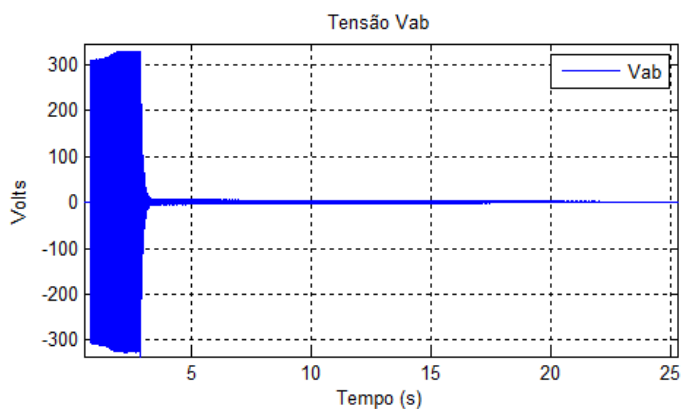


Figura 32- Estimativa tempo - M1.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 13 – Estimativa – Motor Weg.

| Início | Atinge regime | Termina regime | Final | Tempo estimado |
|----------|---------------|----------------|---------|----------------|
| 309,7 V | 325,7 V | 324,9 V | 1,09 V | 23,4435 s |
| 0,8165 s | 1,9 s | 2,9 s | 25,26 s | |

Fonte: Autoria própria.

Para estimar a contribuição de M2 sobre o volante, é necessário que se conheça a tensão induzida em M1; isso acontece porque o sistema de medição supervisiona apenas as variáveis de M1, logo a busca dessa tensão induzida é um meio concreto de observar o comportamento de M2 refletido nos terminais de M1. A Figura 33 esboça a tensão induzida produzida em M1. Observe pela Tabela 14, os valores encontrados neste experimento.

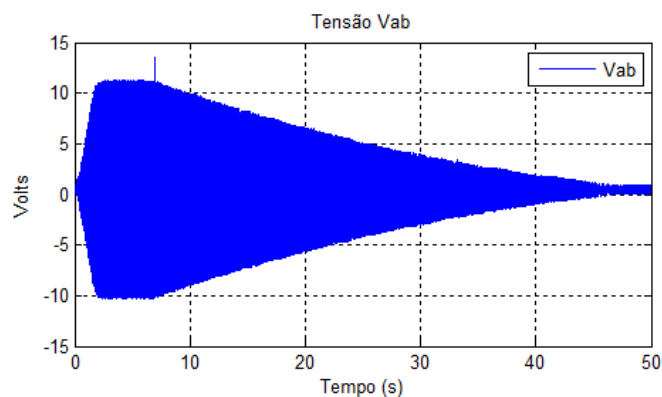


Figura 33- Estimativa tempo – M2.

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 14 – Estimativa – Motor Siemens.

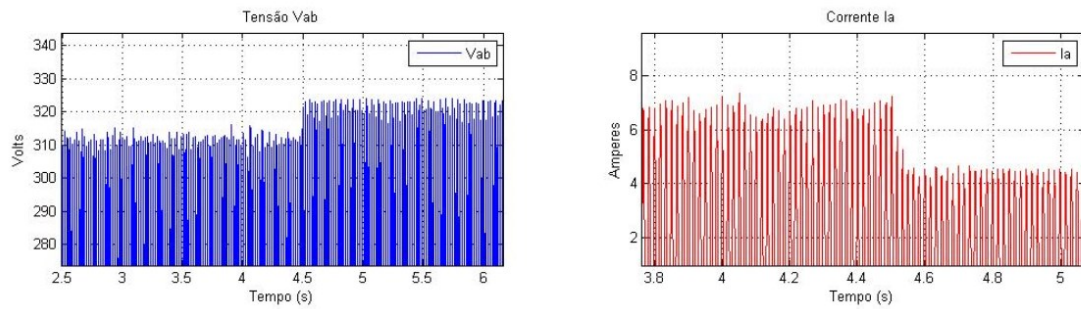
| Início | Atinge regime | Termina regime | Final | Tempo estimado |
|----------|---------------|----------------|---------|----------------|
| 0,8568 V | 11,02 V | 11,14 V | 1,096 V | 41,08 s |
| 0,008 s | 2,022 s | 7,174 s | 46,24 s | |

Fonte: Autoria própria.

3.7.6. Conclusão dos resultados

Pelos dados obtidos nas diferentes configurações de acionamentos pelo inversor, verifica-se uma correlação entre aumento de corrente e decréscimo de tensão em M1, conforme a velocidade no eixo entregue por M2 segue em aumento. No entanto, quando o acionamento pela partida direta foi realizado, os dados se mostraram diferentes quando se comparado ao inversor com total frequência aplicado em M2. É possível concluir que este efeito se deve as próprias características que a partida direta oferece ao motor de indução, mas também quanto as limitações da partida impostas pelo inversor de frequência ao motor Siemens e, consequentemente, estas limitações influenciaram diretamente o motor de baixa rotação (M1).

Além disso, ressalta-se a ação do volante inercial como um recurso promissor para armazenamento e reaproveitamento energético. Isso se deve ao fato de que o volante quando acionado, contribui para a transformação da energia cinética em energia elétrica. Este efeito ficou comprovado nas medições de tempo em alta e baixa rotações do volante. Quanto maior a velocidade, maior o tempo para dissipar toda energia e entrar em repouso. Entretanto este fato também foi verificado instantaneamente entre as mudanças de estado de M1 (motor/gerador) através de determinada inclinação nas ondas de tensão e corrente, conforme Figura 34.



**Figura 34- Período de transição entre estados – 50% frequência em M2.
Fonte: Autoria Própria.**

4. CONCLUSÃO

Conclui-se que os objetivos gerais e específicos deste trabalho foram alcançados com sucesso. Por meio dos resultados, foi possível obter um panorama quanto ao comportamento elétrico e mecânico do volante inercial quando o mesmo é acionado por diferentes formas de acionamento, no caso, por meio do inversor de frequência e pela partida direta. Em relação as variáveis elétricas, ficou em evidencia a diferença de dados entre tensão e corrente tanto pelo inversor, quanto pela partida direta. Nesta última, quando M1 atuava como gerador, o valor da corrente foi o maior registrado e por consequência, a tensão foi a menor dentre os demais testes efetuados pelo inversor. Também foi observado que as grandezas elétricas de M1, quando o mesmo passa a atuar como motor, foram superiores em relação aos demais situações relatadas utilizando-se o inversor de frequência.

Quanto as grandezas mecânicas e físicas, o projeto se mostrou seguro, versátil e dentro das expectativas do grupo de pesquisa. O sistema de comando dos motores de indução revelou-se robusto, eficaz e dentro dos padrões de segurança exigidos pelas normas regulamentadoras. Além disso, o mecanismo de medição foi totalmente ajustado e cuidado para que os dados apanhados obtivessem o maior nível de confiabilidade possível.

Em relação a perspectiva de armazenamento e reaproveitamento energético, foi permitido concluir que o volante é de fato uma alternativa de armazenamento energético e possui sim características interessantes quanto a transformação da energia cinética do rotor em energia elétrica para a rede. Mas não apenas isso, o protótipo em si demonstrou a possibilidade de realizar estudos mais aprofundados sobre o comportamento do motor de indução, como também pesquisas sobre magnetismo remanescente e análise de vibrações.

Contudo, ressalta-se que esta contribuição permitirá a abertura de novos campos de estudos direcionados principalmente para as áreas de acionamentos elétricos e regeneração energética. Além disso, o protótipo mostrou-se uma ferramenta de pesquisa didático pedagógica poderosa, de fácil manuseio e interpretação, podendo ser utilizada nas ministrações das disciplinas de máquinas e acionamentos elétricos dos cursos de engenharia e pós-graduação da instituição.

4.1. Trabalhos futuros

Observa-se que o protótipo propicia a abertura de novos campos de pesquisa, mas além disso, permite que estudos mais aprofundados e direcionados sejam efetuados futuramente. A seguir, algumas sugestões.

- Análise partida direta do MIT;
- Análise partida direta e demais acionamentos com elevada carga - MIT;
- Magnetismo remanescente do conjunto de bobinas;
- Análise de vibrações;
- Reaproveitamento energético, entre outras demais opções de pesquisa.

REFERÊNCIAS

ABB. **Thermal overload relays**. Disponível em: <<http://new.abb.com/low-voltage/products/motor-protection/3-pole-contactors-and-overload-relays-for-motor-starting/thermal-overload-relays>>. Acesso em: 03 maio 2016.

ABNT NBR 5410. **Norma brasileira: Instalações elétricas de baixa tensão**. 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

AUGUSTO JÚNIOR, Norberto. Motores Trifásicos de Indução: Dimensionamento. **Revista Integração**, n. 42, pp. 243-250, set. 2005.

BONNETT, A.; YUNG, C. Increased efficiency versus increased reliability, **IEEE Industry Applications Magazine**, v. 14, n. 1, pp. 29-36, jan. 2008.

BRITO, Claudio M. Cavalcanti de. Modelagem computacional de métodos de partida de um motor de indução trifásico no simulink/matlab. **II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica**. João Pessoa, p. 01-10, 2007.

BRUNA, Breno P. Dela et al. Estudo de acionamentos das chaves de partidas elétricas e eletrônicas para motores elétricos. **Revista Técnico Científica (IFSC): 1º Simpósio de Integração Científica e Tecnológica do Sul Catarinense**. Criciúma, v.3, n.1, p. 504- 512, 2012.

CASTRO, Alexandre César de. **Motor de indução trifásico**. Disponível em: <<http://www.ifba.edu.br/professores/castro/MIT.pdf>>. Acesso em: 05 maio 2016.

CHAPMAN, S. J. **Fundamentos de máquinas elétricas**. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2013.

CUNHA, José Paulo V. Soares da. **Modelagem do motor de indução**. Disponível em: <<http://www.lee.eng.uerj.br/~jpaulo/Controle-Maquinas-Eletricas/Modelagem-do-motor-de-inducao.pdf>>. Acesso em: 10 maio. 2016.

DIAS, J. L. P. C; LOBOSCO, O. S. **Motores Elétricos: Seleção e Aplicação**. São Paulo: Editora McGraw-Hill, v. 1, 1988.

ENDALÉCIO, Alan Dantas de Medeiros. **Levitação Eletromagnética Utilizando Sensores de Efeito Hall**. 2013. 69 f. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2013.

FERGÜTZ, Marcos. **Dimensionamento de componentes I**. Disponível em: <http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/fergutz/materiais/DIMENSIONAMENTO_DE_COMPONENTES_I_v02_13.pdf>. Acessado em: 04 maio 2016.

FITZGERALD, A. E.; KINGSLEY, C. Jr.; UMANS, S. D. **Máquinas elétricas**. 6 ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2006.

FRANCHI, C. M. **Acionamentos elétricos**. 4. ed. São Paulo: Editora Erica Ltda, 2008.

GODOY, Wagner Fontes; SILVA, Ivan Nunes da; GOEDEL, Alessandro; PALÁCIOS, Rodrigo Henrique Cunha. A comprehensive evaluation of intelligent classifiers for fault identification in three-phase induction motors. **Applied Soft Computing**, v. 32, pp. 420-431, 2015.

GOEDEL, Alessandro; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, Paulo J. Amaral. Load torque identification in induction motor using neural networks technique. **Electric Power Systems Research**, v. 77, pp. 35-45, 2007.

GOEDEL, Alessandro; SILVA, Ivan Nunes da; SERNI, Paulo J. Amaral; SUETAKE, Marcelo; FRANCISCO DO NASCIMENTO, Claudionor; AUGUSTO OLIVEIRA DA SILVA, Sergio. Speed Estimation for Induction Motor Using Neural Networks Method. **IEEE Latin America Transactions**, v. 11, n° 2, pp. 768-778, 2013.

HIBBELER, Russell Charles. **Estática: mecânica para engenharia**. 12. ed. São Paulo: Editora Pearson Prentice Hall, 2011.

IF-UFRGS. **Sensor Hall**. Disponível em: <http://cta.if.ufrgs.br/projects/instrumentacao-fisica/wiki/Magnet%C3%B4metro_-_Funcionamento?version=8>. Acesso em: 14 abril 2016.

KOSOW, Irving L. **Máquinas elétricas e transformadores**. 15 ed. São Paulo: Editora Globo, 2005.

MAMEDE FILHO, J. **Instalações elétricas industriais**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

MARGIRIUS. **Chave Estrela-Triângulo**. Disponível em: <<http://www.margirius.com.br/chave-estrela-triangulo-30a-cet-830-16273>>. Acesso em: 14 jul. 2014.

MCELVEEN, Robbie F.; TONEY, Michael K. Starting high-inertia loads. **IEEE Transactions on Industry Applications**, v. 37, n. 1, pp. 137-144, jan. 2001.

MELO, Farlon R. de; BACCARINI, Lane M. Rabelo; MENDES, Livia de Fátima S. Detecção e Diagnóstico de Falhas em Motores Alimentados por Inversores de Frequência Utilizando Técnicas Inteligentes. **Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente**, São João del Rei, 2013. Disponível em: <<http://www.sbai2013.ufc.br/pdfs/4617.pdf>>. Acesso em: 10 abril 2016.

MOURA, Dalma Lopes de. **Proposta de substituição de motor de indução monofásico por motor de indução trifásico no meio rural**. 2009. 110 f. Mestrado em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2009.

NASCIMENTO, G. **Comandos elétricos – teoria e atividades**. 1 ed. São Paulo: Editora Érica, 2013.

NATURESA, Jim S. **Motor de indução, controle de velocidade e características de partida**. Disponível em: <<http://pessoal.utfpr.edu.br/mariano/arquivos/mi3jim.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

NISKIER, Julio; MACINTYRE, A. J. **Instalações Elétricas**. 5 ed. Rio de Janeiro: Editora LTC, 2008.

PALÁCIOS, Rodrigo Henrique Cunha; SILVA, Ivan Nunes da; GOEDEL, Alessandro; GODOY, Wagner Fontes. A comprehensive evaluation of intelligent classifiers for fault identification in three-phase induction motors. **Electric Power Systems Research**, v. 127, pp. 249-258, 2015.

PETRUZELLA, Frank D. **Motores elétricos e acionamentos**. 1 ed. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda, 2013.

POMILIO, José Antenor. **Transitórios de chaveamento: partida de motores, energização de transformadores e chaveamento de capacitores**. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/pdffiles/qualidade/51.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

ROCKWHEEL AUTOMATION. **Starting High Inertia Loads: A Comparison of Starting Options**. Milwaukee (USA): 1998, 15 p.

SENAI. **Soft-Starters e inversores - técnicas de controle**. Brasília: Unidade Estratégica de Desenvolvimento Educacional – UEDE/Núcleo de Educação a Distância, 2012. 82 p.

SANTOS, F. M. da Cunha; SILVA, Ivan N. da.; SUETAKE, Marcelo. Sobre a aplicação de sistemas inteligentes para diagnóstico de falhas em máquinas de indução – uma visão geral. **Revista De Controle & Automação**, Campinas, v. 23, no. 5, p. 553- 569, out. 2012

SEIXAS, Falcondes José Mendes de. **Máquinas elétricas II**, Ilha Solteira, 2012. Disponível em: <<http://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/maquinas-eletricas--ii-2a-ed---prof-falcondes.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2014.

SILITRAFO. **Chave compensadora**. Disponível em: <http://www.silitrafo.com.br/autotransformadores_chave_compensadora.php>. Acesso em: 15 jul. 2014.

SILVA, Flávio B.; SIMONETTI, Domingos S. L.; FARDIN, Jussara F.; URTUBI, Ismael D. L. V.; ORLANDO, Marcos T. D. Limitador de corrente de partida de mit utilizando superconductor htsc resistivo. **Congresso Brasileiro de Automática**, Bonito, pp. 4918-4925, 2010.

SILVA, Sergio Ferreira da. **Identificação de torque de carga em motores de indução usando abordagem baseada em sistemas fuzzy**. 2007. 117 f. Mestrado em Engenharia Elétrica - Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo (EESC-USP), São Carlos, 2007.

SOLVESON, Mark G.; MIRAFZAL, B.; DEMERDASH, Nabeel A. O. Soft-Started induction motor modeling and heating issues for different starting profiles using a flux linkage abc frame of reference. **IEEE Trans. on Industry Applications**, v.42, n.4, pp. 973-982, jul. 2006.

VOGES. **Motores elétricos trifásicos tipo motofreio**. 2011. Disponível em: <http://www.voges.com.br/_arquivos/motores/motofreio.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2014.

WEG. **Soft-starter drivers**. Disponível em: <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Soft-Starters/SSW05>>. Acesso em: 14 maio 2014.

WEG. **Inversores de frequência**. Disponível em: < <http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW100>>. Acesso em: 23 abril 2016.

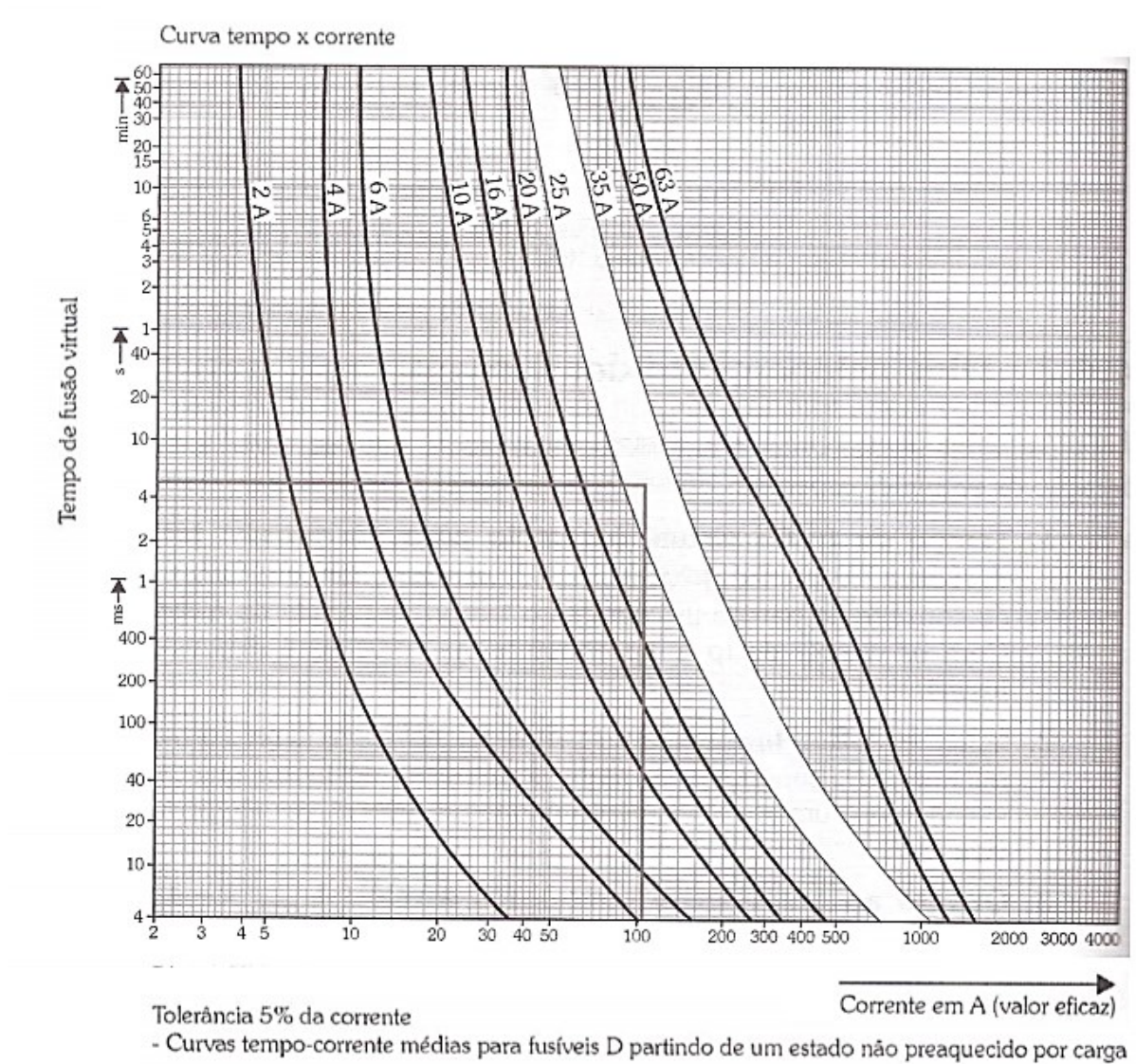
ARQUIVOS EM ANEXO

ANEXO A – Tabela de escolha de condutores em função dos ampères x metros – sistema trifásico.

| Tensões Normais entre Linhas | 220 V | 1% | 2% | 3% | 4% | 5% | 6% | 7% | 8% |
|---|---|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|------|
| | 380 V | 0,57% | 1,154% | 1,732% | 2,3% | 2,9% | 3,4% | 4,0% | 4,6% |
| Isolamento PVC/70 Série Métrica (mm²) | Ampères × Metros Condutores Singelos de Cobre — Instalações em Eletrodutos | | | | | | | | |
| 1,5 | 106 | 213 | 320 | 426 | 533 | 639 | 746 | 853 | |
| 2,5 | 178 | 355 | 533 | 711 | 888 | 1.066 | 1.244 | 1.421 | |
| 4 | 284 | 568 | 853 | 1.137 | 1.421 | 1.705 | 1.990 | 2.274 | |
| 6 | 426 | 853 | 1.279 | 1.705 | 2.132 | 2.558 | 2.985 | 3.411 | |
| 10 | 711 | 1.421 | 2.132 | 2.842 | 3.553 | 4.264 | 4.974 | 5.685 | |
| 16 | 1.137 | 2.274 | 3.411 | 4.548 | 5.685 | 6.822 | 7.959 | 9.096 | |
| 25 | 1.776 | 3.553 | 5.329 | 7.106 | 8.882 | 10.659 | 12.435 | 14.212 | |
| 35 | 2.487 | 4.974 | 7.461 | 9.948 | 12.435 | 14.923 | 17.410 | 19.897 | |
| 50 | 3.553 | 7.106 | 10.659 | 14.212 | 17.765 | 21.318 | 24.871 | 28.424 | |
| 70 | 4.974 | 9.948 | 14.923 | 19.891 | 24.871 | 29.845 | 34.819 | 39.794 | |
| 95 | 6.751 | 13.501 | 20.252 | 27.003 | 33.753 | 40.504 | 47.255 | 54.006 | |
| 120 | 8.527 | 17.054 | 25.582 | 34.109 | 42.636 | 51.163 | 59.690 | 68.218 | |
| 150 | 10.659 | 21.318 | 31.977 | 42.636 | 53.295 | 63.954 | 74.613 | 85.272 | |
| 185 | 13.146 | 26.292 | 39.438 | 52.584 | 67.730 | 78.877 | 92.023 | 105.169 | |
| 240 | 17.054 | 34.109 | 51.163 | 68.218 | 85.272 | 102.326 | 119.381 | 136.435 | |
| 300 | 21.318 | 42.636 | 63.954 | 85.272 | 106.590 | 127.908 | 149.226 | 170.544 | |
| 400 | 28.424 | 56.848 | 85.272 | 113.696 | 142.120 | 170.544 | 198.968 | 227.392 | |
| 500 | 35.530 | 71.060 | 106.590 | 142.120 | 177.650 | 213.180 | 248.710 | 284.240 | |

Fonte: Niskier (2008, p.185).

ANEXO B – Curva característica do fusível tipo D (Diazed).



Fonte: Adaptado de Franchi (2012, p.124).

ANEXO C – Catálogos comerciais WEG

Tabela de Seleção

Tabela de Seleção para Partida Combinada com 3 Componentes

| Potência do Motor (cv) ¹ | | 220 V | | | | 380 V | | | | 440 V | | | | | | |
|-------------------------------------|------|---------------------|------------|-------------------|--------------------|---------------------|---------------------|-------|------------|--------------------|---------------------|---------------------|--|------------|--------------------|---------------------|
| | | Modelo do Disjuntor | | Contator | Relé de Sobrecarga | | Modelo do Disjuntor | | Contator | Relé de Sobrecarga | | Modelo do Disjuntor | | Contator | Relé de Sobrecarga | |
| | | | | | Modelo | Faixa de Ajuste (A) | | | | Modelo | Faixa de Ajuste (A) | | | | Modelo | Faixa de Ajuste (A) |
| CV | kW | | | | | | | | | | | | | | | |
| 0,16 | 0,12 | MPW25i - 1,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 0,8 - 1,2 | MPW25i - 0,63 | CW07 / CWC07 | RW17D | 0,4 - 0,63 | MPW25i - 0,63 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 0,4 - 0,63 | | |
| 0,25 | 0,18 | MPW25i - 1,6 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,2 - 1,8 | MPW25i - 1,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 0,56 - 0,8 | MPW25i - 0,63 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 0,56 - 0,8 | | |
| 0,33 | 0,25 | MPW25i - 1,6 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,2 - 1,8 | MPW25i - 1,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 0,8 - 1,2 | MPW25i - 1,0 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 0,56 - 0,8 | | |
| 0,5 | 0,37 | MPW25i - 2,5 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,8 - 2,8 | MPW25i - 1,6 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,2 - 1,8 | MPW25i - 1,6 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 0,8 - 1,2 | | |
| 0,75 | 0,55 | MPW25i - 4,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 2,8 - 4 | MPW25i - 2,5 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,2 - 1,8 | MPW25i - 1,6 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 1,2 - 1,8 | | |
| 1 | 0,75 | MPW25i - 4,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 2,8 - 4 | MPW25i - 2,5 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,8 - 2,8 | MPW25i - 1,6 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 1,2 - 1,8 | | |
| 1,5 | 1,1 | MPW25i - 6,3 | CW07/CWC07 | RW17D | 4 - 6,3 | MPW25i - 4,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 1,8 - 2,8 | MPW25i - 2,5 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 1,8 - 2,8 | | |
| 2 | 1,5 | MPW25i - 6,3 | CW07/CWC07 | RW17D | 5,6 - 8 | MPW25i - 4,0 | CW07/CWC07 | RW17D | 2,8 - 4,0 | MPW25i - 4,0 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 2,8 - 4,0 | | |
| 3 | 2,2 | MPW25i - 1,0 | CWM9/CWC09 | RW27D / RW17D (2) | 7 - 10 | MPW25i - 6,3 | CW07/CWC07 | RW17D | 4 - 6,3 | MPW25i - 6,3 | CWM9 / CWC07 | RW27D / RW17D (2) | | 4 - 6,3 | | |

Fonte: <http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-guia-de-selecao-de-partida-direta-918-catalogo-portugues-br.pdf>. Página 6.

Dados Técnicos - Relé de sobrecarga

Contatos Principais

| Modelos | RW17 | RW27 | RW67 | RW117 | RW317 | RW407 |
|---|--|--|---|--|--|---|
| Tensão nominal de emprego U _n | IEC 60947-4-1 (V) | | 690 | | 1.000 | |
| | UL, CSA (V) | | 600 | | | |
| Ajustes de correntes / fusível máximo (gL/gG) ¹⁾ | 0,28...0,4 / 2 0,43...0,63 / 2 0,56...0,8 / 2 0,8...1,2 / 4 1,2...1,8 / 6 1,8...2,8 / 6 2,8...4 / 10 4...6,3 / 16 5,6...8 / 20 7...10 / 25 8...12,5 / 25 10...15 / 35 11...17 / 40 15...23 / 50 22...32 / 63 | 0,28...0,4 / 2 0,43...0,63 / 2 0,56...0,8 / 2 0,8...1,2 / 4 1,2...1,8 / 6 1,8...2,8 / 6 2,8...4 / 10 4...6,3 / 16 5,6...8 / 20 7...10 / 25 8...12,5 / 25 10...15 / 35 11...17 / 40 15...23 / 50 22...32 / 63 | 25...40 / 90 32...50 / 125 40...57 / 150 50...63 / 150 57...70 / 175 63...80 / 200 | 63...80 / 200 75...97 / 225 90...112 / 250 | 100...150 / 315 140...215 / 355 200...310 / 500 275...420 / 710 | 320...480 / 800 400...600 / 1.000 560...840 / 1.250 |
| Potência média dissipada por polo | (W) ≤3 | ≤3 | ≤5,5 | ≤5,5 | ≤15 | ≤20 |

Nota: 1) Coordenação tipo 2.

Fonte: <<http://ecatalog.weg.net/files/wegnet/WEG-contatores-e-reles-de-sobrecarga-catalogo-geral-50026112-catalogo-portugues-br.pdf>>. Página 127.

ANEXO D – Relatório análise de vibrações.

Autores:

Henrique Sidney Rissá (Mestrando em Eng. Mecânica), Marcos Hiroshi Takahama.

Nota: Relatório segue formatações próprias dos autores.

ANÁLISE ESTRUTURAL

Neste estudo estrutural, a análise dos modos e frequências naturais foi utilizada a fim de extinguir do sistema o fenômeno de ressonância. Este fenômeno pode acometer qualquer sistema dinâmico, e sua ocorrência se dá quando a frequência de excitação de algum agente externo, neste caso, a referente à operação do equipamento, venha a se aproximar da frequência natural do objeto em estudo, no caso a base dos equipamentos.

Quando tal fenômeno se faz presente em qualquer máquina ou equipamento, as consequências podem ser desastrosas podendo levar ao colapso de parte da estrutura. Isto porque, o fenômeno da ressonância faz com que as vibrações presentes na estrutura alcancem amplitudes exageradamente elevadas, representando grandes deslocamentos. (Borges, 2011).

Logo, uma maneira eficaz de evitar a ocorrência deste fenômeno, seria dimensionar um sistema estrutural, de modo que, sua primeira frequência natural esteja bem acima da frequência principal de operação do equipamento. (Alves Filho, 2005). Para alcançar este objetivo, foram confrontados os valores das primeiras frequências naturais de cada modelo com a frequência de operação do equipamento. Neste caso a frequência de operação máxima do sistema é da ordem de 60hz, uma vez que a velocidade máxima de operação do equipamento atinge 3600 rotações por minuto (rpm).

Para a realização dos estudos de suas frequências naturais, por meio de simulação, inicialmente a estrutura foi modelada computacionalmente com o auxílio do software SolidWorks. Em seguida o modelo foi submetido a simulação computacional, onde pode ser estimada a sua primeira frequência natural e seu respectivo modo de vibrar. A estrutura real foi submetida a ensaios de análise modal e teve seus dados reais coletados. A validação do modelo computacional foi realizada por meio do critério de segurança modal (MAC), o qual relaciona os valores dos modos de vibrar obtidos na simulação e os extraídos da estrutura real durante os

ensaios. Este critério realiza a correlação do modelo computacional teórico com a estrutura real por meio de um valor de 0 a 1. Valores próximos de 0 revela que o modelo teórico não representa a estrutura real, e o valor 1 revela que a estrutura real encontra-se fielmente representada pelo modelo teórico (Farrar e Worden, 2013).

A evolução dos modelos propostos teve como critério o aperfeiçoamento de sua rigidez, alcançado por inserção de reforços pontuais. Tais reforços tiveram suas localizações determinadas a partir da análise do modo de vibração encontrado na primeira frequência natural de cada modelo. Ou seja, o estudo dos resultados obtidos por simulação proporcionou visualizar os locais de menor rigidez, representados por regiões de maiores deformações, e assim inserir reforços localizados para conseguir um aumento eficiente de rigidez, sem a incorporação de massa desnecessária à estrutura.

VALIDAÇÃO DO MODELO

Para fins de validação do modelo matemático desenvolvido computacionalmente a estrutura real foi submetida a ensaios de análise modal. Foram definidos 48 pontos de coleta de dados ao longo de toda sua geometria.

A aquisição de dados foi realizada por meio do sistema de aquisição SignalCalcAce Quattro do fabricante Data Physics Corporation. O procedimento consiste em submeter a estrutura a uma entrada impulsiva por meio de um martelo instrumentado e, simultaneamente, os acelerômetros posicionados nos pontos predefinidos captam a resposta da mesma.

A Fig. 1 ilustra o ensaio experimental realizado na estrutura. Os dados aquisitados foram posteriormente processados por um algoritmo de análise modal experimental (EMA) em ambiente Matlab, o qual possibilita a análise das frequências naturais da estrutura e seus respectivos modos de vibrar.

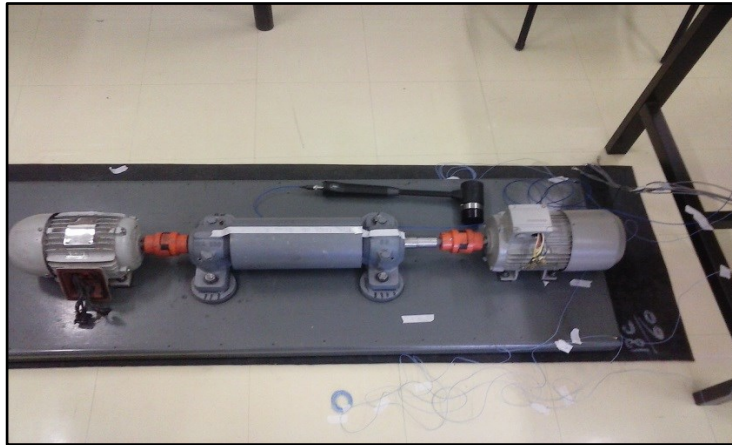


Figura 1 – Aquisição de dados da estrutura real.

Os dados coletados experimentalmente da estrutura real foram confrontados com os estimados via simulação computacional a fim de realizar o ajuste do modelo matemático. Na Fig. 2 observa-se o resultado deformado da estrutura real em seu primeiro modo de vibrar, representada por seus 48 pontos em ambiente Matlab.

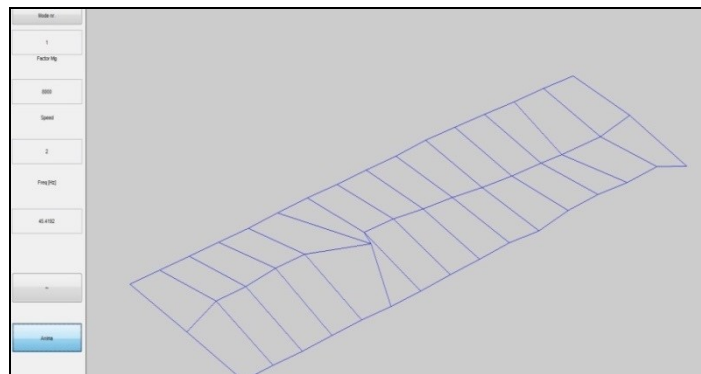


Figura 2 – Representação dos pontos aquisitados da estrutura real.

A Fig. 3 mostra o resultado deformado em seu primeiro modo de vibrar do modelo matemático obtido por meio de simulação computacional.

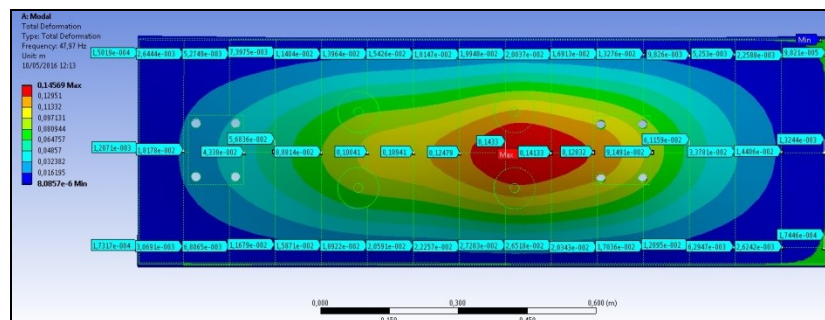


Figura 3 – Resultado da simulação do modelo computacional.

No presente trabalho os vetores modais obtidos experimentalmente e por meio de simulação computacional foram comparados entre si a fim de estimar a credibilidade do modelo simulado em relação à estrutura real. O coeficiente MAC (Modal Assurance Criterion) fornece uma medida de consistência (grau de linearidade) entre estimativas modais (Allemang, 2003). Estas estimativas são referentes aos vetores modais obtidos por meio da modelagem e simulação pelo método dos elementos finitos e os obtidos experimentalmente por meio da aquisição de dados da estrutura real. A correlação estimada pelo coeficiente MAC pode assumir valores entre 0 e 1, onde o valor 1 indica que os vetores modais são idênticos, e o valor 0 indica que os vetores modais comparados são ortogonais entre si, não havendo correlação entre os modelos. O valor calculado para o coeficiente MAC para o estudo realizado na estrutura atingiu um valor de 0.59, conforme se observa na Fig. 4, atendendo ao critério de correlação modal, garantido assim uma representação fiel da estrutura real pelo modelo simulado.

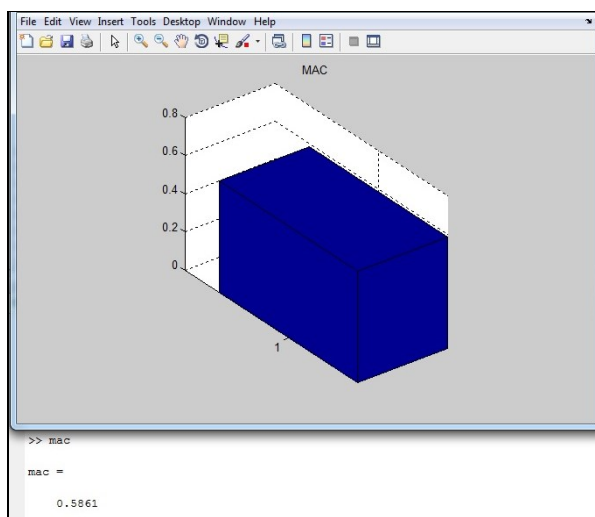


Figura 4 – Gráfico do coeficiente MAC.

SUGESTÕES DE ALTERAÇÃO DO MODELO INICIAL

Após a análise dos resultados da simulação computacional pelo método dos elementos finitos do modelo representativo da estrutura, nota-se que o valor estimado para sua primeira frequência natural encontra-se próximo à faixa de operação do equipamento suportado pelo mesmo. Este fato, caracterizado como nocivo à integridade estrutural dos componentes presentes no sistema, pode ocasionar a existência do fenômeno de ressonância na estrutura. A presença de ressonância em sistemas dinâmicos apresenta características maléficas devido à sua

propriedade de maximização das amplitudes dos deslocamentos presentes, submetendo a estrutura a deformações consideráveis. Deste modo, estas deformações podem atingir valores extremos e levar a estrutura ao colapso. Segundo Alves Filho (2005) esta relação de frequências (frequência natural/frequência de operação) apresenta estreita relação com o fator de amplificação dinâmica X do sistema. O autor define que, caso a relação de frequências assuma valores perto de 1 a amplificação dinâmica tende ao infinito, expondo a estrutura a experimentar grandes deslocamentos e tensões devido a exageradas amplitudes de vibração. Desta forma a primeira frequência natural da estrutura deverá assumir um valor quatro a cinco vezes a frequência de operação. Assim, uma maneira de extinguir o problema do sistema seria a alteração da frequência de operação do sistema ou a alteração de frequência natural da estrutura. Como a frequência de operação do sistema apresenta-se como características inerentes ao funcionamento do mesmo, torna-se inapropriado altera-la. Contudo, com alterações pontuais na geometria da estrutura pode-se elevar seu nível de rigidez aumentando assim a frequência natural da mesma. Deste modo, foi realizada a análise dos resultados da simulação e a partir do resultado deformado da estrutura em seu primeiro modo de vibrar os locais de maior deformação foram identificados. A Fig. 5 ilustra a localização dos pontos de maior deformação da estrutura. De posse da informação das coordenadas destes locais de máxima deformação é realizado a inserção de reforços pontuais a fim de aumentar a rigidez dos mesmos, aumentando assim a frequência natural da estrutura. Posteriormente este novo modelo submete-se a nova simulação e estimam-se suas novas frequências naturais e seus modos de vibrar.

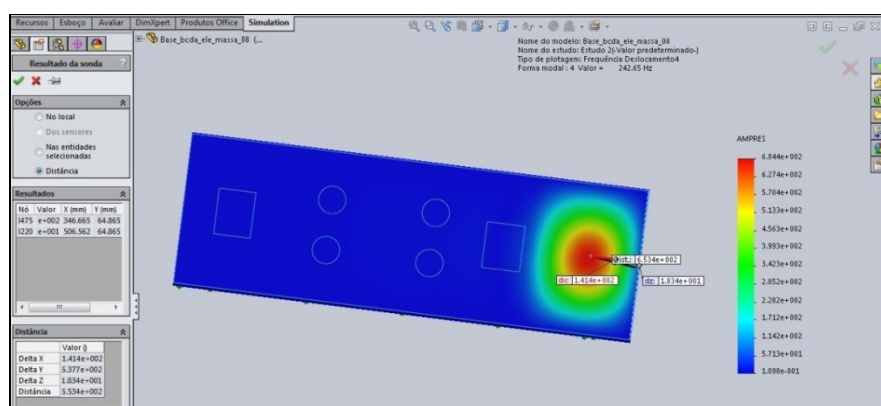


Figura 5 – Localização da região de deformação máxima.

A figura 6 ilustra o modelo inicial representativo da estrutura real.

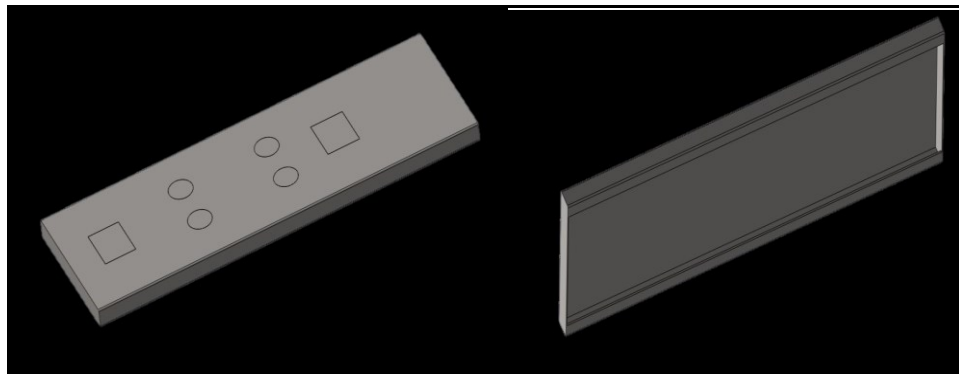


Figura 6 – Modelo inicial.

O modelo inicial teve sua primeira frequência natural estimada em 47.97 Hz e seu resultado deformado em seu modo de vibrar associado e está frequência encontra-se representado na Fig. 7.

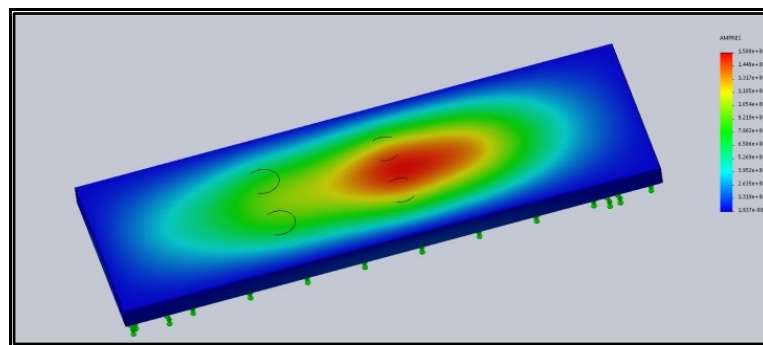


Figura 7 – Resultado deformado do modelo inicial.

Como pode ser observado na Fig. 7, a estrutura apresenta uma maior deformação na região dos apoios dos mancais do volante inercial, deste modo, nesta região foram adicionadas vigas de aço estrutural em sua parte inferior a fim de reforça-la, conforme nota-se na Fig. 8.

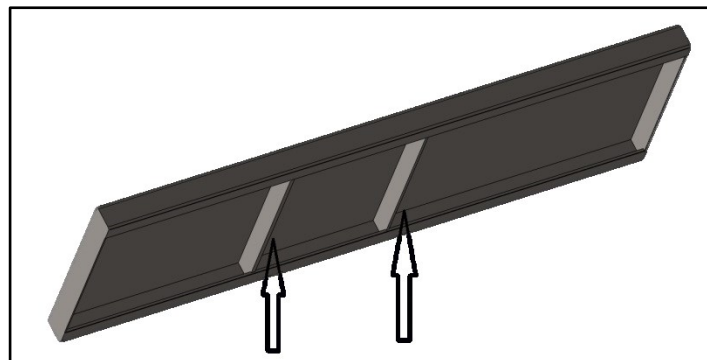


Figura 8 – Reforço estrutural adicionado ao modelo inicial.

O novo modelo, dotado das alterações, foi submetido à simulação e teve sua frequência e modos de vibrar estimados. O modelo atingiu um valor de 70.17 Hz e o resultado deformado pode ser observado na Fig. 9.

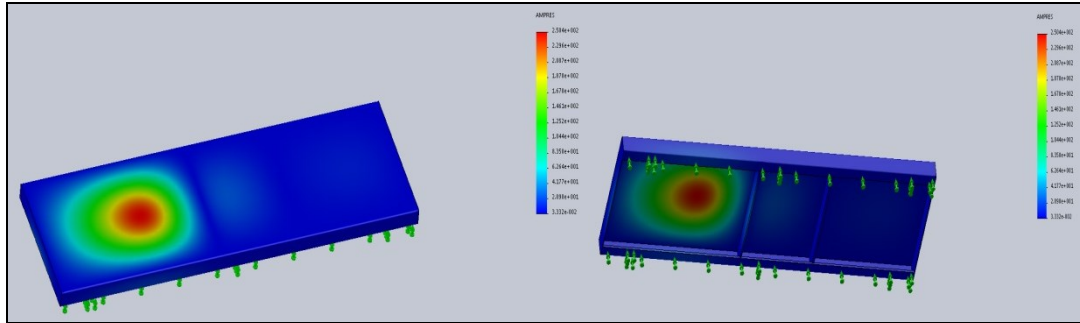


Figura 9 – Resultado deformado do modelo inicial com a adição de reforço estrutural.

A presente metodologia foi adotada para a evolução do modelo para base da bancada do sistema dinâmico, assim os reforços foram adicionados gradualmente à estrutura até atingirmos um valor satisfatório para sua primeira frequência natural. Na Fig. 10 pode-se observar o modelo final desenvolvido para a base do sistema.

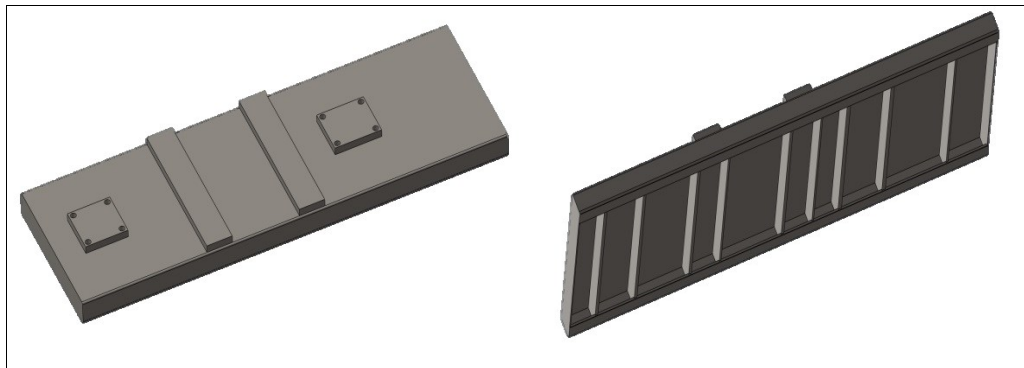


Figura 10 – Modelo final.

Neste modelo foi adicionado um total de treze reforços estruturais quando comparado ao modelo inicial, sendo quatro deles na região superior e nove na região inferior da estrutura. Sua primeira frequência natural assume o valor de 422 Hz e o resultado deformado da simulação em seu primeiro modo de vibrar observa-se na Fig. 11.

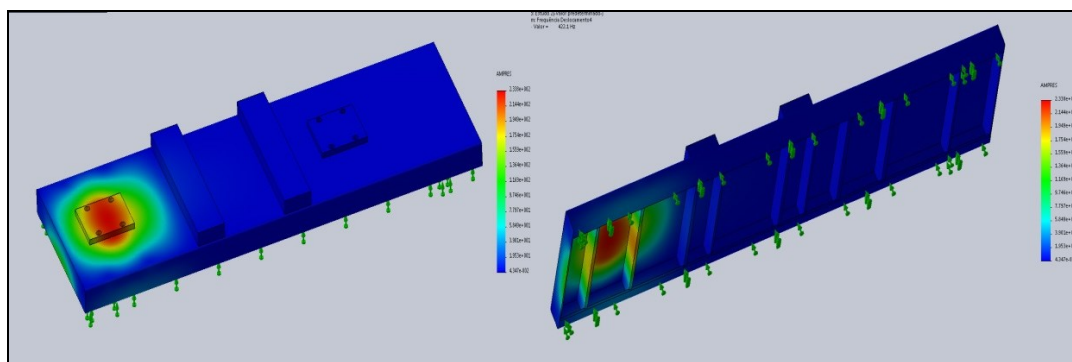


Figura 11 – Resultado deformado do modelo final.

A tabela 1 exibe a evolução do valor referente à primeira frequência natural do modelo inicial e do modelo final, assim como um comparativo à faixa de operação dos equipamentos suportados pela estrutura.

Tabela 1 – Comparação entre a frequência natural da estrutura e a frequência de operação.

| Modelos | Primeira Frequência Natural (Hz) | Frequência de Operação (Hz) |
|----------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Modelo Inicial | 47.97 | 0-60 |
| Modelo Final | 422 | 0-60 |

Deste modo o modelo final desenvolvido atinge um valor sete vezes superior ao valor da frequência de operação existente no sistema dinâmico, extinguindo assim a possibilidade de ocorrência do fenômeno de ressonância entre a os componentes da bancada e a estrutura que os suporta. Agregando maior credibilidade à integridade estrutural do sistema dinâmico.