

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM MOTOR ELÉTRICO
COM FRACIONAMENTO DE CARGA NA PARTIDA**

por

Mauro Zart Bonilha

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Junho de 2011

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO CONSUMO ENERGÉTICO DE UM MOTOR ELÉTRICO
COM FRACIONAMENTO DE CARGA NA PARTIDA**

por

Mauro Zart Bonilha

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Orientador: Prof. Rafael Antônio Comparsi Laranja

Comissão de Avaliação:

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Rodrigo Rossi

Prof. Ney Francisco Ferreira

Porto Alegre, 17 de Junho de 2011.

à minha família que sempre me apoiou
incondicionalmente

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio e exemplo de vida;

à minha namorada, por estar sempre ao meu lado;

ao técnico mecânico e colega de empresa Newton Cescani, ao engenheiro Carlos Thomas, e ao amigo e colega de curso Roberto Boeing, pelo interesse e pelas importantes contribuições para o desenvolvimento deste trabalho;

ao meu orientador *Prof. Dr. Rafael A. C. Laranja* por sua dedicação na orientação deste trabalho;

aos amigos que fiz na faculdade ao longo dessa jornada.

BONILHA, M. Z., **Análise Experimental do Consumo Energético de um Motor Elétrico Com Fracionamento de Carga na Partida**. 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

RESUMO

O presente trabalho trata da análise do consumo de energia de um motor elétrico de indução em regime de aceleração de partida. Mediante a simulação de algumas situações que podem ser encontradas na prática, esta análise tem como objetivo avaliar o comportamento da demanda de energia pelo motor, visando a possibilidade de melhorar seu rendimento. Testes experimentais foram realizados através da variação de carga sobre o eixo do motor. Para tanto, foi desenvolvido um dispositivo mecânico, funcionando como embreagem, que permite que parte da carga mantenha-se desacoplada do eixo do motor quando desejado. Os testes foram realizados em situações de partida do motor com carga integral desde o repouso e em situações onde parte carga foi acoplada já com o motor em funcionamento. A análise de energia deu-se pela comparação entre as energias consumidas nas duas maneiras de partida. Os resultados comparativos mostraram uma redução de até 25% de consumo de energia quando parte da carga era acoplada durante o movimento.

PALAVRAS-CHAVE: eficiência energética, partida de motores, volante de inércia.

BONILHA, M. Z., **Experimental Analysis of Energy Consumption of Electric Motor With a Fraction of Load Start**. 2011. 24 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

ABSTRACT

This present work deals with the analysis of energy consumption of an induction electric motor under the acceleration of departure. Through the simulation of certain situations that may be encountered in practice, this analysis wants to evaluate the behavior of energy demand by the engine, aiming at the possibility of improving their performance. Experimental tests were performed by varying the load on the motor shaft. To this end, it was developed a mechanical device, working as a clutch, that allows part of the load be decoupled from the motor shaft when desired. The tests were conducted in situations of starting the engine with full load since the beginning of the movement and in situations where part of the load was attached with the engine running. The energy analysis was given by comparing the energy consumed in these two ways. The comparative results showed a reduction up to 25% of energy consumption when part of the load were attached during the movement.

KEYWORDS: energy efficiency, motor start, flywheel.

ÍNDICE

	Pág.
1. INTRODUÇÃO	1
2. OBJETIVOS	2
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	3
4.1 Motor e inversor de frequência	4
4.2 Simulação da carga.....	5
4.3 Construção do dispositivo acoplador	5
4.4 Estimativa dos tempos de aceleração para escolha da instrumentação	6
4.5 Medição de energia consumida.....	8
4.6 Medição de tempos e velocidades	9
4.7 Montagem do experimento.....	9
4.8 Técnicas experimentais.....	10
5. RESULTADOS E ANÁLISES	11
6. CONCLUSÕES	13
6.1 Sugestões para os próximos trabalhos	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	14
APÊNDICE I – curvas de potência e velocidade.....	15

1. INTRODUÇÃO

Amplamente debatida nos tempos atuais, a conservação de energia é hoje objeto de estudo em diversas frentes, motivadas principalmente por temas que envolvem desequilíbrio climático, aquecimento global e escassez de recursos naturais.

Dentre as formas de utilização, a referente à energia elétrica tem importância fundamental na manutenção do estilo de vida atual e é recurso corrente nos meios de produção industrial. A Figura 1.1 mostra a distribuição nacional de consumo de energia por macro-setor [ANEEL, 2011].

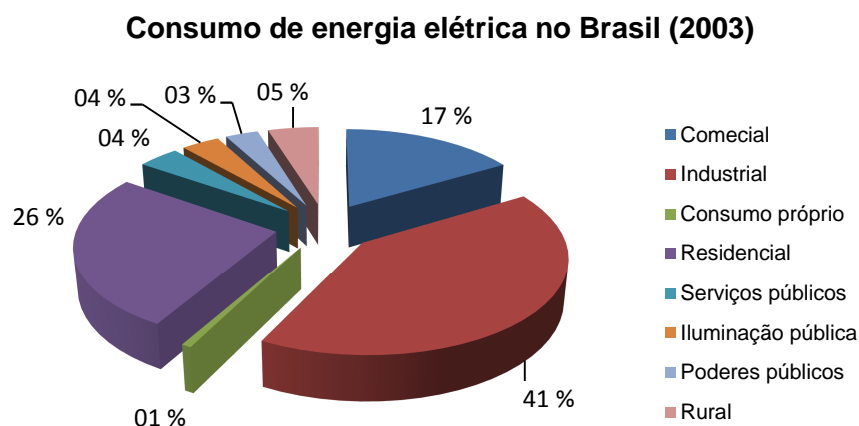


Figura 1.1 – Participação de cada setor de atividade no consumo de eletricidade no Brasil [ANEEL, 2011]

Do ponto de vista da utilização industrial, segundo Coelho, 2010, o acionamento de máquinas e sistemas mecânicos por motores elétricos é responsável por cerca de 70% a 80% da energia elétrica consumida pelas indústrias. Segundo o mesmo autor, aproximadamente 15% de toda essa energia transforma-se em perdas.

Fica evidente, então, a relevância de se minimizar as perdas decorrentes da utilização dos motores elétricos. Essas perdas ocorrem basicamente de quatro maneiras distintas: devido à resistência interna dos enrolamentos do rotor e estator; por atritos existentes nos mancais do eixo; por histerese e correntes parasitas no ferro da armadura; e por distribuição não uniforme de corrente nos enrolamentos [Fitzgerald et al., 2008].

Pode-se dividir a análise do consumo de energia dos motores elétricos em dois regimes de operação: o de aceleração, onde o motor passa do repouso até a velocidade de funcionamento; e o de funcionamento contínuo, onde o motor mantém-se com velocidade e carga aproximadamente constantes.

Motores que funcionam de maneira contínua podem ter seu consumo determinado a partir da sua curva de rendimento que é disponibilizada pelos fabricantes. Todavia, para sistemas que trabalham de forma intermitente, essas curvas não podem ser diretamente aplicadas, quer pelo desconhecimento das cargas transientes, quer pela dificuldade de monitoramento das demandas instantâneas de potência.

Os motores que operam em regime de muitas partidas têm seu consumo determinado basicamente pelo regime transiente, ou seja, pela eficiência do motor (ou sistema motriz) em transformar energia elétrica em energia mecânica de eixo. Podem ser exemplificados como equipamentos dessa categoria os de soldagem por fricção inercial, onde grandes volantes de inércia são acelerados até certa velocidade, para depois serem frenados quando em ação sobre a junta de solda [Machado, 1996].

Dentre as duas classes básicas de motores de corrente alternada, síncronos e assíncronos, neste trabalho os estudos serão feitos sobre um motor do último tipo, também chamado de motor de indução, por ser o modelo mais utilizado em aplicações industriais (Figura 1.2).

Com base nestas observações, constata-se que é importante analisar o comportamento do consumo de energia na partida dos motores elétricos, que é o objeto de estudo deste trabalho. Essa análise consistirá em fazer partir o motor com diferentes cargas e frequências de excitação. Uma instrumentação adequada medirá o energia consumida pelo motor em cada caso, e esses dados permitirão que se faça uma análise comparativa de como cada parâmetro influencia no consumo. Através dessas informações, poderão ser mapeadas as condições que minimizam as perdas de energia na partida dos motores elétricos.

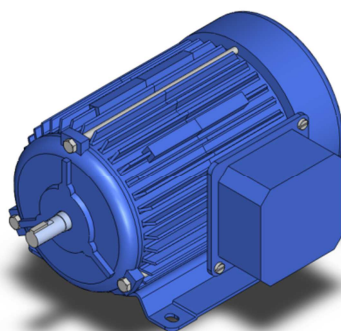


Figura 1.2 – Modelo virtual do motor utilizado nos testes [Voges, 2011]

2. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar e comparar o consumo de energia de um motor elétrico de indução em dois panoramas distintos de partida:

- (a) Quando aciona desde o repouso até a velocidade nominal a carga total de trabalho; e
- (b) Quando parte do repouso acionando somente parte da carga e, a partir de determinado ponto, acopla-se o conjunto ao restante da carga.

Para estes fins, também será necessário:

- (c) O projeto e construção de um dispositivo que possibilite o acoplamento das partes fracionadas da carga; e
- (d) Instrumentação adequada para serem realizadas as medições.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Testes realizados por Martignoni, 1980, mostram que a tensão induzida no rotor de um motor de indução é inversamente proporcional a sua velocidade. Isto quer dizer que no instante da partida, com a velocidade do eixo nula, a tensão sobre o rotor é máxima, e à velocidade síncrona, nula. Como a corrente no rotor é função da tensão que é induzida no mesmo, tem-se que a corrente é máxima na partida, e decai à medida que a rotação do motor aumenta.

A corrente de partida pode chegar em alguns casos a 750% da corrente nominal do motor, gerando elevadas perdas ôhmicas (efeito Joule), que são dadas pela Equação 3.1 [Fitzgerald et al., 2008]:

$$P_{\Omega} = I^2 R \quad (3.1)$$

sendo I a corrente circulante, em *amperes*, e R a resistência interna do enrolamento considerado, em *ohms*.

Alguns sistemas que permitem atenuar os picos de corrente na partida de motores são listados a seguir.

- (a) Partida direta: O estator é alimentado com a tensão nominal (ligado diretamente à rede). As elevadas correntes de partida, principalmente em motores que trabalham com acionamentos seguidos, podem provocar problemas no motor por sobreaquecimento e na rede por quedas de tensão [Kosow, 2005]. Em vista disso, é prática limitar-se em até 15 acionamentos por hora. A ABNT [NBR-5410, 1997] limita o uso de partida direta para motores com até 5 cv, quando não houver informações específica da concessionária de energia. De maior interesse no que tange o assunto do trabalho, estão as elevadas perdas por efeito Joule comentadas no item anterior.
- (b) Partida estrela-triângulo: consiste em uma chave, chamada de Y/Δ , que mantém a ligação do motor em modo “estrela” durante a partida. Ao se atingir a condição nominal de velocidade, alterna a ligação para “triângulo”. Nessa comutação, há um aumento subido de corrente em três vezes, causando sobrecargas mecânicas não admissíveis em alguns equipamentos [Siemens, 2003].
- (c) Partida compensada: consiste em interpor um autotransformador entre o motor e as fases da rede. Um interruptor, assim que o motor atingiu a velocidade de funcionamento, comuta o motor para ligação direta à rede. A corrente de partida inversamente proporcional à relação de transformação do autotransformador. Ao final do tempo de partida, quando o motor é alternado para ligação à 100% da tensão nominal, este sofre um solavanco devido à elevação rápida do torque [Siemens, 2003].
- (d) Partida suave: também chamada de “soft-starter”, é um dispositivo eletrônico de controle através do corte da onda de tensão por um par de tiristores em antiparalelo. A alimentação do motor, quando é colocado em funcionamento, é feita por aumento progressivo da tensão, permitindo uma partida sem golpes e que reduz o pico de corrente [Schneider-Electric, 2011].
- (e) Partida por inversor de frequência: pode ser ajustado para fornecer uma relação de tensão por frequência constante. Mantendo o torque constante, o valor da corrente cresce de um valor baixo até o valor nominal de corrente de trabalho do motor (função da carga) [Coelho, 2011].

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Para medir o consumo de energia do motor elétrico, foi montada uma bancada de testes que se organiza conforme diagrama de blocos esquemático da Figura 4.1.

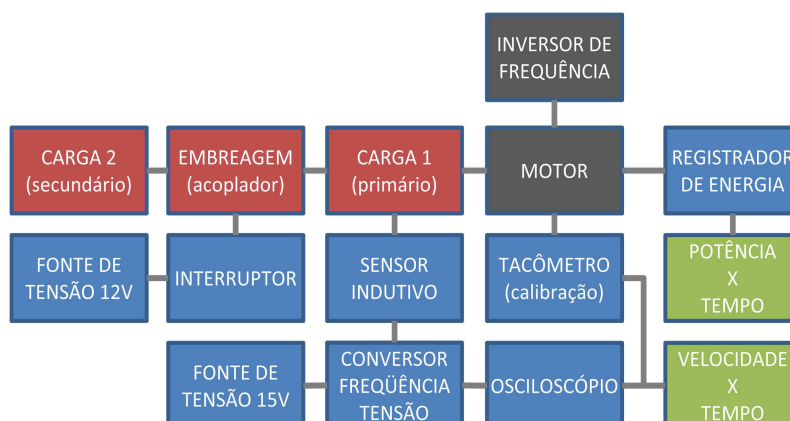


Figura 4.1 – Diagrama da montagem do experimento

A carga de trabalho 1 gira sempre solidária ao eixo do motor, enquanto a carga 2 só é acoplada ao conjunto quando a embreagem é ligada pelo interruptor. Para cada soma total das cargas, serão feitas duas metodologias de partida: em 1 estágio e em 2 estágios. Na partida em 1 estágio, o motor parte do repouso já com a embreagem acionada, ou seja, com as duas cargas girando simultaneamente. Na partida em 2 estágios, o motor parte somente com a carga 1, sendo a carga 2 acoplada posteriormente, através do acionamento da embreagem, com o motor e a carga 1 já em movimento.

As cargas 1 e 2 foram alteradas de teste em teste, de maneira a simular diversas condições que podem ser encontradas na prática. As frequências de excitação sobre o motor foram reguladas por um inversor de frequência, sendo ensaiadas duas frequências para cada carga total no eixo. Durante os períodos de ensaio, foram coletados os valores instantâneos de velocidade e potência elétrica consumida.

A seguir são listados os principais materiais e métodos empregados na experimentação deste trabalho.

4.1 Motor e inversor de frequência

O motor utilizado nos testes é de indução (assíncrono), trifásico, da marca Voges, modelo 56B, potência nominal de 1/6 cv e possui as características apresentadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Dados técnicos do motor utilizado

Fabricante	Voges	Rotação nominal (rpm)	1640
Potência cv (kW)	0,17 (0,12)	Corrente nominal (A)	0,80
Tensão (V)	220	Corrente de partida (A)	2,42
Frequência (Hz)	60	Conjugado nominal (kgf·m)	0,07
Carga:	100%	75%	50%
Rendimento	60,0%	55,0%	46,5%
Fator de Potência	0,68	0,63	0,54

O motor é controlado por um inversor de frequência de mesma marca, e suas características técnicas são descritas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Dados técnicos do inversor de frequência utilizado

200 / 240 VAC 1 fase +/- 10%	Corrente Contínua	Potência de Saída	Potência do Motor
Código	Máx. [A]	[kW]	[hp]
SKA1200025	1,7	0,25	0,33

4.2 Simulação da carga

As cargas 1 e 2, sobre o eixo do motor, foram simuladas pelo emprego de volantes de inércia. Conforme segunda lei de Newton, cargas de inércia imprimem resistência a um sistema de maneira inversamente proporcional à sua aceleração. Esta escolha permitiu o controle da carga imposta mediante simples adição ou remoção dos volantes.

Para fins práticos, na experimentação foram adaptados como volantes de inércia rodas dentadas de elementos de transmissão de motocicletas e assemelhados, que estavam disponíveis para o autor (Figura 4.2).



Figura 4.2 – Rodas dentadas adaptadas como volantes de inércia como meio de simulação de carga

4.3 Construção do dispositivo acoplador

Fez-se necessário o projeto e construção de um dispositivo que permitisse o acoplamento do motor com os volantes de inércia. Além disso, esse acoplador deveria permitir que parte da inércia ficasse desacoplada do motor quando desejado, e se acoplasse ao conjunto quando fosse comandado para tal, funcionando como embreagem. Uma vez que este trabalho trata com os períodos de aceleração de motores elétricos, e estes são breves, foi estabelecido que o acionamento da embreagem deveria ser elétrico, em virtude de abrir a possibilidade de se implementar um controle eletro-eletrônico sobre os momentos de acionamento.

O sistema utilizado foi o de embreagem eletromagnética dos compressores de ar-condicionado automotivo (Figura 4.3a). Foi aproveitada a metade frontal do compressor, que compreende o eletroímã, os discos de fricção, a tampa de suporte e o eixo. O restante das peças foi usinado e algumas outras adaptadas para poder comportar os volantes. A Figura 4.3b ilustra em vista explodida os três conjuntos principais do acoplador construído e os locais onde os volantes serão fixados.

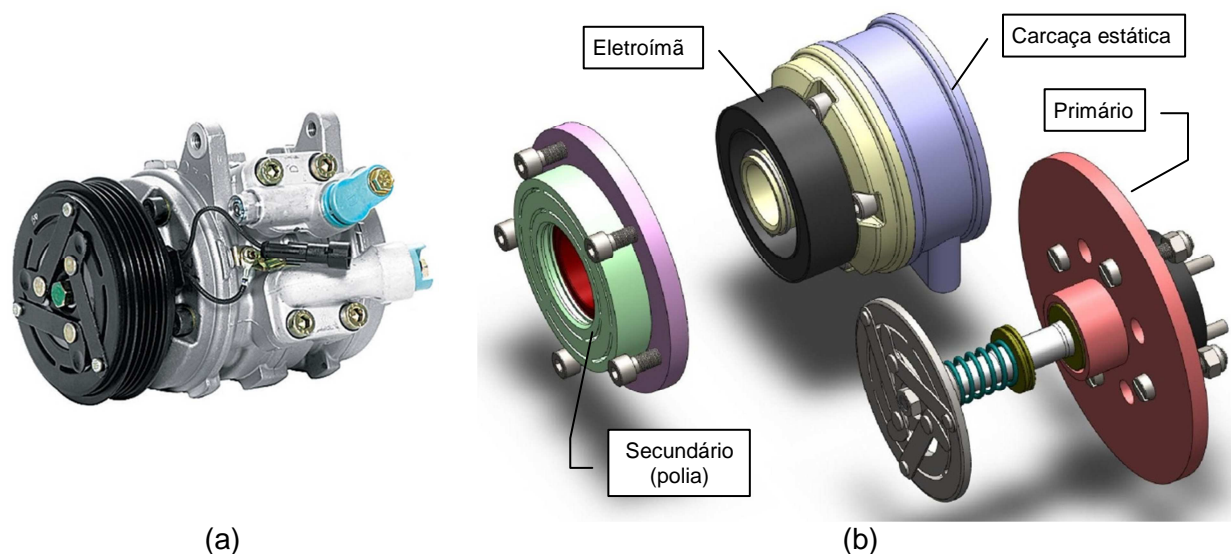


Figura 4.3 – Compressor: (a) Original; (b) Adaptado para receber os volantes (vista explodida)

O eixo primário gira sempre solidário ao motor, acoplado a este por pinos que se inserem em furos executados na flange de nylon já pré-existente no eixo do motor. O eixo secundário, por sua vez, só é conectado ao conjunto quando, ao passar corrente pelo eletroímã, este atrai o disco de embreagem contra a superfície da polia. A fricção gerada faz o volante externo começar a girar e, quando a velocidade relativa entre as superfícies de fricção cessa, o conjunto girante passa ser um só. Os detalhes do acoplador, assim como a maneira como os volantes são acoplados aos seus respectivos eixos, podem ser vistos na Figura 4.4.

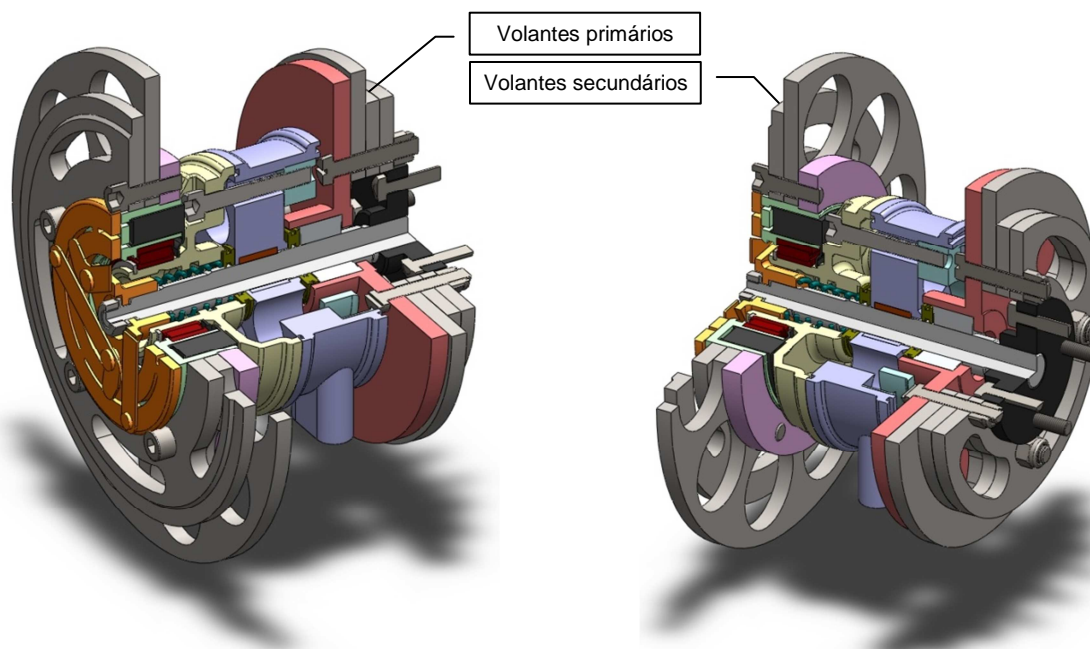


Figura 4.4 – Corte do acoplador mostrando seus detalhes internos e a fixação dos volantes

4.4 Estimativa dos tempos de aceleração para escolha da instrumentação

Para poder ser selecionada uma instrumentação apta a realizar as medições, deve-se conhecer primeiro as magnitudes de tempo envolvidas nos testes. O ensaio que levará o menor tempo para ser concluído será aquele que tiver o menor momento de inércia total das massas envolvidas, conforme segunda lei de Newton. Os momentos de inércia dos eixos

primário e secundário, assim como do eixo e rotor do motor, devem ser levadas em conta. A Tabela 4.3 mostra os valores dos momentos de inércia dos componentes girantes do sistema, calculados através de modelamento no software SolidWorks. Para os eixos primário e secundário, já estão englobados os momentos de inércia de todos os parafusos, porcas e elementos anexos aos mesmos.

Tabela 4.3 – Inércia dos componentes girantes

Componente Girante	Momento de Inércia [g·m ²]
Eixo e rotor do motor*	0,25
Volante primário pequeno	1,04
Volante primário grande	2,97
Eixo primário	5,83
Volante secundário pequeno	4,40
Volante secundário grande	6,51
Eixo secundário	2,49

* Dados obtidos do fabricante

O menor momento de inércia é conseguido quando nem no eixo primário nem no secundário está fixo qualquer volante. O momento de inércia total fica, então, restrito à soma das inércias dos eixos do acoplador e motor.

Para o cálculo do tempo de aceleração, é necessária a posse dos valores da curva de torque do motor em função da sua rotação. A curva fornecida pelo fabricante foi digitalizada pelo programa Engauge Digitizer, que gerou os pares de valores torque-rotação. Com esses dados obteve-se o gráfico virtual da curva de torque do motor estudado.

Para se obter os tempos de teste, a equação do *princípio do impulso e quantidade de movimento* foi reorganizada de modo a assumir a seguinte forma:

$$\int_{t_1}^{t_2} dt = J \cdot \int_{\omega_1}^{\omega_2} \tau^{-1} d\omega \quad (4.1)$$

onde J é o momento de inércia de massa, em $kg \cdot m^2$, e ω_1 e ω_2 representam, respectivamente, a velocidade angular inicial e final do objeto, em rad/s .

Alternativamente, da definição gráfica de integral, a Equação 4.1 pode ser interpretada como:

$$\Delta t_{1 \rightarrow 2} = J \cdot (\text{área sob a curva } \tau^{-1} \text{ entre } \omega_1 \text{ e } \omega_2) \quad (4.2)$$

onde $\Delta t_{1 \rightarrow 2}$ é o tempo transcorrido, em segundos, para o sistema acelerar entre as velocidades consideradas.

Os gráficos das duas curvas torque por velocidade e torque⁻¹ por velocidade, obtidas para o desenvolvimento dessa solução, são mostrados na Figura 4.5.

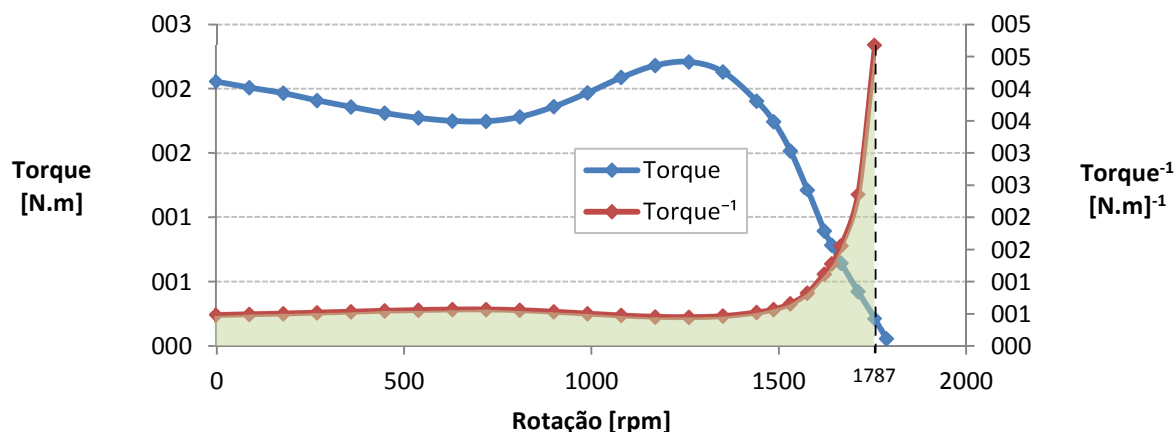


Figura 4.5 - Gráfico de torque e torque⁻¹ em função da rotação do motor estudado

Dessa forma, o tempo de aceleração encontrado com a metodologia, para ir do repouso até a velocidade final de 1787 rpm, foi de 1,39 segundos, calculado sobre um momento de inércia de 8,57 gm². A velocidade final usada no cálculo é a velocidade de estabilização do motor com a carga em questão, conseguida através da medição por um tacômetro. Esse tempo é válido para condições nominais de tensão e frequência sobre o motor. Cabe lembrar que, como será descrito a seguir, o motor será controlado por um inversor de frequência, que controla a tensão e frequência de entrada do motor, de maneira crescente. Assim, o tempo de aceleração tende a aumentar, o que é vantajoso para o sistema de aquisição de dados utilizado no presente trabalho.

4.5 Medição de energia consumida

Para a aquisição da energia consumida pelo motor, foi utilizado o registrador de energia trifásico Fluke 1735 Power Logger Analyt (Figura 4.6), cuja resolução é de 1 W, tempo de amostragem de 0,5 segundos e incerteza de funcionamento de ±1,5% do valor medido (dados do fabricante). Os dados de potência elétrica coletados são exportados para o computador em formato de planilha do programa Microsoft Excel para pós-processamento.



Figura 4.6 – Analisador de energia utilizado nos testes

O consumo de energia elétrica do motor é então calculado pela Equação 4.3 [Hibbeler, 1998]:

$$E_e = \int_{t_1}^{t_2} P dt \quad (4.3)$$

onde P é a potência consumida pelo motor, em W , fornecida pelo registrador de energia. Essa equação pode ser interpretada graficamente pela área sob a curva potência versus tempo.

4.6 Medição de tempos e velocidades

A captação da velocidade do motor foi feita através de um sensor indutivo marca Autonics modelo PR12-2DP, fixado na periferia do volante solidário ao eixo primário, a uma distância recomendada pelo fabricante de $2\text{ mm} \pm 10\%$. Possui histerese máxima de 10% da distância detectada e resposta em frequência de 800 Hz. O volante, por ser uma roda dentada, se mostrou adequado para a obtenção de sinal do sensor, visto que os seus dentes proporcionam a obtenção de pulsos bem definidos. Uma imagem deste sensor instalado pode ser vista na Figura 4.7.



Figura 4.7 – Sensor indutivo para captação do sinal para a velocidade

O sinal fornecido pelo sensor indutivo é enviado para um conversor frequência-tensão adaptado ao experimento. Essa tensão é lida pelo osciloscópio marca Agilent Technologies modelo DSO3062A, com incerteza na medição no tempo de 0,01 segundos para a configuração utilizada. O osciloscópio é conectado ao computador via USB, e mediante software específico, monta as curvas de aceleração do conjunto. Essas curvas são exportadas em formato TXT e então convertidas e tratadas pelo software Microsoft Excel.

A tensão lida pelo osciloscópio, que representa a rotação do motor, foi convertida em velocidade angular com o uso de um tacômetro marca Minipa modelo MDT-2238A com incerteza de medição de ± 1 RPM. A curva de calibração para a conversão de tensão em velocidade foi construída da seguinte maneira: com o inversor de frequência, fixaram-se cinco velocidades diferentes do motor, que foram medidas utilizando-se o tacômetro como referência. Para cada uma dessas velocidades, registrou-se o valor de tensão elétrica indicada pelo osciloscópio. Esses pares de valores foram registrados em gráfico no programa Excel e se gerou a função que relaciona tensão com velocidade do motor.

4.7 Montagem do experimento

Os itens foram montados em uma bancada, juntamente com duas fontes de tensão, uma para alimentar a embreagem eletromagnética, e outra fonte para o conversor frequência-tensão. As imagens a seguir ilustram o equipamento montado e disposto em sua bancada de testes, em dois momentos distintos (Figura 4.8).

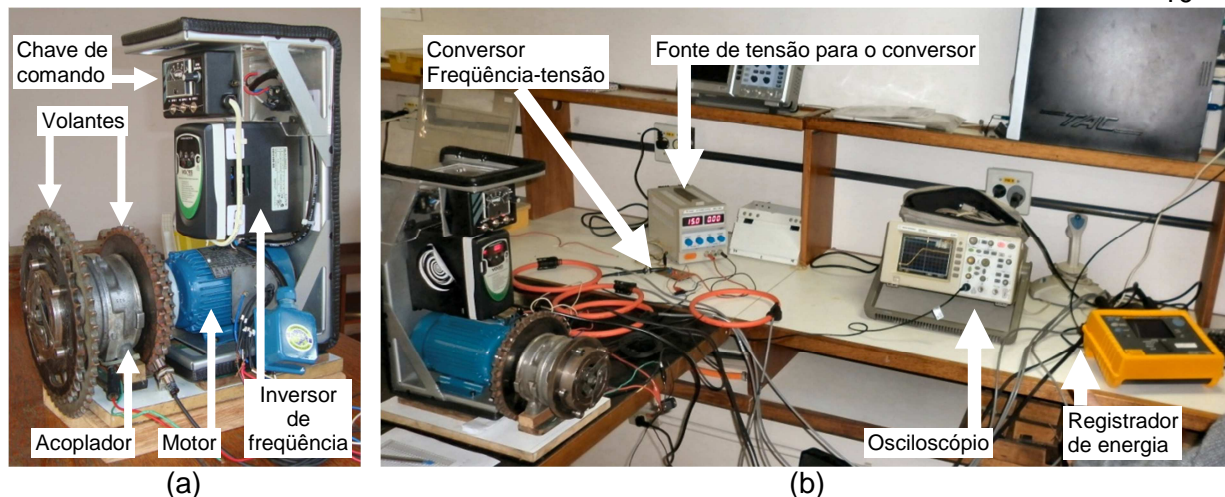


Figura 4.8 – (a) Acoplador, motor e inversor montados; (b) Bancadas de teste

4.8 Técnicas experimentais

Para cada combinação de volantes foram realizados quatro ensaios: dois com excitação do motor em 20 Hz e outros dois em 60 Hz, ajustados pelo inversor de freqüência. Para cada freqüência houve duas metodologias de arranque:

- A primeira consiste em partir o motor apenas com o eixo primário (carga 1) conectado. Ao verificar-se visualmente pela tela do osciloscópio que a velocidade se estabilizou, comuta-se manualmente o interruptor, energizando a embreagem que então acopla o eixo secundário (carga 2) ao conjunto. Espera-se a velocidade novamente se estabilizar e então se encerra o ensaio (Figura 4.9a).
- A segunda consiste em fazer partir o motor já com a embreagem acoplada, ou seja, com a carga total (1 e 2) desde o repouso. Aguarda-se estabilizar a velocidade e então se encerra o teste (Figura 4.9b).

Os primeiros ensaios foram repetidos três vezes cada, a fim de se verificar a dispersão dos resultados. Os gráficos resultantes destes ensaios foram sobrepostos uns aos outros e por inspeção visual notou-se boa repetibilidade. Em vista disso, todos os ensaios restantes foram executados somente uma vez.

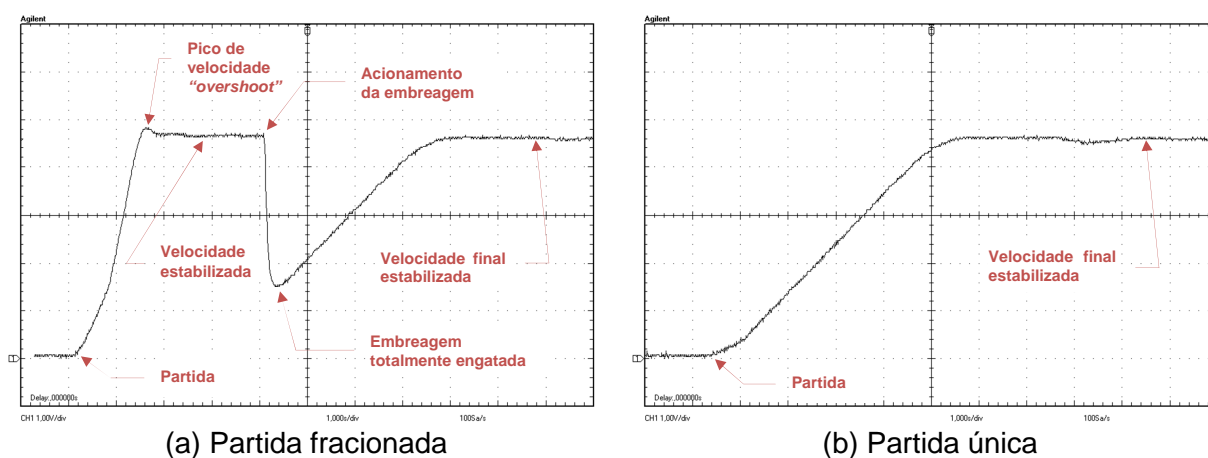


Figura 4.9 – Interpretação dos gráficos típicos de velocidade fornecidas pelo osciloscópio para cada modo de partida

O objetivo da partida fracionada é proporcionar uma carga menor de arranque ao motor elétrico, procurando-se minimizar as perdas por efeito Joule. Ao acoplar-se a embreagem, o eixo primário cede energia ao secundário, acelerando este e desacelerando aquele. Como foram realizados simultaneamente, os gráficos de potência-tempo e velocidade-tempo foram se sobrepostos e, para o caso da partida fracionada, foram considerados os gastos de energia em dois períodos de tempo: da partida até o pico de velocidade, e do acionamento da embreagem até a estabilização da velocidade. Para o caso de partida única, é considerado o gasto de energia desde o momento da partida até o instante em que transcorrer um tempo igual à soma dos tempos do teste anterior. Neste instante, a velocidade está estabilizada.

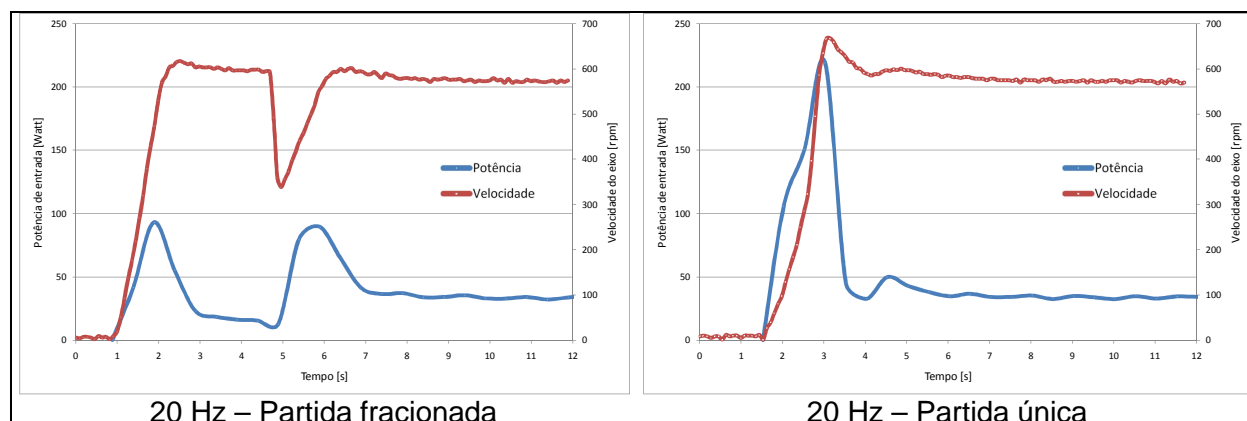
Para que os testes fornecessem dados abrangentes e representativos, dentre as vinte e quatro combinações possíveis de momentos de inércia, foram selecionadas para os testes aquelas que representassem valores extremos e centrais dentre dois parâmetros estipulados: momento de inércia total do conjunto e momento de inércia relativo entre o secundário e o total. A Tabela 4.4 traz consigo as razões da escolha das combinações.

Tabela 4.4 – Combinações testadas e suas características

Combinação	Primário [g·m ²]	Secundário [g·m ²]	Total [g·m ²]	Prim./total	Sec./total	Justificativa da escolha
A	5,83	2,49	8,31	70,1 %	29,9 %	Menor inércia total
B	6,87	8,99	15,87	43,3 %	56,7 %	Inércia total intermediária
C	10,88	13,40	24,28	44,8 %	55,2 %	Maior inércia total
D	10,88	2,49	13,37	81,4 %	18,6 %	Menor secundário relativo
E	7,92	6,89	14,80	53,5 %	46,5 %	Secundário relativo intermediário
F	5,83	13,40	19,22	30,3 %	69,7 %	Maior secundário relativo

5. RESULTADOS E ANÁLISES

As curvas de potência e velocidade adquiridas possuem um padrão semelhante de forma para todos os ensaios realizados. Selecionou-se o ensaio com a combinação “E”, que possui o secundário e primário com inércias semelhantes, como exemplificação das curvas obtidas. A Figura 5.1 ilustra as curvas resultantes deste ensaio, para as duas frequências ajustadas e para os dois modos de partida.



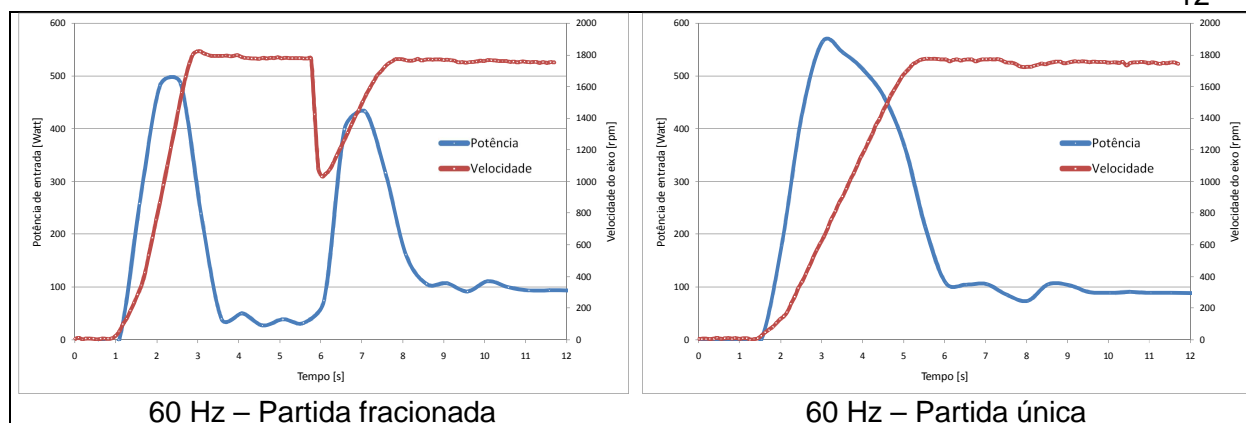


Figura 5.1 - Curvas de velocidade e potência para a combinação E

Observa-se que os picos de potência consumida são sempre menores para os casos de partida fracionada. Particularmente no caso das curvas com ajuste de frequência em 20 Hz, o pico de potência para a partida única atingiu 219 watts, contra apenas 93 watts do maior pico de potência para partida fracionada. Isso representa uma redução de 59% na demanda de potência para esse modo de partida. Com ajuste de frequência em 60 Hz as diferenças entre os picos de potência foram menores em média. Todavia, nos casos de partida única, a demanda de potência manteve-se elevada por períodos maiores, o que aumentou a potência média consumida e conseqüentemente o consumo de energia. As demais curvas para as outras combinações analisadas podem ser vistas no Apêndice I deste trabalho.

A Tabela 5.1 contempla os resultados de consumo de energia para todas as combinações e situações testadas. Mostra também a economia atingida com o modo de partida fracionado proposto.

Tabela 5.1 – Consumo de energia, economia e incertezas associadas dos ensaios efetuados

		20 Hz						60 Hz					
		Fracionada		Única		Economia		Fracionada		Única		Economia	
		E [J]	ΔE [J]	E [J]	ΔE [J]	%	$\Delta\%$	E [J]	ΔE [J]	E [J]	ΔE [J]	%	$\Delta\%$
Combinação	A	154,0	$\pm 1,6$	191,0	$\pm 2,0$	19,4	$\pm 1,2$	795,0	$\pm 8,3$	965,0	$\pm 10,4$	17,6	$\pm 1,2$
	B	402,0	$\pm 3,1$	506,0	$\pm 4,8$	20,6	$\pm 1,0$	1772,0	$\pm 13,9$	2108,0	$\pm 16,6$	15,9	$\pm 0,9$
	C	520,0	$\pm 3,9$	693,0	$\pm 7,9$	25,0	$\pm 1,0$	2604,0	$\pm 17,7$	3073,0	$\pm 20,9$	15,3	$\pm 0,8$
	D	285,0	$\pm 2,5$	377,0	$\pm 3,5$	24,4	$\pm 1,0$	1372,0	$\pm 12,2$	1681,0	$\pm 14,7$	18,4	$\pm 1,0$
	E	303,0	$\pm 2,5$	394,0	$\pm 3,8$	23,1	$\pm 1,0$	1577,0	$\pm 13,1$	1833,0	$\pm 15,4$	14,0	$\pm 1,0$
	F	379,0	$\pm 4,3$	409,0	$\pm 5,2$	7,3	$\pm 1,6$	2143,0	$\pm 16,4$	2396,0	$\pm 18,2$	10,6	$\pm 1,0$

Os termos ΔE e $\Delta\%$ representam as incertezas associadas à medição da energia consumida e ao percentual da economia, respectivamente. Essas incertezas são calculadas, segundo Taylor, 1997, como é formulado na Equação 5.1:

$$\Delta v = \sqrt{\left(\frac{\partial v}{\partial a} \Delta a\right)^2 + \left(\frac{\partial v}{\partial b} \Delta b\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial v}{\partial z} \Delta z\right)^2} \quad (5.1)$$

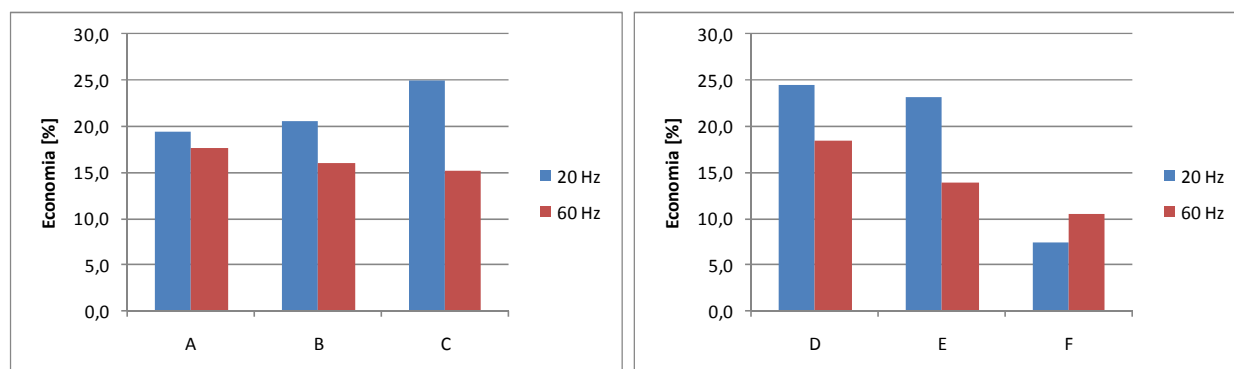
sendo a, b, \dots, z as variáveis envolvidas no cálculo de uma variável genérica em análise v , e $\Delta a, \Delta b, \dots, \Delta z$ as incertezas associadas a essa variável. Quando v é resultado direto de uma medição, Δv é a incerteza do equipamento utilizado, podendo ou não ser dependente do valor de v .

A maior diferença relativa de consumo de energia aconteceu com o motor ligado em 20 Hz e com a combinação “C” de volantes de inércia, atingindo neste teste uma economia

total de 25%. Em contrapartida, a menor economia ocorreu também em 20 Hz, porém com a combinação “F” de volantes. Nessa situação, a economia de energia obtida partindo-se da maneira fracionada foi de apenas 7,3% frente à partida única tradicional.

Na frequência de 60 Hz os valores de economia mantiveram-se mais próximos uns dos outros com as combinações. Eles são, porém, em média, inferiores ao obtidos na frequência de 20 Hz: 14,5% contra 20%.

Conforme foi mostrado na Tabela 4.4, as combinações de letras A, B e C foram classificadas conforme suas inércias totais, enquanto que as combinações D, E e F foram devido à relação entre as inércias dos dois eixos. De forma que se possa visualizar mais claramente a tendência de consumo perante essas duas variáveis, a Figura 5.2 representa em forma gráfica uma análise separada para esses dois grupos.



(a) Economia com respeito à inércia total (b) Economia com respeito à inércia relativa
 Figura 5.2 – Relação de economia para os grupos estudados

A Figura 5.2a mostra que, a 20 Hz, à medida que cresce a inércia do sistema, aumenta também a economia atingida com carga fracionada. Uma tendência contrária se observa para a frequência de 60 Hz, onde o aumento da inércia total é acompanhado por decréscimo na relação de economia.

No comparativo da Figura 5.2b, tanto na frequência de 20 Hz quanto na de 60 Hz, a redução da inércia do secundário frente ao total produz uma elevação da economia de energia. O limite dessa redução de inércia ocorre quando o secundário atingir virtualmente o valor zero, o que é fisicamente a inexistência deste. Nesse momento o sistema se transforma, invariavelmente, no sistema de partida única, produzindo, evidentemente, uma economia nula. Esse comportamento sugere que deve existir um valor de momento de inércia relativa, entre os 46,5% da combinação “E” e o 0% do limite comentado, que leva a economia ao seu valor máximo. A indisponibilidade, nos testes, de um secundário que representasse uma inércia relativa menor que os 18,6% da combinação “D” torna inconclusiva uma afirmação a esse respeito.

6. CONCLUSÕES

A execução deste trabalho proporcionou condições para se testar e avaliar o consumo de energia no regime de aceleração de um motor elétrico. Foram medidos os consumos em diferentes condições de partida: partida em um estágio, onde o motor conduziu desde o repouso a integralidade da carga de trabalho; e partida em dois estágios, em que se fez o motor partir com parte da carga, sendo o restante acoplado ao mesmo posteriormente mediante dispositivo construído para tal.

O dispositivo que permitiu a repartição da carga empregou uma embreagem eletromagnética para o acoplamento, que foi montada especificamente para a realização dos ensaios discutidos ao longo do trabalho. A análise dos dados resultantes dos mesmos permite

evidenciar que, para as cargas testadas, o meio de partida por fracionamento de cargas levou sempre à economia de energia.

Também foi constatado que há uma relação de compromisso entre a carga total de trabalho e a economia atingida na partida. Embora haja uma tendência clara de comportamento em função do momento de inércia total para cada frequência específica de excitação do motor, observou-se que tal comportamento não se repete quando frequências diferentes são testadas. A obtenção de uma explicação consistente sobre os motivos para a ocorrência de tais discrepâncias ainda requer um estudo mais aprofundado relativo ao tópico.

6.1 Sugestões para os próximos trabalhos

Sugere-se para os próximos trabalhos, a implementação da automatização do acionamento da embreagem do dispositivo acoplador, através do monitoramento da velocidade, de maneira que se possam testar diferentes momentos de acoplamento. Outra sugestão é realizar os ensaios com o motor em ligação direta à rede (partida direta), em virtude de se evitar o controle das tensões e frequências através do inversor de frequência. Finalmente, é importante aprofundar os estudos relativos à relação de compromisso constatada entre a frequência de excitação do sistema e a carga inercial aplicada ao mesmo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica, “**Aspectos Socioeconômicos**”, www.aneel.gov.br, acessado em 27/05/2011.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas, “**NBR-5410: Instalações elétricas de Baixa Tensão**”, 1997.

Coelho, W. A. T., “**Eficiência energética na utilização de Acionamentos Eletromecânicos**”, www.sabereletronica.com.br, acessado em 29/03/2011.

Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr., C.; Umans, S. D.; “**Máquinas Elétricas: Com Introdução à Eletrônica de Potência**”, Bookman, 6ª edição, 2008.

Hibbeler, R. C.; “**Mecânica Dinâmica**”, Editora LTC, 1998.

Machado, I. G.; “**Soldagem & Técnicas Conexas: Processos**”, editado pelo autor, 1996.

Martignoni, A.; “**Ensaio de Máquinas Elétricas**”, Editora Globo, 1980.

Schneider-Electric, “**Eficiência Energética e Acionamento de Motores**”, www.schneider-electric.com.br, acessado em 19/04/2011.

Siemens; “**Coordenação de Partidas de Motores Elétricos**”, Siemens do Brasil, 2003.

Taylor, J.R.; “**An Introduction to Error Analysis: The Study of Uncertainties in Physical Measurements**”, University Science Books, 1ª edição, 1997.

Voges, “**Catálogo de Motores**”, www.voges.com.br, acessado em 20/03/2011.

APÊNDICE I – CURVAS DE POTÊNCIA E VELOCIDADE

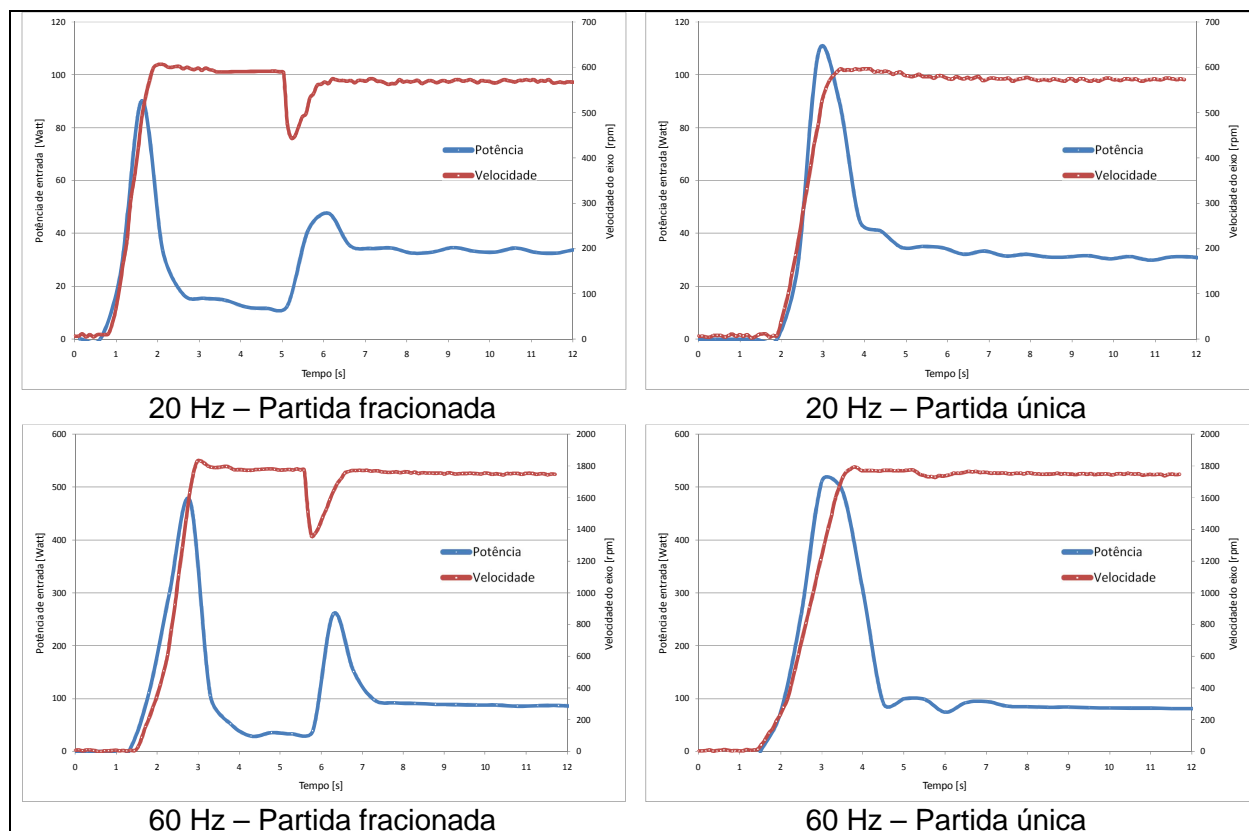


Figura 1 – Curvas de velocidade e potência para a combinação A

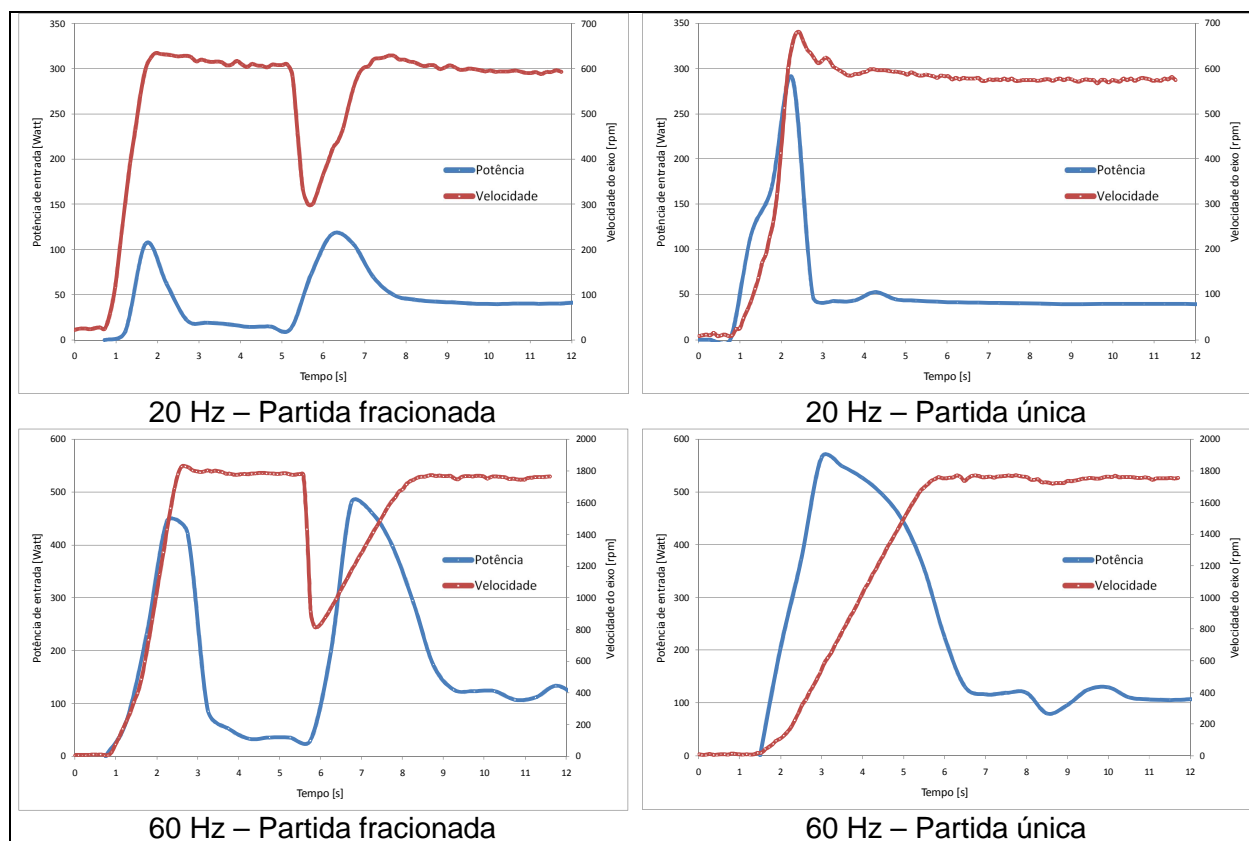


Figura 2 – Curvas de velocidade e potência para a combinação B

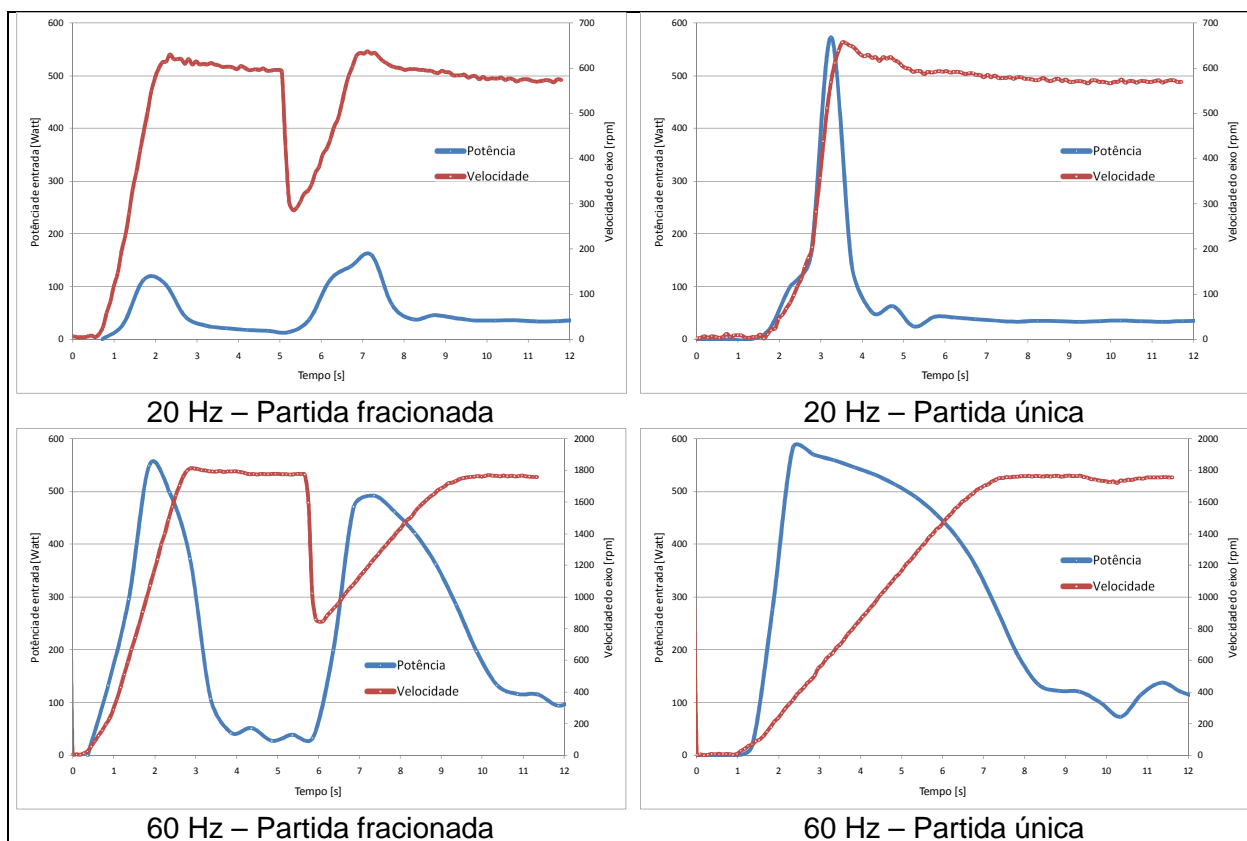


Figura 3 – Curvas de velocidade e potência para a combinação C

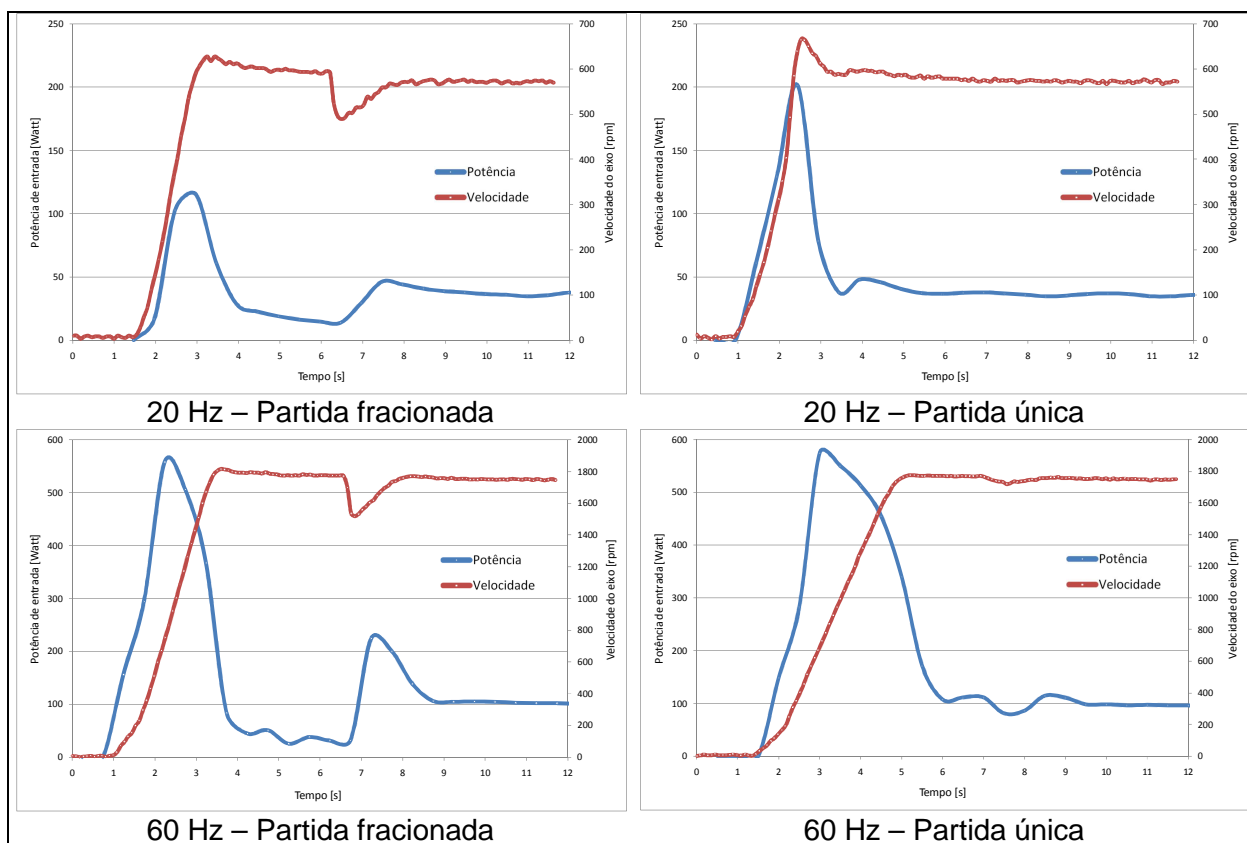


Figura 4 – Curvas de velocidade e potência para a combinação D

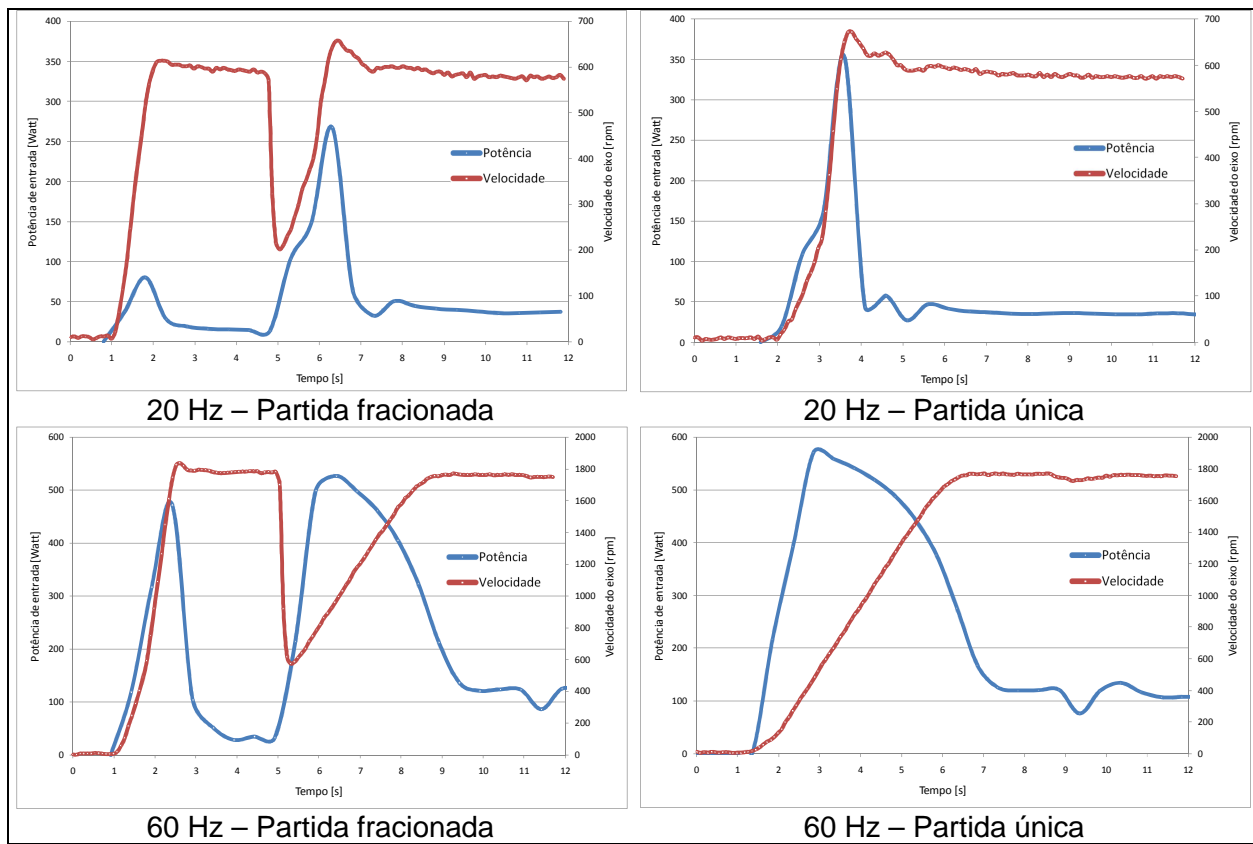


Figura 5 – Curvas de velocidade e potência para a combinação F