

**PROPOSTA DE MÉTODO PARA REDUZIR A SOBRECARGA NO INVERSOR
DURANTE A PARTIDA DE UM MOTOR DE INDUÇÃO UTILIZANDO UM
*FLYWHEEL***

Thiago Henrique Diniz Ferreira

PROJETO SUBMETIDO AO CORPO DOCENTE DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA DA ESCOLA POLITÉCNICA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE ENGENHEIRO ELETRICISTA.

Aprovada por:

Prof. Luís Guilherme B. Rolim, Dr.-Ing.
(Orientador)

Prof. Sergio Sami Hazan, Ph.D.

Prof. Felipe José da Costa Padilha, M. Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ - BRASIL
ABRIL DE 2009

Agradecimentos

Agradeço a Deus, Senhor de todas as coisas, pelo milagre da vida e por iluminar meu caminho, além de me trazer paz e felicidade.

Aos meus pais Tania e Justino, gostaria de agradecer por todo o empenho, cuidado, carinho e dedicação durante todos os anos da minha vida. Eles são os pilares que me sustentam para nunca sucumbir e sempre enfrentar de frente em todos os desafios que aparecem durante a vida. Obrigado por todos os ensinamentos, pela educação dada, pela maneira de ver e viver a vida!

Ao meu irmão Raphael Henrique, não existem palavras para agradecer todo o companheirismo, amizade e zelo que temos um pelo outro.

Eu poderia escrever páginas e mais páginas para falar sobre a alegria, o amor e a união que existe em minha família. Nossa história nos faz ter humildade, força e fé para juntos celebrarmos cada conquista individual como sendo uma conquista coletiva. Esse trabalho é apenas a consequência da entrega de cada um durante anos e anos para que nossas conquistas sejam cada vez maiores.

A paciência, confiança, companhia, paz e amor que minha namorada Luana transmite desde que estamos juntos foram fundamentais para a conclusão deste trabalho. Obrigado pela sabedoria de entender a importância deste trabalho e esperar para colhermos futuramente os frutos a serem colhidos por causa disso.

Não poderia deixar de demonstrar minha gratidão e carinho e a cada amigo pelos momentos de aprendizagem, motivação, apoio e alegria que passamos durante a vida pois a amizade é um bem muito valioso cultivado a cada dia e em todas as situações.

Aos colegas de faculdade, devo agradecer pela motivação e companhia para superar todos os desafios que apareceram nessa trajetória.

Aos professores, agradeço todo o ensinamento, conhecimento e valores que me foi passado. Sou grato aos professores do Departamento de Engenharia Elétrica por todo o empenho em fazer de cada aluno um profissional gabaritado.

Obrigado ao prof. Luis Guilherme B. Rolim, por toda a confiança, paciência, dedicação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho e ao amigo e ao prof. Jorge Luiz do Nascimento, pois nosso convívio e conversas foram extremamente importantes para meu crescimento pessoal e acadêmico.

Sem cada um de vocês, não seria capaz de chegar até aqui. Muito Obrigado!

“Cada pessoa deve trabalhar para o seu aperfeiçoamento e, ao mesmo tempo, participar da responsabilidade coletiva por toda a humanidade.”

Marie Curie

Resumo

Em muitos casos, o acionamento de motores de indução não pode ser feito de maneira direta sendo necessário usar métodos de partida para atenuar os efeitos de sobrecarga, quedas

de tensão ou efeitos negativos a outras cargas ligadas ao mesmo sistema. O método de partida do motor depende do tipo de motor que se dispõe, bem como das necessidades da carga.

Neste trabalho será proposto um método de suprir a sobrecarga no acionamento de um motor alimentado por um inversor, como em sistemas com geração de energia eólica. Este método consiste em um *flywheel* acoplado a um motor de indução com rotor gaiola ligado em paralelo com uma carga a ser acionada.

Este método foi desenvolvido baseado no estudo do fluxo de potência na partida de motores através da Teoria de potencia instantânea, Teoria PQ, comparando resultados reais obtidos de experiência prática com resultados de simulações no programa MATLAB/Simulink. Sua consistência foi verificada por meio da análise de resultados de simulação através do programa MATLAB/Simulink.

Índice

Agradecimentos	II
Resumo	IV

<u>1</u>	<u>Introdução</u>	7
1.1	<u>Motivação</u>	9
1.2	<u>Objetivo</u>	9
1.3	<u>Visão Geral do Texto</u>	9
<u>2</u>	<u>Partida de motor de indução a partir de inversores</u>	11
2.1	<u>Proposta de partida do método desenvolvido</u>	16
2.2	<u>Flywheel – Uma solução para armazenar e gerar energia</u>	17
2.3	<u>Teoria de Potência Instantânea – Teoria pq</u>	19
<u>3</u>	<u>Fluxo de potência durante a partida de motor de indução</u>	21
3.1	<u>Fluxo de potência ativa e reativa</u>	21
3.2	<u>Simulação da partida de motores</u>	22
3.3	<u>Ensaio de partida de motores</u>	30
<u>4</u>	<u>Modelo de controle de sobrecarga com uso de <i>Flywheel</i></u>	33
4.1	<u>Controle da frequência</u>	33
4.2	<u>Inversor</u>	35
4.3	<u>Flywheel acoplado ao Motor de Indução</u>	36
4.4	<u>Carga – Motor de Indução com rotor gaiola</u>	37
4.5	<u>Modelo Proposto</u>	39
4.6	<u>Resultados obtidos</u>	41
<u>5</u>	<u>Conclusão</u>	48
5.1	<u>Trabalhos Futuros</u>	48
5.2	<u>Referências Bibliográficas</u>	49
	<u>Anexo A – Resultados Complementares da Simulação da Partida de Motores pelo Matlab/Simulink</u>	51
	<u>Carga 1 - Torque Constante</u>	51
	<u>Carga 2 - Torque proporcional a velocidade</u>	54
	<u>Carga 3 - Torque proporcional ao quadrado da velocidade</u>	57
	<u>Anexo B – Resultados Experimentais dos Ensaio de Partida no Laboratório</u> ..	60
	<u>Motor1</u>	60
	<u>Motor2</u>	62
	<u>Motor3</u>	64
	<u>Anexo C - Fotos do Ensaio de Partida no Laboratório</u>	66
	<u>Apêndice A – Teoria pq</u>	68

1 Introdução

O aquecimento global aliado à possibilidade de levar energia às regiões mais afastadas, onde ter uma rede elétrica convencional torna-se inviável por vários motivos, tem feito com que as fontes de energia renováveis obtenham destaque no cenário mundial.

A energia eólica, dentre as fontes de energia alternativas como a biomassa, o biodiesel e a energia solar, tem tido maior destaque e crescimento pelo mundo, devido a custo e eficiência.

O uso da energia eólica na produção de energia elétrica teve início na Dinamarca em 1890 e foi impulsionado ao longo dos anos a cada oscilação no custo dos combustíveis.

Outro fator que explica o desenvolvimento mundial deste tipo de geração de energia pode ser visto no Protocolo de Kioto, assinado em 1997 [1]. Neste Protocolo, alguns países se comprometeram a reduzir suas emissões combinadas de gases de efeito estufa. Dentre as propostas deste Protocolo pode-se destacar a que fala sobre pesquisa, promoção, desenvolvimento e o aumento do uso de formas novas e renováveis de energia, de tecnologias de seqüestro de dióxido de carbono e de tecnologias ambientalmente seguras, que sejam avançadas e inovadoras.

O PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas), instituído pela Lei nº 10.438, de 26 de abril de 2002 e revisado pela Lei nº 10.762, de 11 de novembro de 2003 [2], cujo objetivo é a diversificação da matriz energética brasileira é apenas um dos muitos programas que no Brasil estimulam o crescente uso de geração eólica.

No Brasil, cerca de 10% da população, em sua maioria na área rural, não tem acesso a energia elétrica. Em muitas destas localidades onde não há energia elétrica, o governo através de programas como PRODEEM, “Luz no Campo” e “Luz para Todos” está levando a energia para estas comunidades, seja através da extensão da rede, de sistema de geração descentralizada com redes isoladas ou sistemas de geração individual.

Em muitos dos casos onde a rede elétrica não pode ser levada até a localidade, uma opção é pelo uso de sistemas autônomos de baixa potência (<10kW) alimentados por fontes alternativas de energia. Em sistemas ligados a uma rede local, utiliza-se um inversor central para transferir toda a energia gerada para a rede local. Com isso, cargas alimentadas em corrente alternada que podem ser conectadas e desconectadas em qualquer momento. Esta carga, muitas vezes, pode ser um motor de indução que pela norma NBR 7094[3], recebe classificações diferentes de acordo com sua partida.

Na partida direta, a corrente de um motor chega a valores entre 6 a 10 vezes maiores que sua corrente nominal [4]-[11]. Isto pode acarretar uma sobrecarga em um inversor que estiver alimentando o motor. Sendo assim, faz-se necessário limitar a potência do maior motor a ser partido de forma direta ou superdimensionar a potência nominal do inversor, permitindo assim a partida direta do motor a ser utilizado.

Paralelo à implantação de geração de energia por fonte de energia renovável, a evolução da tecnologia e a necessidade cada vez maior de usar de forma eficiente a energia que se produz, tem levado o homem a procurar maneiras de aproveitar ao máximo toda a energia gerada.

Uma destas formas é o *flywheel* [12]-[17]. Este dispositivo consiste basicamente de uma roda (ou disco), acoplada ao rotor de uma máquina elétrica, posta para girar em situações em que não esteja sujeita a qualquer força de atrito ou a qualquer outra ação exterior com a intenção de armazenar toda a energia elétrica transformada em energia mecânica. A ação de uma força externa, que neste caso reduz sua velocidade, faz com que a energia armazenada pelo *flywheel* seja devolvida ao sistema fazendo com que o motor passe a funcionar por algum tempo como gerador.

Este trabalho apresenta uma simulação de um método que consiste no uso de um *flywheel* para suprir a sobrecarga em um inversor durante a partida direta de um motor de indução, baseado no método descrito em [17].

Limitando a demanda de potência a ser fornecida pelo inversor, através do controle da tensão e da frequência, a valores próximos ao valor da potência nominal do motor de indução, esta sobrecarga durante a partida é atenuada utilizando um *flywheel* em paralelo com a carga a ser alimentada, neste caso o motor de indução.

Este trabalho possui também um estudo sobre fluxo de potência durante o acionamento de motores de indução com rotor de gaiola de esquilo. O objetivo deste estudo é prever a potência requerida pelo motor para auxiliar na limitação da demanda de potência a ser fornecida pelo inversor.

No estudo do fluxo de potência durante o acionamento dos motores foi utilizado programa de simulação Matlab/Simulink aliado a Teoria de potência real e aparente instantânea (Teoria PQ) [18]-[20]. Esta simulação foi verificada através da comparação dos seus resultados com os obtidos durante experiência prática desenvolvida em laboratório.

1.1 Motivação

Conforme descrito na seção anterior, o uso da energia eólica tem se difundido no mundo junto com novos métodos de aproveitar ao máximo a energia gerada. Como os motores são responsáveis pelo consumo de cerca de 60% de toda energia elétrica gerada no Brasil, os problemas de sobrecarga nos inversores inviabilizam a alimentação destes motores por sistemas eólicos, a menos que se use algum método para reduzir a corrente de partida.

O desenvolvimento de dispositivos de eletrônica de potência modernos e velozes microcontroladores, aliados a Teoria de Potência Instantânea (Teoria PQ), possibilita um controle de parâmetros como frequência e tensão e, conseqüentemente, um controle no fluxo de potência do sistema atenuando assim problemas de sobrecarga em equipamentos como os inversores.

1.2 Objetivo

Os objetivos deste trabalho são:

- Analisar o fluxo de potência durante a partida de motores de indução com rotor gaiola de esquilo baseado na Teoria PQ através de um programa de simulação (MATLAB/Simulink) e em experiência prática em laboratório;
- Desenvolver, através de simulações com o uso do MATLAB/Simulink, um método de partida de um motor de indução alimentado por inversor de potência com frequência e tensão controláveis. Para isto será usando um *flywheel* em paralelo com esta carga para atenuar a sobrecarga no inversor;
- Verificar a consistência do método desenvolvido, pela análise dos resultados da simulação.

1.3 Visão Geral do Texto

O capítulo 2 propõe um modelo para atenuar a sobrecarga imposta pelo motor de indução em sua partida usando um *flywheel*. Além do modelo, o capítulo traz também uma descrição das ferramentas usadas para compor este modelo, caso do *flywheel* e da Teoria de

Potência Instantânea (Teoria PQ). Para enriquecimento, alguns métodos de partida são brevemente citados no texto.

Já o capítulo 3 apresenta um estudo sobre o fluxo de potência na partida dos motores de indução com rotor em gaiola. Para auxiliar este estudo, este capítulo apresenta simulações em programas computacionais e ensaios feitos em laboratório da partida de motores de indução.

O capítulo 4 descreve o modelo proposto e os resultados obtidos em sua simulação, comparando-os com os resultados obtidos nas simulações do capítulo anterior. A apresentação do modelo é feita a partir de cada componente.

O capítulo 5 traz as últimas considerações, as conclusões e propostas de futuros trabalhos.

2 Partida de motor de indução a partir de inversores

Durante a partida, motores elétricos solicitam da rede de alimentação uma corrente de valor elevado, da ordem de 6 a 10 vezes a sua corrente nominal. Nestas condições, o circuito, que inicialmente fora projetado a transportar a potência requerida pelo motor, é solicitado agora pela corrente de acionamento, durante certo período de tempo. Como consequência, o sistema fica submetido a uma queda de tensão normalmente muito superior aos limites estabelecidos para o funcionamento em regime, podendo provocar sérios distúrbios operacionais nos equipamentos de comando, controle e proteção.

Esta variação de tensão e também da frequência em motores de indução são limitadas segundo o item 4.3.3 da norma NBR-7094 [3]. Neste item, as combinações das variações de tensão e frequência são classificadas como zona A ou zona B, conforme figura 1.

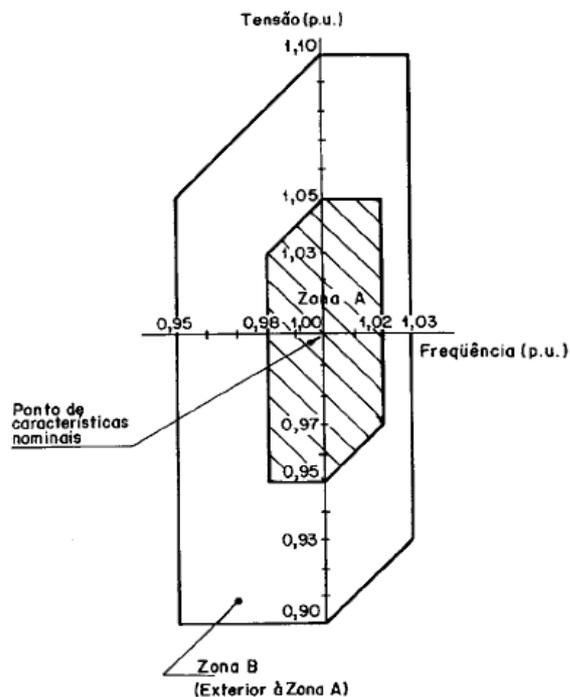


Figura 1 – Gráfico das zonas A e B de variação de frequência e Tensão – retirado da norma NBR 7094, ano 2003 [3]

A seguir, apresenta-se o trecho retirado da norma que determina as limitações do motor de acordo com a zona.

“(…)

4.3.3.2 Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal continuamente na zona A, mas pode não atender completamente as suas características de desempenho à tensão e frequências nominais (ver ponto características nominais na figura 1 do anexo A), apresentando alguns desvios. As elevações de temperatura podem ser superiores àquelas à tensão e frequência nominais.

4.3.3.3 Um motor deve ser capaz de desempenhar sua função principal na zona B, mas pode apresentar desvios superiores àqueles da zona A, no que se refere à características de desempenho à tensão e frequência nominais. As elevações de temperatura podem ser superiores as verificadas com tensão e frequência nominais e muito provavelmente superiores àquelas da zona A. O funcionamento prolongado na periferia da zona B não é recomendado. (...)”

Para se determinar uma partida a ser usada em um motor, é preciso conhecer alguns dos parâmetros, bem como características da rede a qual será ligada o motor e as normas que pautam este assunto.

A norma NBR-7094 caracteriza os regimes-tipos como:

S1 - Regime contínuo

S2 - Regime com tempo limitado

S3 - Regime intermitente periódico

S4 - Regime intermitente periódico com partida

S5 - Regime intermitente periódico com frenagem elétrica

S6 - Regime de funcionamento contínuo periódico com carga intermitente

S7 - Regime de funcionamento contínuo periódico com frenagem elétrica

S8 - Regime de funcionamento contínuo periódico com mudanças correspondentes de carga e velocidade

S9 - Regime com variações não periódicas de carga e de velocidade

S10 - Regime com cargas constantes distintas

Além dos regimes de funcionamento, esta norma divide os motores de indução gaiola, trifásico, para tensão igual ou inferior a 600V, potência nominal igual ou inferior a 630 kW (856 cv) e previstos para partida direta ou estrela-triângulo de acordo com suas características de partida:

Categoria N - Motores com conjugado de partida normal, previstos para partida direta, com 2, 4, 6 ou 8 pólos e de 0,37 kW (0,5 cv) a 630 kW (856 cv).

Categoria NY - Motores semelhantes aos da categoria N, porém previstos para partida estrela-triângulo.

Categoria H - Motores com conjugado de partida elevado, previstos para partida direta, com 4, 6 ou 8 pólos e de 0,37 kW (0,5 cv) a 160 kW (220 cv).

Categoria NY - Motores semelhantes aos da categoria H, porém previstos para partida estrela-triângulo.

Categoria D - Motores com conjugado de rotor bloqueado e escorregamento elevado, previstos para partida direta, com 4 ou mais pólos, 0,37 kW (0,5 cv) a 110 kW (150cv)

Neste capítulo, algumas soluções tradicionais são citadas para enriquecimento sobre o assunto, mas estas não se aplicam na solução proposta neste trabalho.

Partida com chave estrela-triângulo [5]-[7]

Esta partida consiste em usar uma chave que inicialmente liga os terminais do motor em estrela (Y) e, quando o motor atinge valor de velocidade próxima ao de regime, esta chave desfaz a ligação em estrela e passa a ligar o motor em triângulo (Δ).

Esta partida reduz o valor da corrente e do conjugado em 1/3 do seu valor nominal enquanto o motor está ligado em estrela (Y). A troca de ligação dos terminais do motor é acompanhada de uma elevação da corrente, com isso, caso a comutação seja feita com uma velocidade abaixo do regime, a vantagem deste método por causa da redução do valor da corrente desaparece.

Esta partida é adequada para motores cuja partida se dá em vazio.

Vantagens	Desvantagens
Custo reduzido	Aplicação específica a motores com dupla tensão nominal com seis terminais
Elevado número de manobras	Conjugado de partida reduzido a 1/3 do nominal
Corrente nominal reduzida a 1/3 da nominal	Tensão de rede deve coincidir com a tensão em triângulo (Δ) do motor
Dimensões relativamente reduzidas	

Figura 2 – Tabela comparativa da partida com chave estrela-triângulo

Partida com chave compensadora [5]-[7]

A chave compensadora é composta, basicamente, de um autotransformador com várias derivações, destinadas a regular o processo de partida. Este autotransformador é ligado ao circuito do estator e seu ponto de estrela fica acessível, porém durante a partida é curto-circuitado até que o motor esteja conectado diretamente a rede.

Motores de potência elevada, acionando cargas com alto índice de atrito, por exemplo britadores, são os pontos de emprego deste método de partida.

Vantagens	Desvantagens
A corrente de partida da linha em algumas derivações se aproxima dos valores de corrente obtidos com a chave estrela-triângulo	Custo superior ao da chave estrela-triângulo
A comutação da derivação de tensão reduzida para a tensão de suprimento não acarreta elevação da corrente	Dimensões superiores aos da chave estrela-triângulo
Variações gradativas dos <i>tapes</i> , para aplicar a chave adequadamente à capacidade do sistema de suprimento	

Figura 3 – Tabela comparativa da partida com chave compensadora

Partida através de reator [5]-[7]

Este método consiste em inserir um reator entre os terminais do sistema de alimentação e os terminais do motor. Este equipamento em série com o circuito do motor, reduz a corrente de partida ao provocar um aumento da impedância do sistema.

Vantagens	Desvantagens
Baixo Custo	Baixo Torque na partida
	Dificuldade de ajustar a tensão durante a partida
	Baixo fator de potência

Figura 4 – Tabela comparativa da partida através de reator

Partida através da conexão Dahlander

Partida específica de motores de indução, cuja construção possui cada enrolamento de fase constituído por duas bobinas ligadas em série, com o ponto médio acessível e os mesmo enrolamentos ligados em triângulo.

Variando-se o número de pólos, através da interligação das bobinas obtém-se uma velocidade variável.

A princípio, este motor é ligado na velocidade mais baixa e quando atinge valores constantes, é alternado para outra velocidade alterando o número de pólos quando atinge valores constantes. Este princípio se baseia na equação que relaciona a velocidade angular síncrona do motor, em rps, a frequência da rede, em Hz e o número de pólos.

$$\omega_s = \frac{2 \times f}{p} \text{ rps} \quad (1)$$

Vantagens	Desvantagens
Corrente de partida reduzida em 50 a 60%	Redução do torque de partida Aumento das perdas por aquecimento do motor Aumento das perturbações magnéticas

Figura 5 – Tabela comparativa da partida através da conexão Dahlander

Partida através de conversores de frequência

Neste método de acionamento de motores, utiliza-se um conversor de frequência para variar tensão e frequência nos terminais do motor, mantendo constante o fluxo magnético e o torque do motor.

O conversor, conforme o esquema da figura 6, é basicamente um módulo de retificação de corrente e um módulo inversor, em que o controle eletrônico inclui um regulador de frequência, cujo valor de referência é a tensão em corrente alternada de saída.

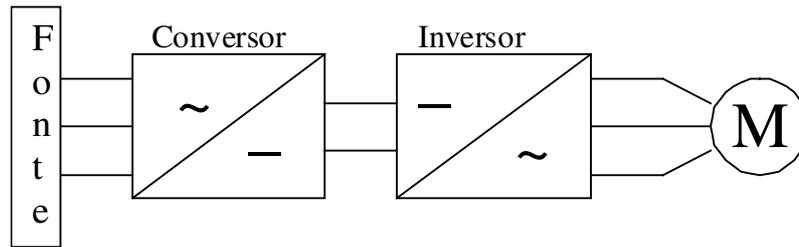


Figura 6 – Esquema de ligação para partida através de conversores de frequência

A potência do motor varia de acordo com a velocidade angular do motor. Este é função da frequência aplicada à máquina. Logo, diminuindo-se a frequência, reduz-se a velocidade e conseqüentemente a potência solicitada pelo eixo do motor.

Estas relações de proporcionalidade podem ser vistas nas equações a seguir.

$$\Phi = \frac{V_m}{4,44 \times f_m \times N} \quad T = K_t \times \Phi \times I_r \times \cos \phi \quad (2) \text{ e } (3)$$

$$\omega = 2 \times \pi \times f_m \quad P = T \times \omega \quad (4) \text{ e } (5)$$

Como a corrente é proporcional a tensão nos terminais do motor, a redução da tensão durante a partida implica em valores de corrente de partida próximas ou até mesmo iguais aos valores nominais.

2.1 Proposta de partida do método desenvolvido

No caso desenvolvido neste trabalho, a alimentação de um motor de indução com partida direta será função de um inversor. A alimentação de uma rede através de inversores é uma solução bastante usada em geração por fontes alternativas e em sistemas autônomos.

Para permitir a partida direta de um motor de indução trifásico em gaiola sem que ocorra uma sobrecarga acarretando danos ao inversor, este precisa entregar uma potência durante a partida do motor com valor um pouco maior se comparado com a potência nominal do motor.

Para suprir a demanda excedente durante a partida, será usado um *flywheel*, a ser alimentado pelo inversor, conectado em paralelo com o motor de indução.

2.2 Flywheel – Uma solução para armazenar e gerar energia

O *flywheel* é um dispositivo mecânico com significativo momento de inércia usado para o armazenamento de energia rotacional (ou energia cinética). Na Figura 7 é mostrado um exemplo de *flywheel* desenvolvido pela NASA para aplicações aeroespaciais. Os *flywheels* resistem às mudanças em suas rotações, o que ajuda a regular a rotação do eixo flutuante quando um torque é exercido sobre ele pela sua fonte de alimentação ou quando a carga colocada sobre ela é intermitente. *Flywheels* podem ser utilizados para produzir pulsos de potência muito elevada onde uma rede elétrica é incapaz de suprir tais demandas de potência. Um pequeno motor pode acelerar o volante entre os pulsos.

Esta energia cinética é dada pela equação

$$E_c = \frac{1}{2} \times I \times \omega^2 \quad (6)$$



Figura 7 – Foto de um *flywheel* desenvolvido pela NASA, retirada de [21]

Os primeiros *flywheels* construídos eram feitos de ferro ou aço e usavam mancais mecânicos. Com isso, o atrito e as forças centrífugas limitavam sua velocidade a até 60.000 rpm (máximo valor conseguido com o aço).

Em sistemas de armazenamento de energia por *flywheel* avançados, os rotores são feitos em fibra de carbono de alta resistência que rodam a velocidades de 200.000 a 500.000 rpm, em um recinto vazio (vácuo) e usa mancais magnéticos, compostos por supercondutores, ímãs permanentes ou híbridos, que fazem o *flywheel* girar sem tocar o seu eixo, eliminando o

atrito entre as partes. O uso de materiais como a fibra de carbono se deve a propriedade destes de ter maior densidade em um menor volume, além de maior resistência a tração.

No modelo proposto neste trabalho, o *flywheel* terá a função de suprir a sobrecarga imposta ao inversor durante o transitório de partida de um motor de indução gaiola. Para acelerar o *flywheel* e também para recuperar a energia armazenada, será usado um motor de indução gaiola. A velocidade de operação será limitada pela frequência nominal da rede alimentada pelo inversor (60Hz) e pelo número de pólos da máquina. A configuração deste modelo pode ser vista na figura 8.

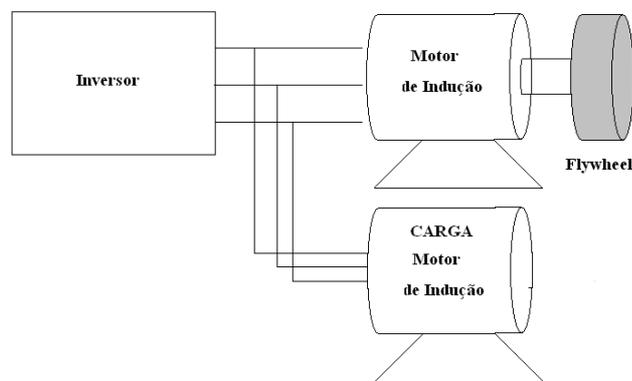


Figura 8 – Configuração Geral do Modelo

Para uma análise de quanto à partida de um motor pode sobrecarregar um inversor é preciso quantificar a demanda de potência necessária durante este instante. Para análise deste fluxo de potência, será usada a Teoria de Potência Instantânea (Teoria pq), proposta por Akagi et al. (1983) [20]. Esta teoria, que está descrita a seguir, propõe uma maneira de obter as potências ativa e reativa para qualquer situação, inclusive para as situações onde a teoria convencional não é adequada. Em condições de regime permanente, esta teoria propõe a divisão da potência em uma parcela que representa o valor médio e outra representando valores oscilantes. Nessas condições, os valores médios correspondem às definições tradicionais das potências ativa e reativa. Porém, ao contrário das definições tradicionais, as novas definições aplicam-se também em condições transitórias, como é o caso da partida de motores.

2.3 Teoria de Potência Instantânea – Teoria pq

Apesar do aparente consenso dos Engenheiros Eletricistas de que a Teoria de Potência Convencional é correta e válida para todos os casos, se for feito um estudo mais profundo ela se mostra fisicamente correta somente em casos monofásicos de regime permanente e sem distorções ou trifásicos balanceados. Isto se deve ao fato da teoria ter sido concebida para sistemas monofásicos e depois expandida para sistemas trifásicos.

Com a difusão do uso de equipamentos que introduzem harmônicos e provoca desbalanceamento de fase e ao fato de a potência reativa não estar exclusivamente relacionada à energia armazenada nos elementos reativos, a Teoria convencional perde coerência. Outro fato que faz a Teoria convencional perder coerência se deve ao fato desta teoria estar baseada em fasores e valores eficazes. Com isso ela se torna adequada apenas para sistemas com apenas uma frequência.

Desenvolvendo uma teoria básica de controle de filtros ativos de potência Akagi et al. (1983) [20], propôs a Teoria da Potência Ativa e Reativa Instantânea. Esta teoria primeiramente foi desenvolvida para sistemas trifásicos a 3 fios com uma pequena menção a sistema com neutro. Esta teoria foi estendida em detalhes para sistemas trifásicos a 4 fios por Watanabe et al. (1993) [19]. Esta teoria, também conhecida como teoria p-q, é apresentada resumidamente abaixo.

Como ponto de partida, é preciso transformar algebricamente as tensões e correntes, de um sistema trifásico (a-b-c) em um sistema de referência estacionário com as coordenadas ortogonais entre si (α - β -0). Uma transformação adequada para isto foi proposta pela Engenheira Edith Clarke em 1943 e ficou conhecida como Transformada de Clarke. A transformação direta do sistema a-b-c em α - β -0 é dada por:

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

A partir das transformações (7) e (8), podemos obter as potência real p , imaginária q e de seqüência zero p_0 descritas abaixo. Este cálculo está descrito no Apêndice A.

$$p_{3\Phi} = \begin{bmatrix} v_0 & v_\alpha & v_\beta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (9)$$

Para adequar a teoria proposta em [20] à Teoria Convencional, alterou-se o sinal para a potência imaginária q . Com isso a potência imaginária passou a ter valores médios positivos para correntes atrasadas em relação a uma tensão de seqüência positiva.

A potência ativa trifásica instantânea é dada pela equação abaixo, cuja componente de seqüência zero é indesejada pelo sistema elétrico convencional.

$$p_{3\Phi} = v_0 i_0 + v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta = p + p_0 \quad (10)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad p_0 = v_0 i_0 \quad (11) \text{ e } (12)$$

Em [20] sugeriu-se o uso de uma nova unidade para a potência q , o “Imaginary Volt-Ampere” ou Volt-Ampere Imaginário, IVA. O uso de uma unidade diferente foi sugerido para enfatizar uma diferença de interpretação física, pois, enquanto na Teoria Convencional, a potência reativa corresponde a uma parte da potência cujo valor médio é zero, nesta teoria a potência imaginária trifásica q instantânea corresponde à potência que existe nas fases individualmente, mas no conjunto trifásico não contribuem para a potência ativa instantânea trifásica.

As correntes e tensões dadas pela transformação de Clarke são instantâneas e genéricas podendo conter harmônicos e desequilíbrios. De uma maneira geral, devido a estas imperfeições, podemos escrever as potências instantâneas real, imaginária e de seqüência zero em função de componentes de valores médios e oscilantes, onde a “barra” representa valor médio e o “til”, valor oscilante:

$$p_0 = \bar{p}_0 + \tilde{p}_0 \quad (13)$$

$$p = \bar{p} + \tilde{p} \quad (14)$$

$$q = \bar{q} + \tilde{q} \quad (15)$$

3 Fluxo de potência durante a partida de motor de indução

Este capítulo apresenta uma análise da partida do motor de indução. Nele será discutida a demanda de potência ativa e reativa e como se comportam as formas de onda de tensão e corrente. Além disso, estuda-se o tempo necessário para que o motor atinja sua velocidade nominal e seu regime permanente e as variações da curva de torque de acordo com a característica da carga.

Um ensaio prático de partida de três motores com características distintas realizado no Laboratório de Máquinas Elétricas (LabMaq) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e simulações da partida de motores com características de torque distintas, usando o programa Matlab/Simulink foram ferramentas usadas para esta análise.

3.1 Fluxo de potência ativa e reativa

Para entender a quantidade de potência que um motor de indução exige da fonte, é preciso entender o circuito equivalente desse tipo de motor. O circuito equivalente se assemelha ao de um transformador, uma vez que os valores do rotor podem ser refletidos para o estator, assim como acontece com o primário e secundário do transformador. Um diagrama esquemático do referido circuito equivalente é mostrado na Figura 9.

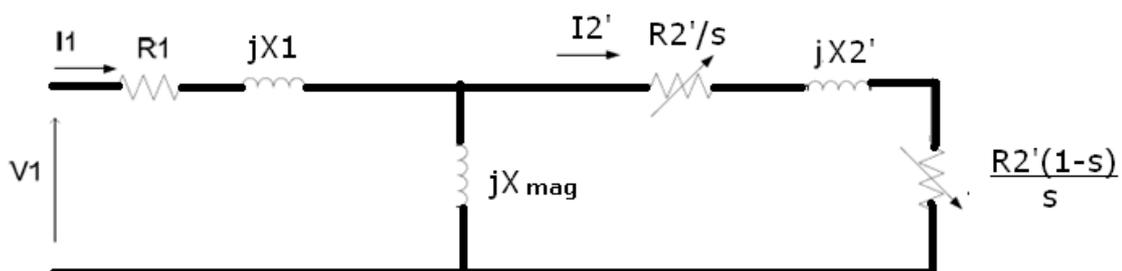


Figura 9 – Circuito equivalente do Motor de Indução

Onde:

R_1 e X_1 são os parâmetros do estator

X_{mag} é a reatância de magnetização

$\frac{R_2'}{s}$

s e X_2' são os parâmetros do rotor referidos ao estator

$\frac{R2'(1-s)}{s}$ representa a potência mecânica no eixo do motor

Sabendo-se que o motor parte com escorregamento $s=1$, pode-se traçar uma curva da potência de entrada variando o valor do escorregamento de $s=1$ até o seu valor em regime permanente. No motor de indução, a velocidade síncrona nunca será atingida em regime permanente, ou seja, o valor do escorregamento apesar de muito baixo nunca chega a ser nulo.

Liu, H. afirma em [10] que durante a partida direta de um motor de indução gaiola típico, a corrente chega a valores entre seis e sete vezes sua corrente nominal e o fator de potência varia entre 0,15 e 0,25. Isto se deve ao fato de que o motor tem natureza indutiva no momento da partida, pois precisa ter um fluxo suficiente para vencer sua inércia e produzir torque suficiente para a carga nele acoplada.

Já Mamede Filho, J. [5], afirma que durante a partida, o fator de potência varia em torno de 0,3 e 0,4.

Para comprovar esta situação e prever o quanto de potência ativa e reativa um motor de indução necessita durante a partida, foram feitas simulações com o Matlab/Simulink e uma experiência prática em laboratório. Os resultados e a análise destas experiências e simulações são descritas a seguir.

3.2 Simulação da partida de motores

Este ensaio foi modelado usando os recursos existentes no programa Matlab/Simulink. Os modelos utilizados para o ensaio estão descritos abaixo nas figuras 10 e 11, composto por um motor de indução com rotor gaiola, uma fonte trifásica ideal, medidores de tensão e corrente.

O ensaio de partida de motores foi feito para 3 (três) tipos de carga:

- Carga 1 - Torque constante
- Carga 2 - Com torque proporcional à velocidade
- Carga 3 - Com Torque proporcional ao quadrado da velocidade

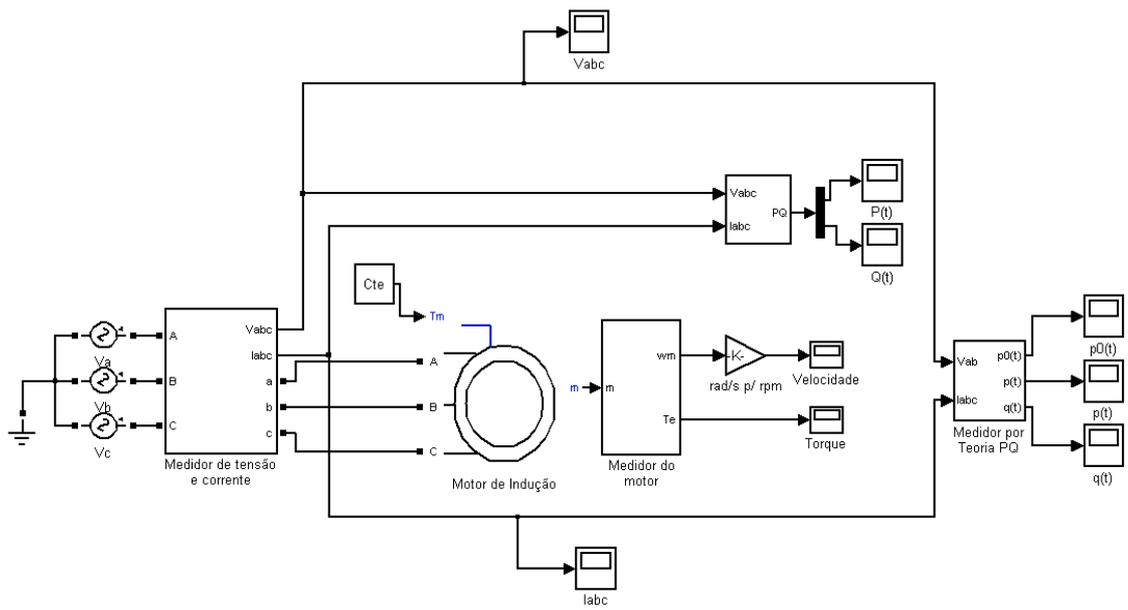


Figura 10 – Modelo do ensaio de partida para torque linear

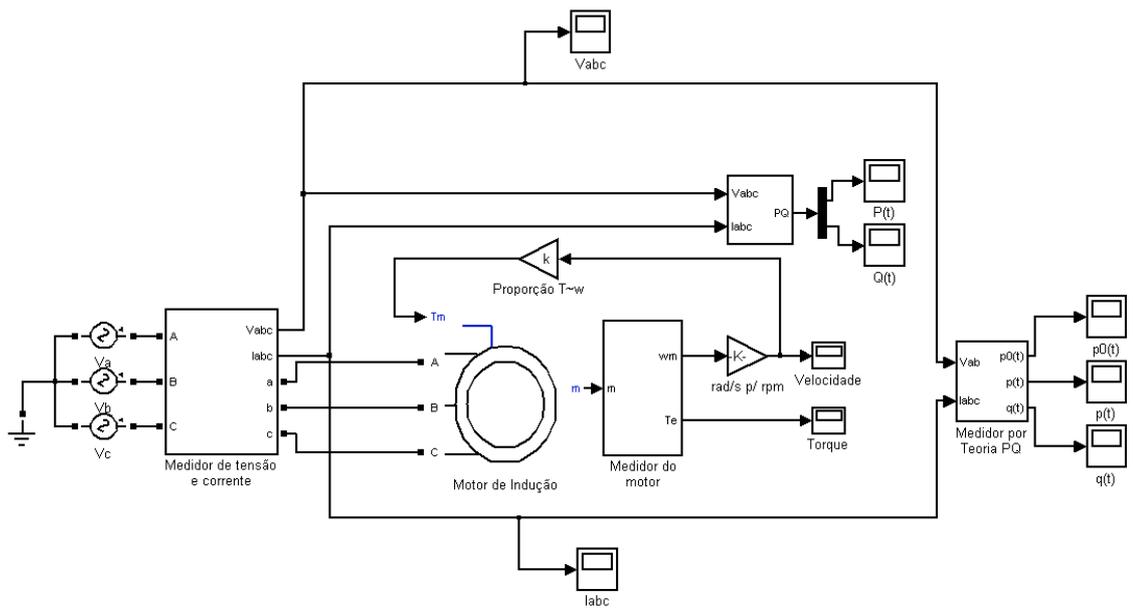


Figura 11 – Modelo do ensaio de partida para torque proporcional a velocidade

A figura 12 mostra as caixas de diálogo de configuração dos parâmetros do motor de indução.

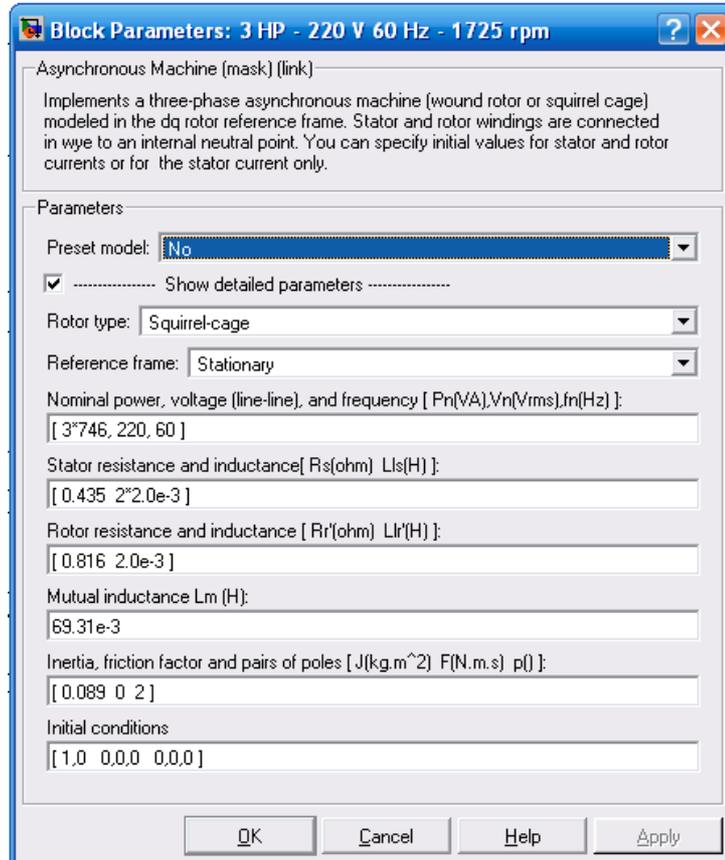


Figura 12 – Caixa de Diálogo do Motor de Indução

A caixa de diálogo da figura 13 é responsável pela parametrização da fonte.

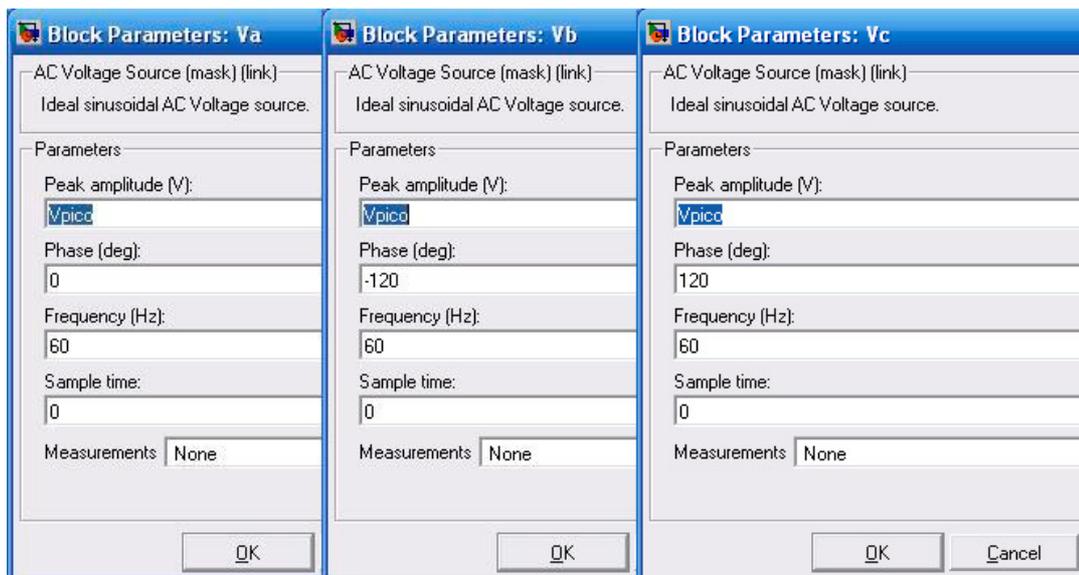


Figura 13 – Caixa de Diálogo da Fonte de Tensão

Para determinar as formas de onda das potências ativa e reativa, a Teoria pq foi utilizada (Figura 14) e comparada aos valores obtidos por medições feitas pelo modelo de medidor existente no Matlab/Simulink.

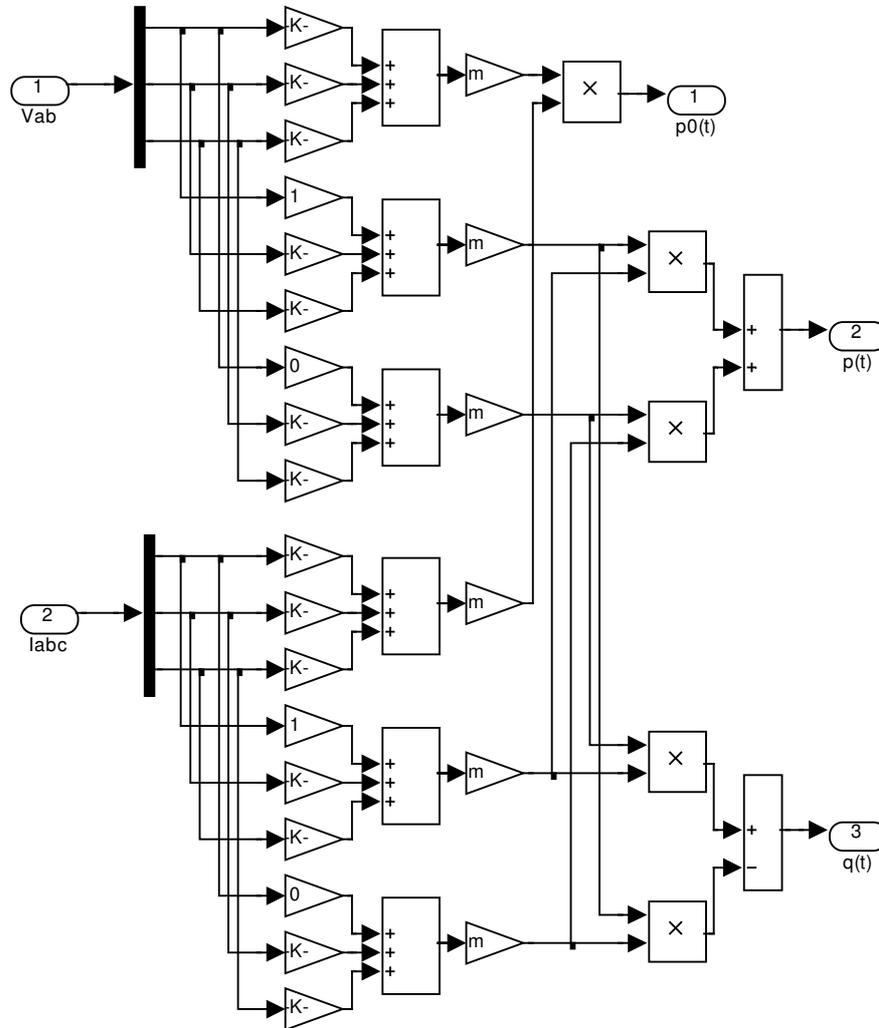


Figura 14 – Modelo da Teoria pq feita no Matlab/Simulink

Para cada simulação, foram traçadas as formas de onda da tensão e corrente; potência ativa e reativa; torque e velocidade. As formas de onda discutidas a seguir foram obtidas na simulação da carga 2 (torque proporcional a velocidade). Todas as formas de onda traçadas nas simulações das 3(três) cargas podem ser vistas no Anexo A – Resultados Complementares da Simulação da Partida de Motores pelo Matlab/Simulink.

Primeiramente é importante notar a defasagem da corrente em relação à tensão, como mostrado na figura 15. O atraso da corrente comprova o já citado caráter indutivo do motor em sua partida. A figura 16 mostra o comportamento das tensões.

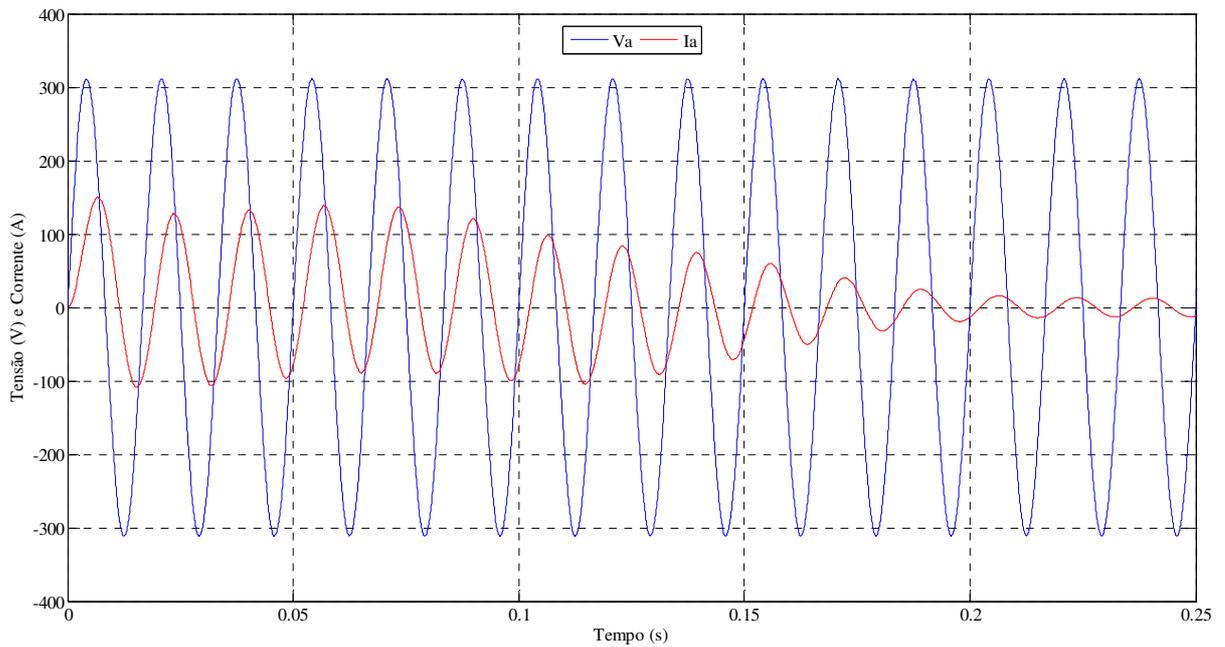


Figura 15 – Forma de onda da tensão e da corrente - Carga 2

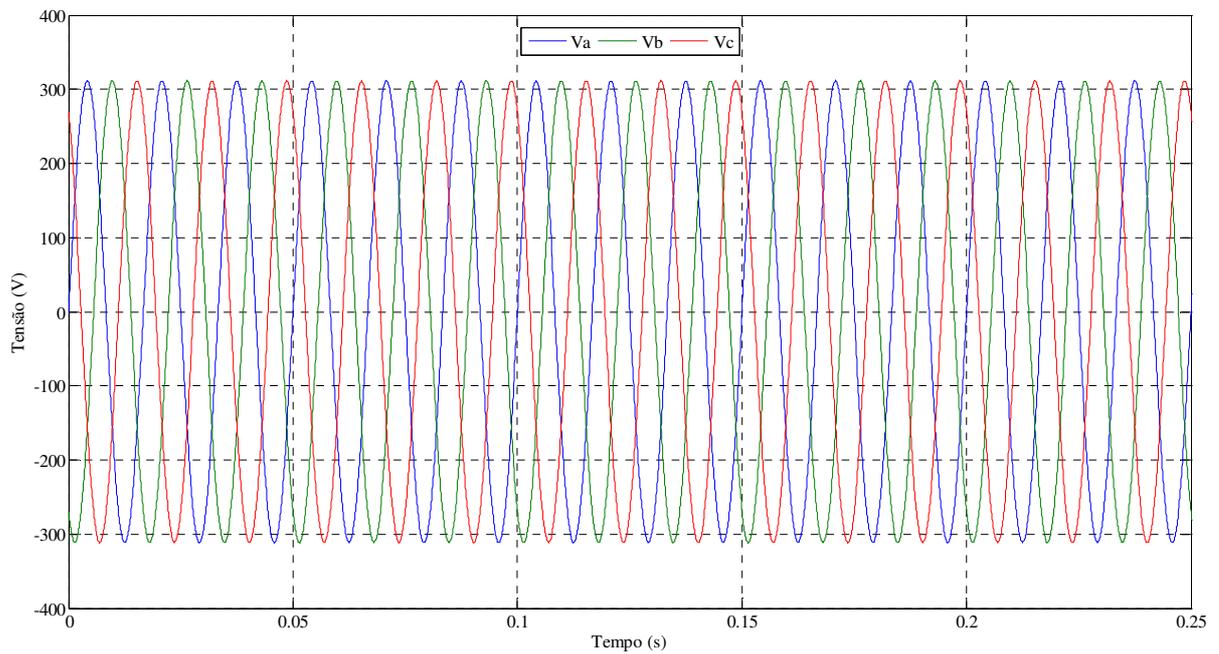


Figura 16 – Forma de onda das tensões de linha aplicadas ao motor – Carga 2

A figura 17 mostra a variação significativa entre a corrente na partida e após atingir o regime permanente, chegando neste caso a um valor aproximado de 6(seis) vezes maior.

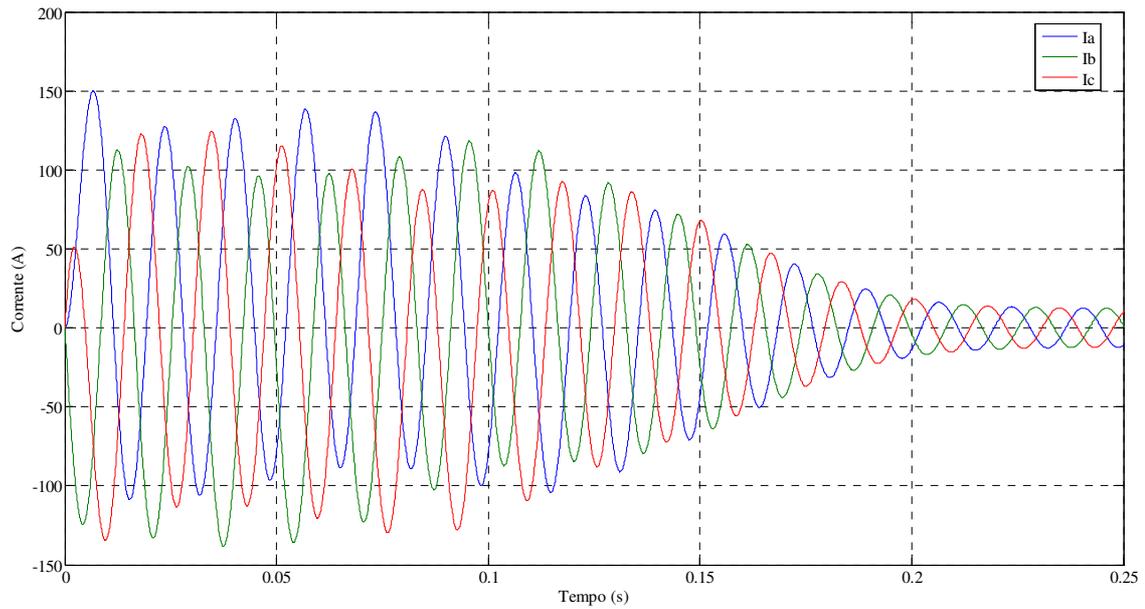


Figura 17 – Formas de onda das correntes de linha – Carga 2

Em relação às potências, vale afirmar que, assim como descrito no capítulo anterior sobre a Teoria das Potências Instantâneas (Teoria pq), a potência de sequência zero possui valores muito baixos, que podem ser aproximados de zero.

A forma de onda da potência reativa (Figura 18) mostra o caráter indutivo do motor durante a sua partida, uma vez que, o valor da potência reativa ao longo do tempo é quase sempre maior que a potência ativa.

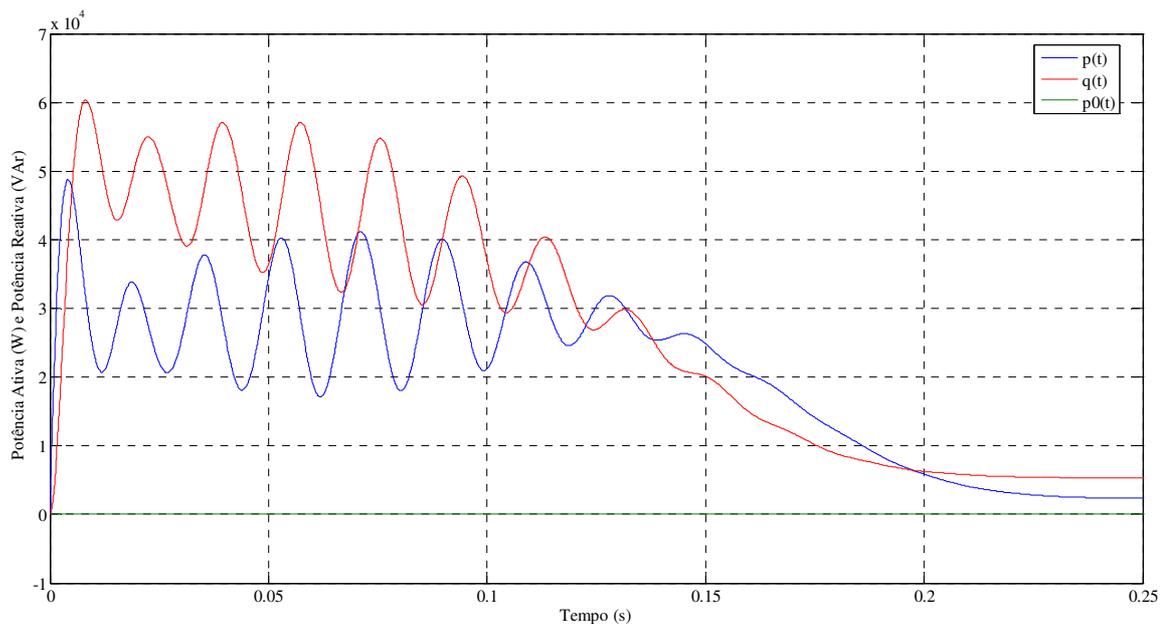


Figura 18 – Formas de onda da Potência Ativa $p(t)$, Potência de Sequência Zero $p_0(t)$ e Potência Reativa $q(t)$ – Carga 2

As formas de onda do torque eletromagnético e da velocidade podem ser vistos nas figuras a seguir. Note que o torque e a velocidade atingem valores próximos ao nominal quando o motor atinge o regime permanente.

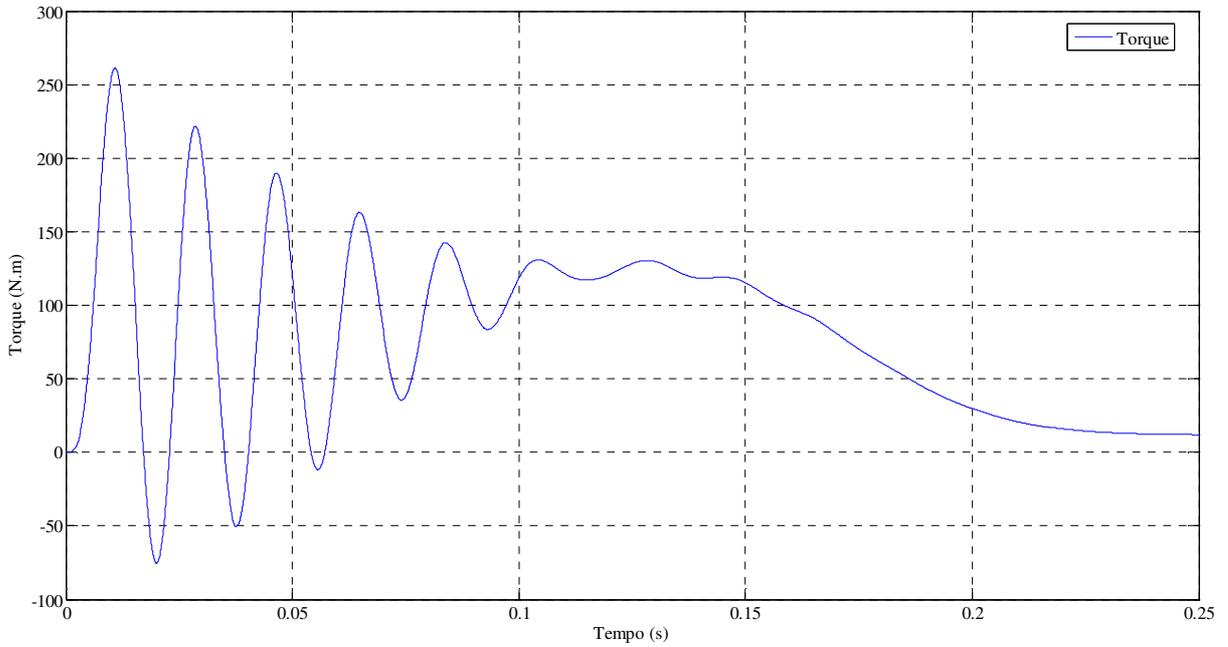


Figura 19 – Forma de onda do Torque eletromagnético – Carga 2

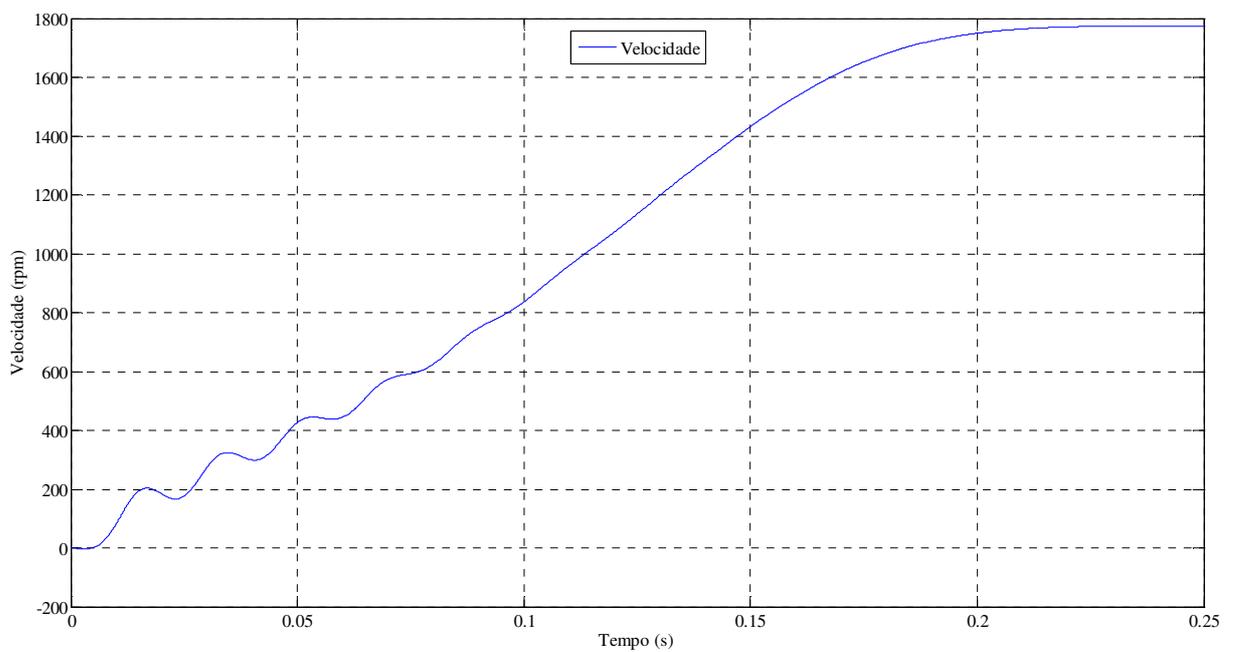


Figura 20 – Forma de onda da velocidade – Carga 2

Ao comparar as formas de onda obtidas em cada simulação, percebe-se que cada carga acoplada ao motor tem curvas de potência e velocidade que se diferem nas amplitudes e no tempo para atingir o regime permanente. Isto pode ser observado nas duas figuras a seguir, onde são mostrados os resultados (potências e velocidade) de cada simulação em um mesmo gráfico.

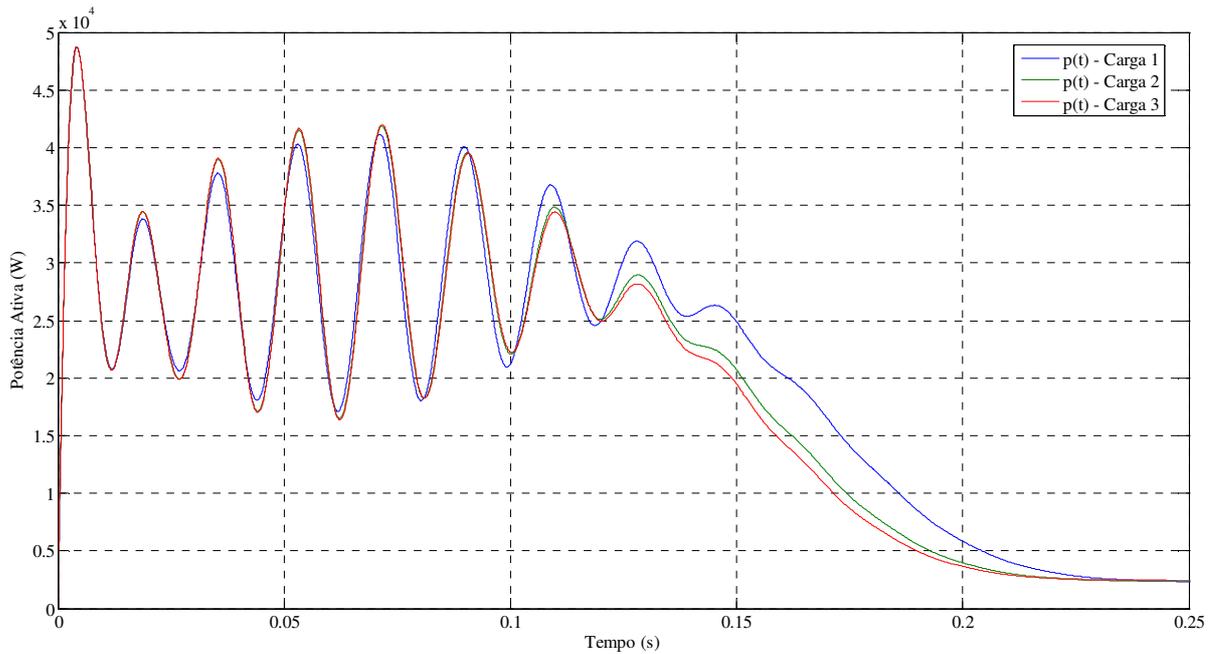


Figura 21 – Formas de onda das Potências Ativa $p(t)$ de cada simulação

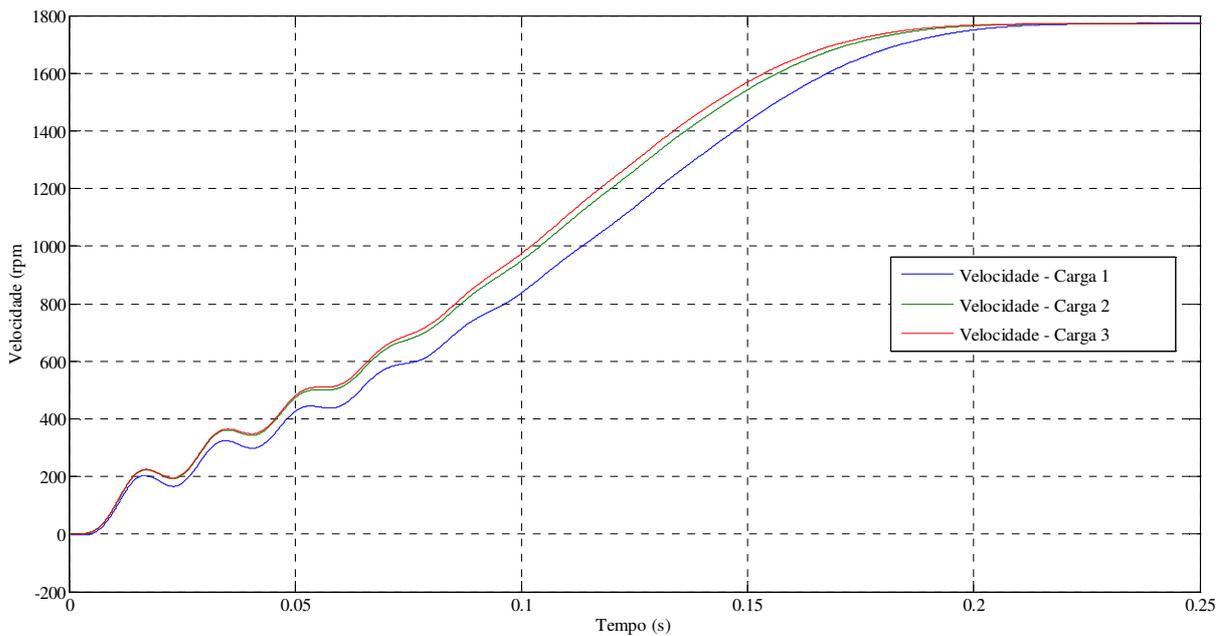


Figura 22 – Formas de onda das velocidades das simulações

3.3 Ensaio de partida de motores

Para validar os resultados obtidos na simulação, foram feitos ensaios de partida de 3 (três) motores em vazio, cujos dados de placa são mostrados na figura 23.

	Motor 1	Motor 2	Motor 3
<i>Fabricante</i>	WEG	Brasil	WEG
<i>Modelo</i>	0299 AR43317	3116596 tipo SM 514	MOD 905 483
<i>Potência Nominal</i>	6,0 HP	5,0 HP	2 CV
<i>Tensão Nominal (V)</i>	220 / 380 / 440	220 / 440	220 / 380 / 440
<i>Corrente Nominal (A)</i>	16,0 / 9,26 / 8,00	14,0 / 7,0	6,5 / 3,8 / 3,3
<i>Frequência nominal (Hz)</i>	60	60	60
<i>Velocidade nominal (rpm)</i>	1730	1755	1725
<i>I_p/I_n</i>	7,4	-	6,3
<i>Fator de serviço</i>	1,15	-	1,15

Figura 23
a 23
-
Dados de placa dos Moto

res de Indução

Este ensaio foi realizado no dia 1º de outubro de 2008 no Laboratório de Máquinas Elétricas do Departamento de Engenharia Elétrica (DEE) da Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ).

Montou-se uma bancada para este ensaio com a configuração conforme a figura 24. Fotos desta experiência podem ser observadas no Anexo C - Fotos do Ensaio de Partida no Laboratório.

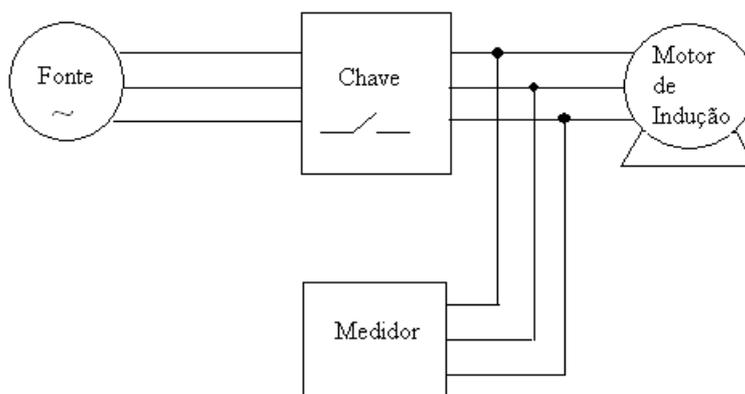


Figura 24 – Configuração da Bancada da Experiência de Partida de Motor de Indução

O medidor utilizado neste ensaio (Qualímetro ION 7650 da Schneider Electric) gerou uma planilha com dados de tensão e corrente e suas formas de onda. Tratando-se estes dados e

usando a Teoria pq descrita anteriormente, foi possível chegar a valores de potência ativa e reativa instantânea e suas formas de onda. Os resultados do Motor1 serão utilizados no estudo por mais se aproximar dos valores obtidos nas simulações, enquanto os outros resultados podem ser vistos no Anexo B – Resultados Experimentais dos Ensaio de Partida no Laboratório.

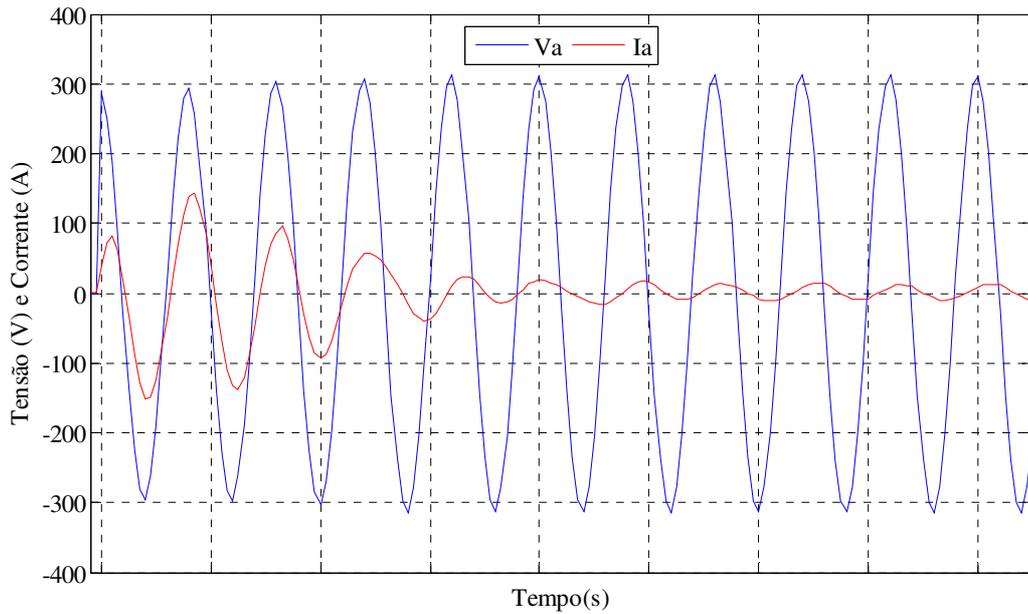


Figura 25 – Formas de onda da tensão e da corrente

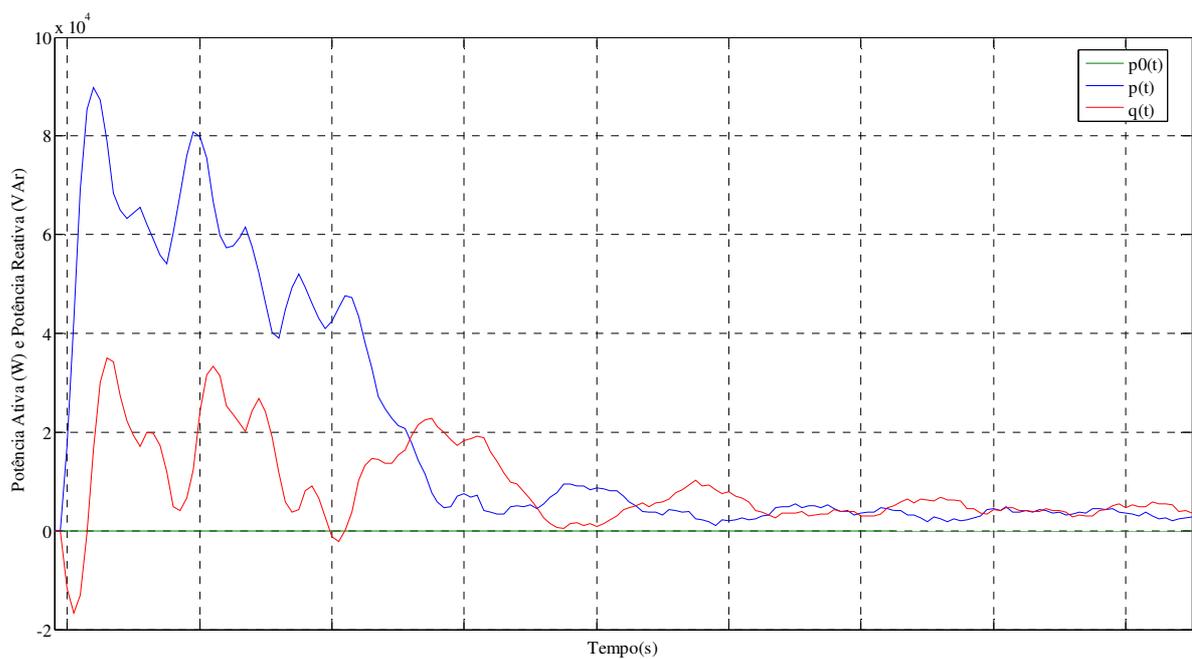


Figura 26 – Formas de onda da Potência Ativa $p(t)$, Potência de Seqüência Zero $p_0(t)$ e Potência Reativa $q(t)$

Comparando-se os resultados obtidos nas simulações do item 3.2 e no ensaio do item 3.3, ocorre uma inversão na potência com maior valor. A potência reativa é maior na simulação com o Matlab/Simulink (item 3.2), enquanto no ensaio de laboratório (item 3.3) a potência ativa é a maior potência. Somado a isto, em alguns trechos da figura 18 (formas de onda das potências do item 3.2), a potência ativa é maior que a potência reativa, conseqüentemente, o fator de potência nestes trechos é maior. Isso coloca em dúvida as afirmativas de que, na partida, o motor tem caráter indutivo e conseqüentemente possui um fator de potência baixo.

4 Modelo de controle de sobrecarga com uso de *Flywheel*

Em [20] foi proposto um método para minimizar a sobrecarga em um sistema isolado alimentado por células de combustível através de um *flywheel*.

Este armazena energia em momentos onde a capacidade do sistema isolado não está sendo utilizada. Nos casos onde a capacidade do sistema não é suficiente e passa a operar em sobrecarga, o *flywheel* passa a gerar energia em conjunto com o sistema e com isso supre a sobrecarga do sistema. Ao minimizar a sobrecarga, evitam-se danos aos equipamentos ligados ao sistema, como inversores.

A carga/descarga do *flywheel* é feita através do controle da frequência do inversor. Quando o sistema está funcionando com frequência nominal, ele é acelerado e passa a armazenar energia. Em casos de sobrecarga, esta frequência tem seu valor reduzido provocando uma desaceleração no *flywheel*. Este passa a funcionar como um gerador, alimentando a carga junto com as células de combustível.

Na modelagem proposta neste trabalho, o *flywheel* suprirá a sobrecarga na partida de um motor de indução alimentado por um sistema eólico. Enquanto em [20], o controle da frequência é feito controlando o fluxo de potência através da corrente, nesta modelagem o controle é feito diretamente pela potência. Este modelo foi proposto utilizando os recursos existentes no programa Matlab/Simulink.

4.1 Controle da frequência

No modelo, o controle de frequência foi feito com o intuito de não deixar o valor da potência ativa do inversor ultrapassar 50% a mais do que a potência de entrada nominal do motor, pois acima deste valor, foi considerado que o inversor teria uma sobrecarga. A representação do Controlador de Frequência do modelo proposto, montado no Matlab/Simulink, pode ser visto na figura 27 junto com o controle através da potência ativa, representado pelo bloco “Controlador”.

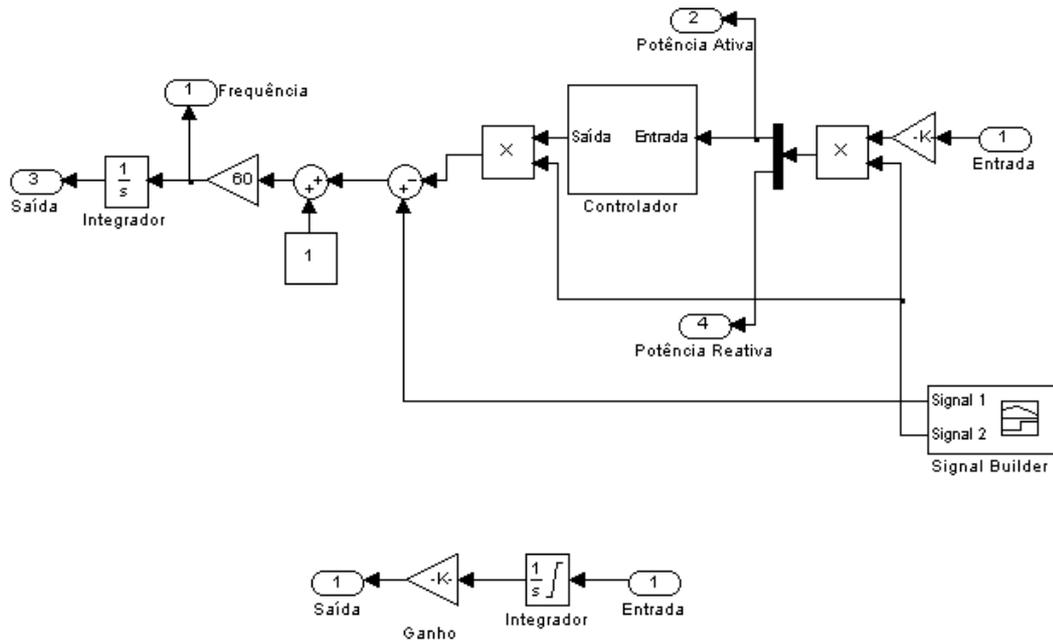


Figura 27 – Controle da frequência através da Potência Ativa da Fonte

Quando ocorre o acionamento do motor, em $t=1s$, o sinal 1 (gráfico em azul da figura 28) do gerador de sinais gera uma rampa que faz o valor da frequência atingir 75% do seu valor nominal em $t=0,01s$. Com isso o *flywheel*, passa a gerar energia auxiliando o inversor na alimentação do motor. A partir daí, o sinal 2 (gráfico em roxo da figura 28) do gerador passa a controlar a frequência pelo valor da potência ativa para que o *flywheel* continue gerando energia, impedindo assim uma sobrecarga no inversor.

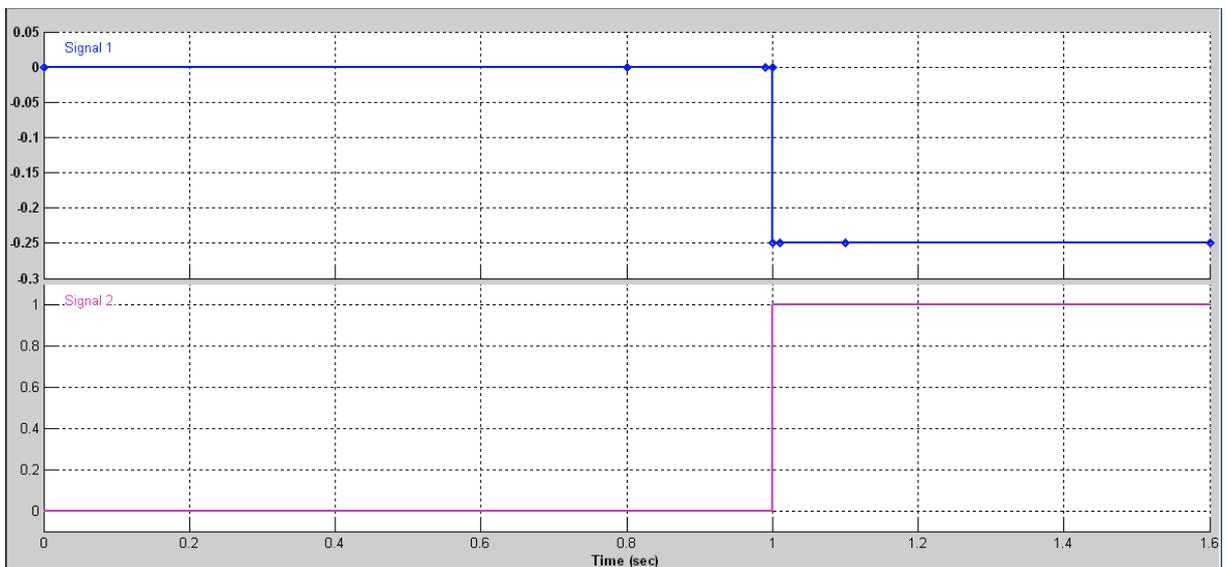


Figura 28 – Formas de onda do gerador de sinais

O integrador no final do controle é devido ao fato de que a velocidade angular é função da derivada da posição:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f = \frac{d\theta}{dt} \quad (16)$$

Quando a frequência é constante e considerando o ângulo inicial igual a zero, chega-se a igualdade $\omega t = \theta$. Como neste caso a frequência é uma função do tempo, temos que:

$$\int \omega \cdot dt = \int 2 \cdot \pi \cdot f \cdot dt = \int d\theta \quad (17)$$

Considerando-se o ângulo inicial seja igual a zero, obtêm-se:

$$\theta = \int 2 \cdot \pi \cdot f \cdot dt = 2 \cdot \pi \cdot \int f \cdot dt \quad (18)$$

Logo, as funções das tensões para uma frequência constante e para uma frequência variável são dadas, respectivamente, pelas equações:

$$v(t) = V \text{sen}(\omega t + \phi) \quad (19)$$

$$v(t) = V \text{sen}[(2 \cdot \pi \cdot \int f \cdot dt) + \phi] \quad (20)$$

4.2 Inversor

Num sistema eólico, a geração se dá através de aerogeradores ligados a inversores. Porém, no modelo proposto, este sistema será representado por uma fonte de tensão de frequência e amplitude controladas. Este ajuste na tensão é feito através de um gerador de sinais que, durante a partida do motor, provoca um afundamento no valor da tensão e retoma o seu valor nominal no regime permanente. A fonte de tensão é mostrada na figura 29.

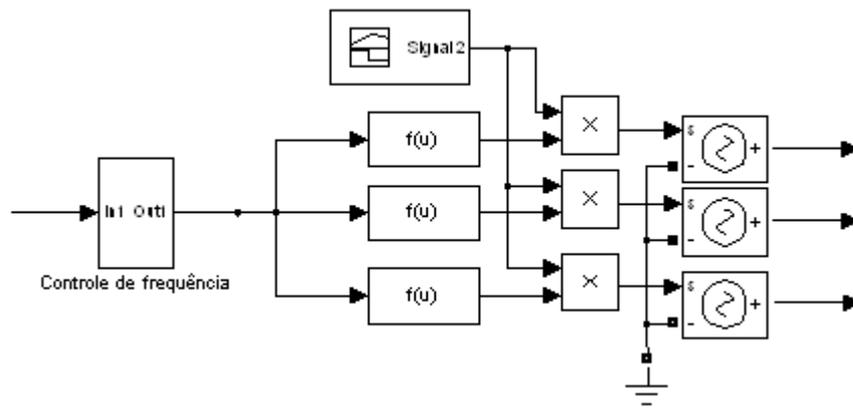


Figura 29 – Fonte controlável simulando um Inversor

Os blocos de função $f(u)$ estão representando a função da tensão para frequência variável, já demonstrada anteriormente na equação 20, tendo os seguintes valores:

$$V_a(t) = 311 \cdot \text{sen}[2 \cdot \pi \cdot u(t)]$$

$$V_b(t) = 311 \cdot \text{sen}[2 \cdot \pi \cdot u(t) - 120\pi/180] \quad (21), (22) \text{ e } (23)$$

$$V_c(t) = 311 \cdot \text{sen}[2 \cdot \pi \cdot u(t) + 120\pi/180]$$

4.3 Flywheel acoplado ao Motor de Indução

O modelo utilizado para o *flywheel* acoplado ao motor de indução com rotor de gaiola é o modelo de máquina assíncrona existente no programa Simulink/Matlab, mostrado na figura 30.

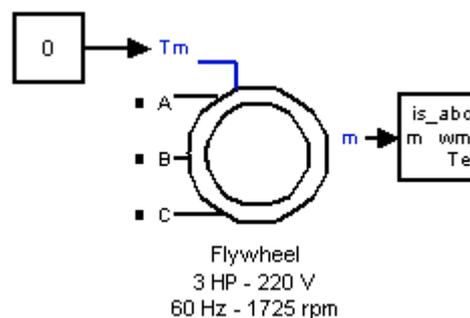


Figura 30 – Modelo de Máquina Assíncrona do programa Matlab/Simulink

A figura 31 mostra a caixa de diálogo de parametrização do modelo do motor de indução.

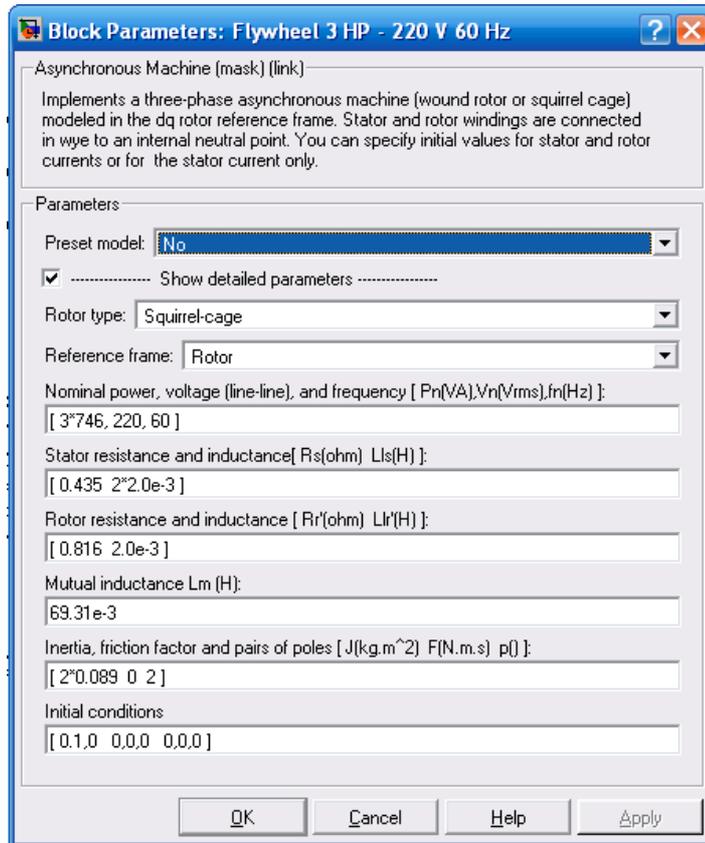


Figura 31 – Caixa de diálogo da Máquina Assíncrona com os valores usados na modelagem

O torque mecânico (T_m) neste caso é zero pois a máquina não possui carga acoplada a ela, ou seja, funciona em vazio.

O bloco conectado ao *flywheel* é responsável pela separação dos sinais dos parâmetros coletados do motor. Na modelagem, somente os parâmetros Corrente do Estator (I_{s_a} , I_{s_b} e I_{s_c}), Velocidade do rotor (ω_m) e Torque Eletromagnético (T_e) são importantes.

4.4 Carga – Motor de Indução com rotor gaiola

A carga está representada por um motor de indução cujos parâmetros estão reproduzidos na caixa de diálogo do programa Matlab/Simulink, da figura 32. Estes parâmetros são os mesmos utilizados na simulação de partida direta na seção 3.2.

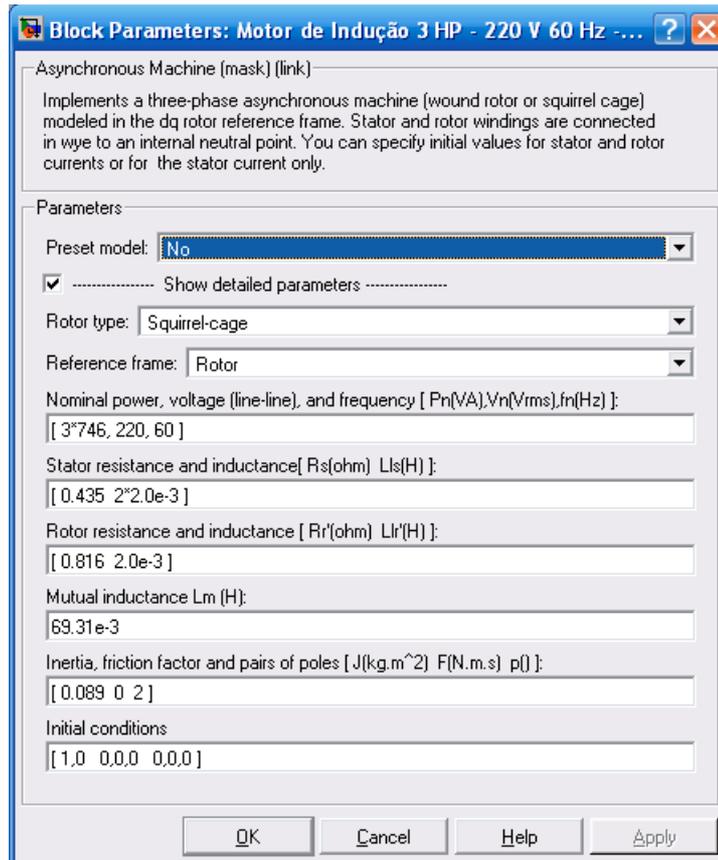


Figura 32 – Caixa de diálogo da Máquina Assíncrona.

A carga terá seu torque proporcional à velocidade, conforme visto na figura 33.

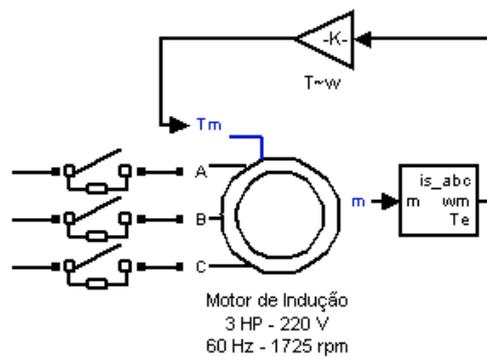


Figura 33 – Modelo de Máquina Assíncrona usado como Carga com Torque proporcional a Velocidade

O bloco conectado ao motor é responsável pela separação dos sinais dos parâmetros coletados do motor. Na modelagem, somente os parâmetros Corrente do Estator (I_{s_a} , I_{s_b} e I_{s_c}), Velocidade do rotor (ω_m) e Torque Eletromagnético (T_e) são importantes.

4.5 Modelo Proposto

A figura 35 apresenta todo o esquema da simulação do modelo proposto, composto do inversor (representado pela fonte de tensão), os controles de tensão e frequência, os medidores além do *flywheel* e a carga, representada por um motor de indução.

Inicialmente, apenas o *flywheel* está funcionando e sendo alimentado pela fonte, armazenando energia a ser entregue ao motor de indução durante sua partida.

O controle de tensão provoca um afundamento na tensão no tempo $t=0,5s$, mantendo-a em 40% de seu valor, conforme a figura 34.

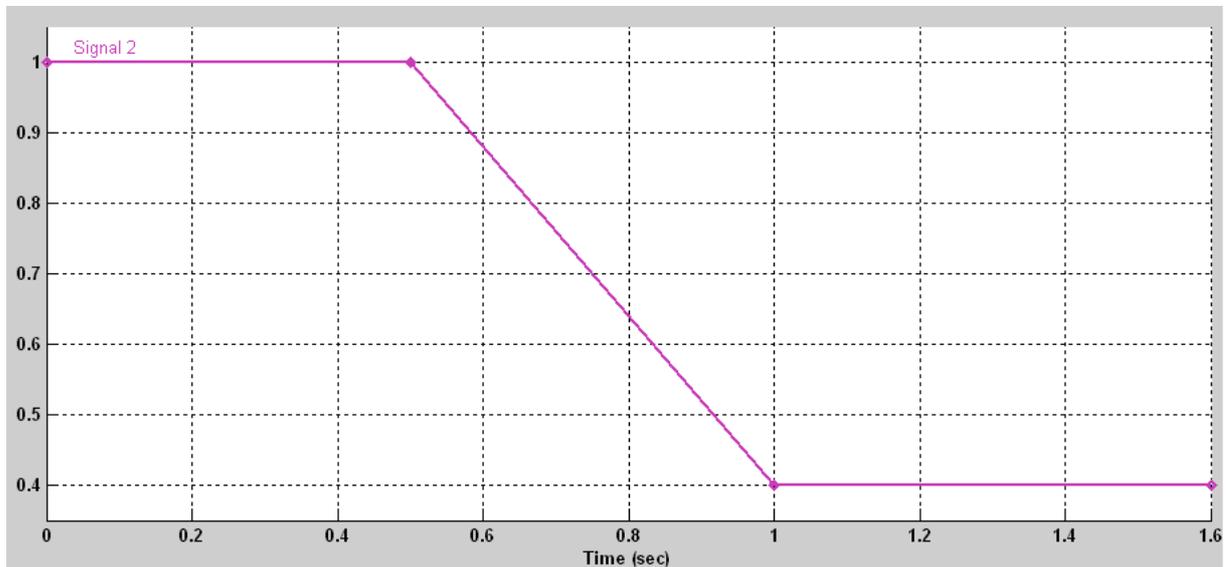


Figura 34 – Forma de onda do gerador de sinais do controle de tensão

No tempo $t=1s$, o motor de indução é acionado e o controle da frequência passa a ajustar os valores de tal modo que o *flywheel* possa suprir a demanda de potência junto com o inversor, sem que haja sobrecarga neste equipamento. Isto é, a potência gerada não seja 50% maior que a potência de entrada nominal do motor.

Como nos parâmetros do motor, a potência nominal dada se refere à potência mecânica, foi calculado um valor para a potência de entrada nominal que será utilizada como base para os cálculos em pu a partir das potências ativa e reativa durante o regime permanente da figura 57, Anexo A - Resultados Complementares da Simulação da Partida de Motores pelo Matlab/Simulink.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 5,8kVA \quad (24)$$

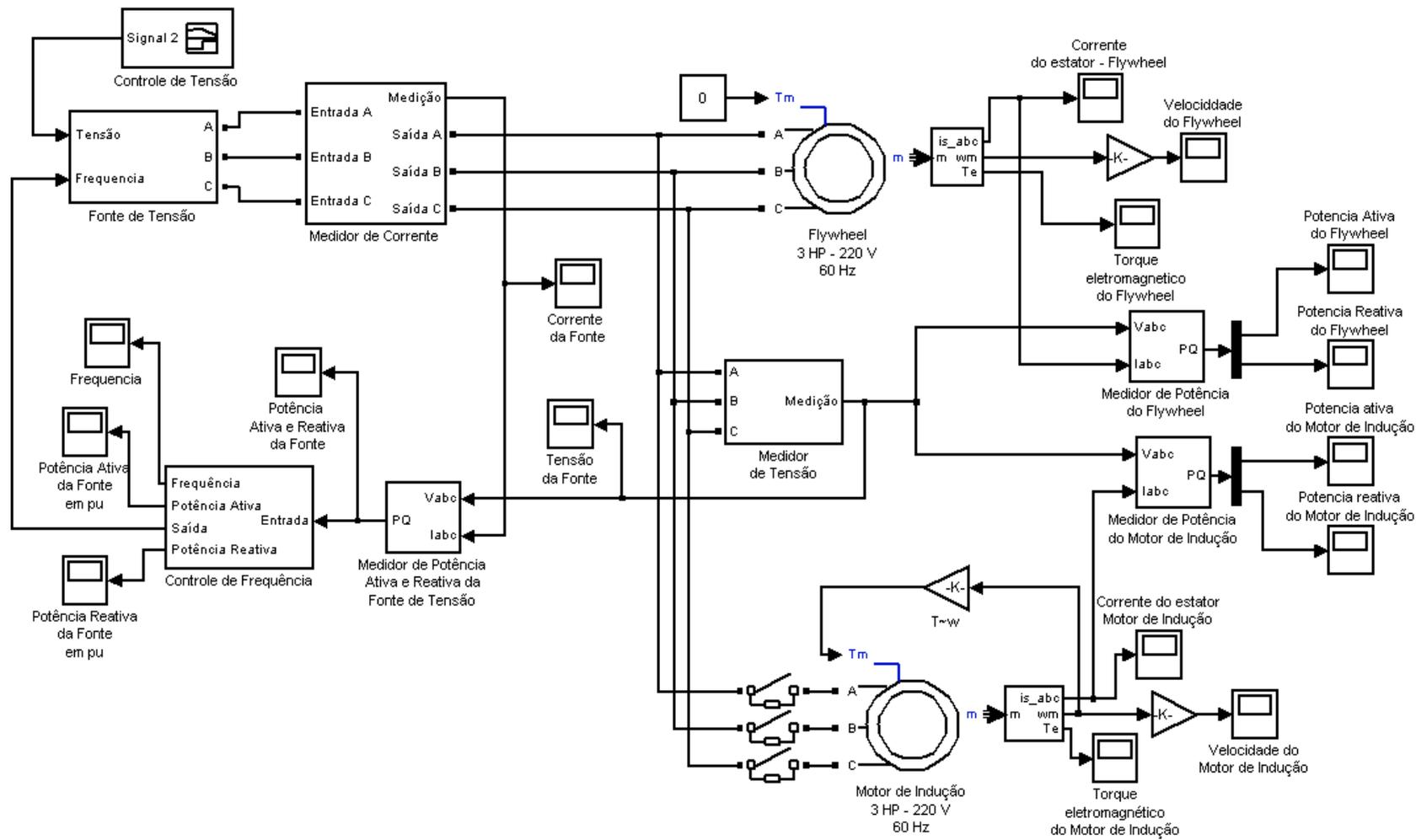


Figura 35 – Modelo do Sistema

4.6 Resultados obtidos

Nesta parte serão mostrados e discutidos todos os resultados obtidos da simulação do modelo proposto. Serão apresentados gráficos de frequência, tensão, corrente, potências, velocidade e torque.

Como convenção, será utilizado o valor positivo para toda potência consumida e o valor negativo para toda potência gerada.

Para efeito de validação do modelo, iremos comparar as formas de onda dos motores dos seguintes casos:

Caso 1 – Simulação da partida direta do motor descrita na seção 3.2

Caso 2 – Simulação do modelo proposto

As curvas, quando comparadas, serão identificadas como caso 1 e caso 2 conforme acima.

A figura 36 mostra as formas de onda das correntes obtidas na simulação do modelo proposto.

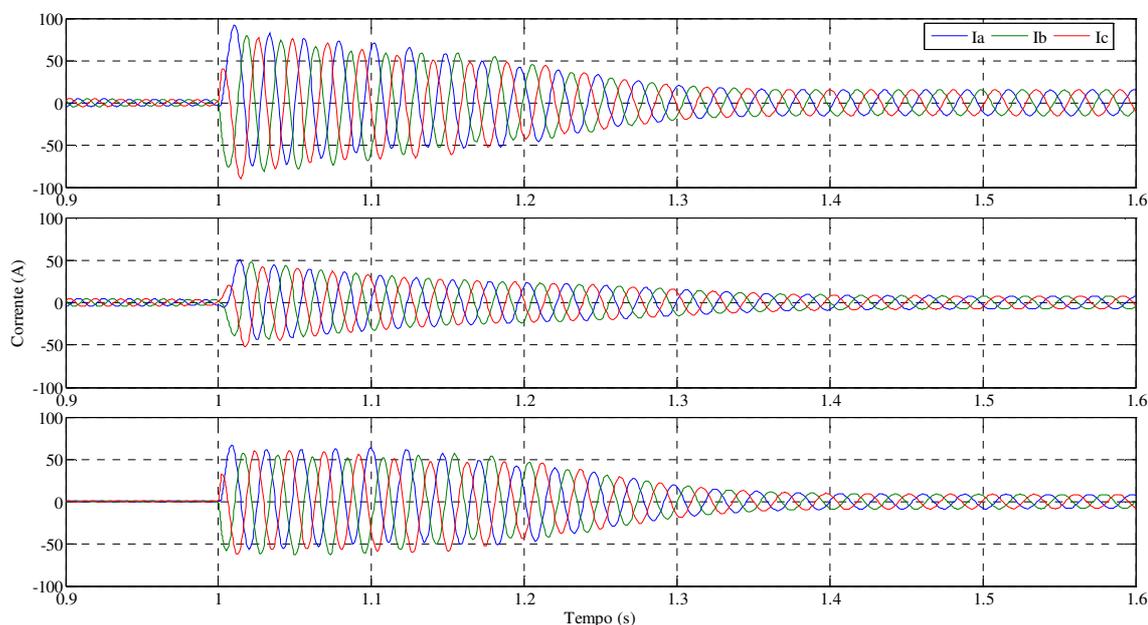


Figura 36 – Formas de onda das correntes de linha do inversor, do *flywheel* e do motor, respectivamente.

A figura 37 apresenta uma comparação entre os casos citados no início da seção. Percebe-se que além de precisar de mais tempo para atingir o regime permanente, o motor na simulação do modelo proposto (caso 2) tem uma corrente máxima bem menor se comparada a corrente máxima da simulação da partida direta (caso 1).

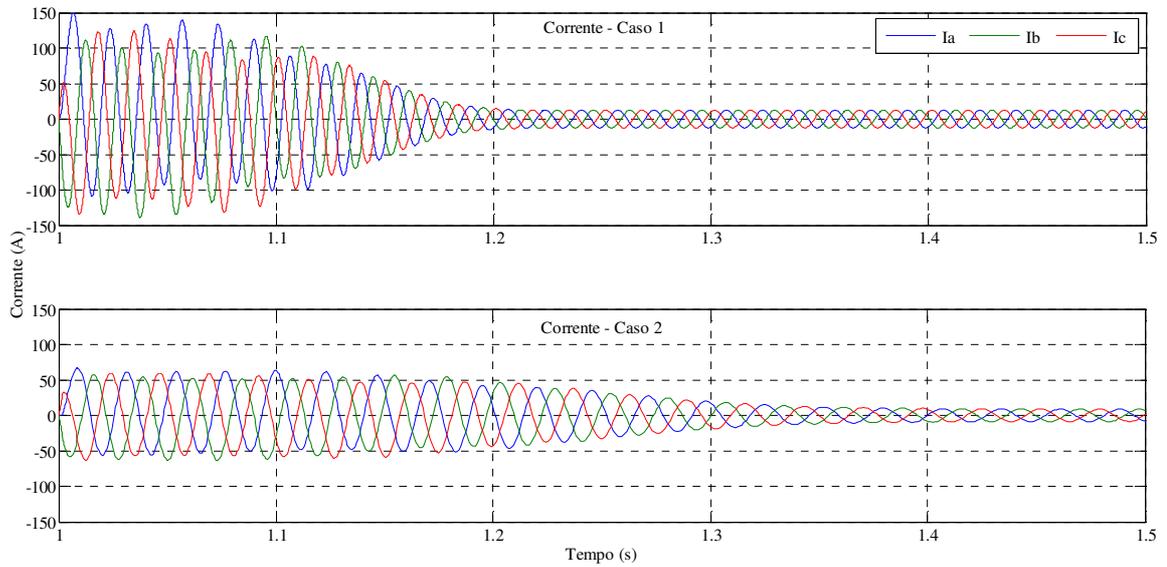


Figura 37 - Comparação entre as correntes de linha do Motor - Caso 1 x Caso 2

As figuras 38 e 39 apresentam as formas de onda da tensão e da frequência quando é aplicado o controle ao circuito para o acionamento do motor de indução. Enquanto a figura 40 mostra as formas de onda da velocidade do flywheel e do motor de indução

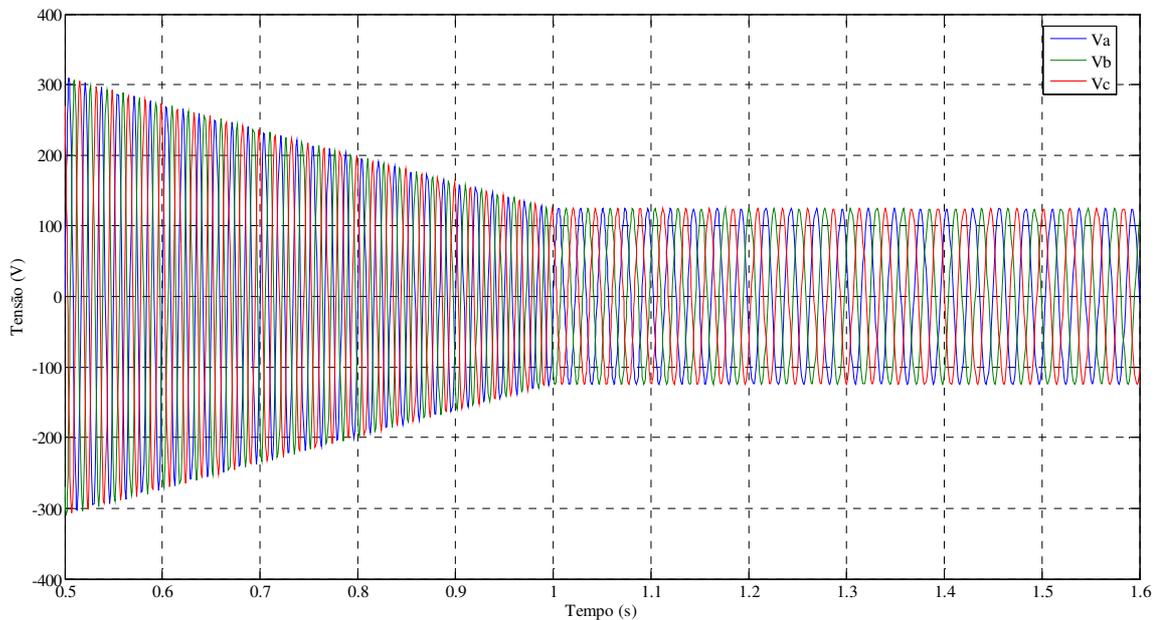


Figura 38 – Formas de onda da tensão aplicada ao *Flywheel* e ao Motor de Indução

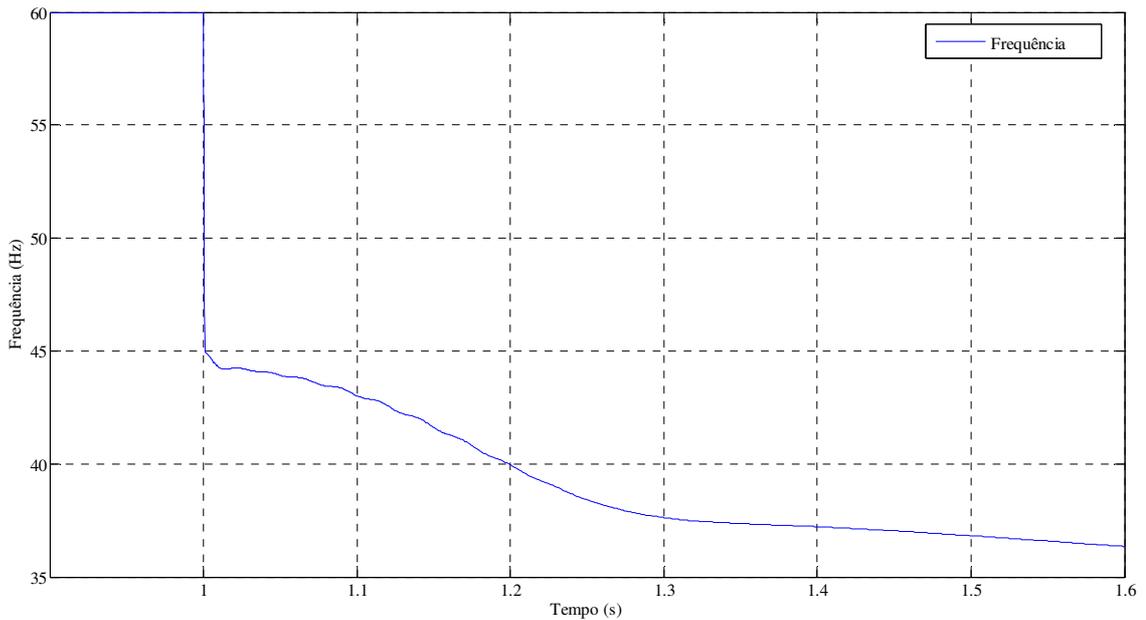


Figura 39 – Gráfico da Frequência x Tempo

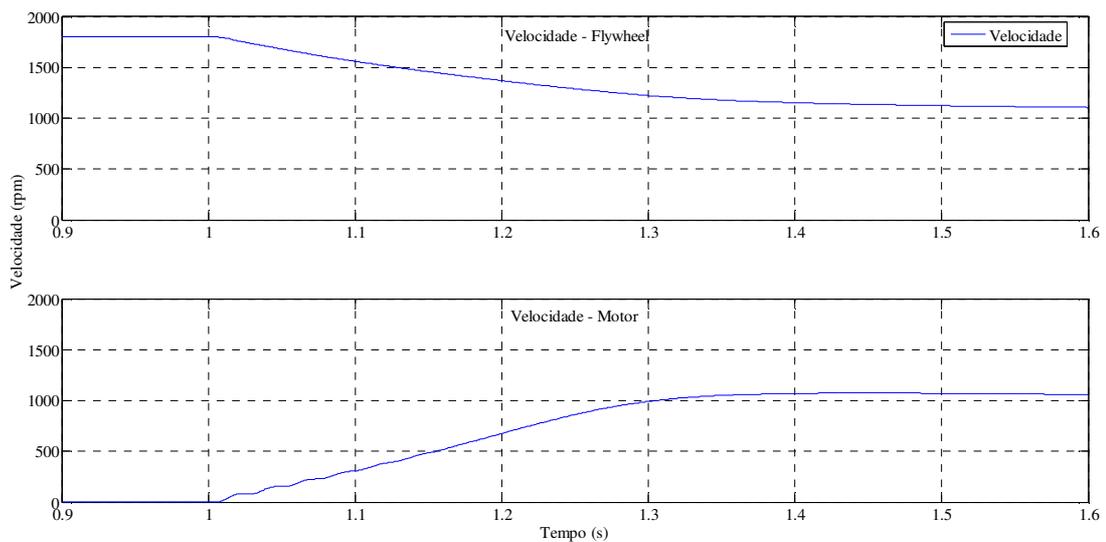


Figura 40 – Gráfico Velocidade do *Flywheel* e do Motor de Indução x Tempo

Na simulação do modelo proposto, devido à variação da frequência, figura 39, o motor demora um tempo maior do que à frequência constante (caso da simulação de partida do item 3.2) para atingir um regime permanente.

O torque do flywheel e do motor de indução na simulação do modelo proposto é observado na figura 41.

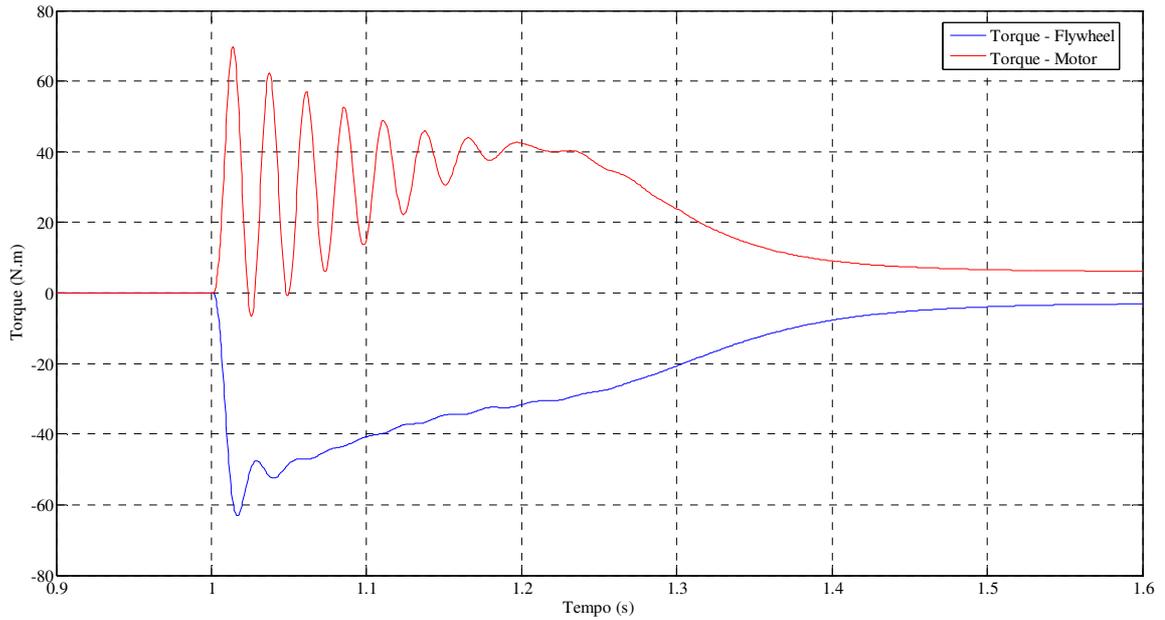


Figura 41 – Gráfico Torque do *Flywheel* e do Motor de Indução x Tempo

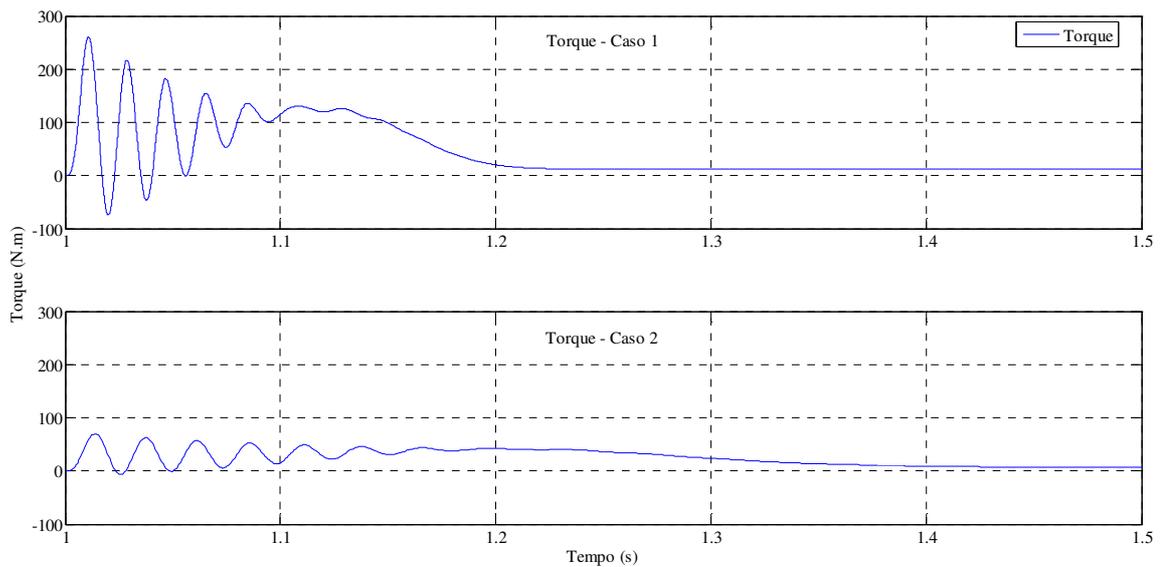


Figura 42 - Comparação entre os torques do Motor – Caso 1 x Caso 2

A explicação para o torque do caso 2 ser bem menor que o torque do caso 1, que pode ser visto na figura 42, está no fato de que no modelo proposto (caso 2) ocorrem reduções na tensão e na corrente aplicadas ao motor.

A potência ativa fornecida pelo inversor e pelo flywheel, além da potência ativa consumida pelo motor de indução na partida podem ser vistas na figura 43.

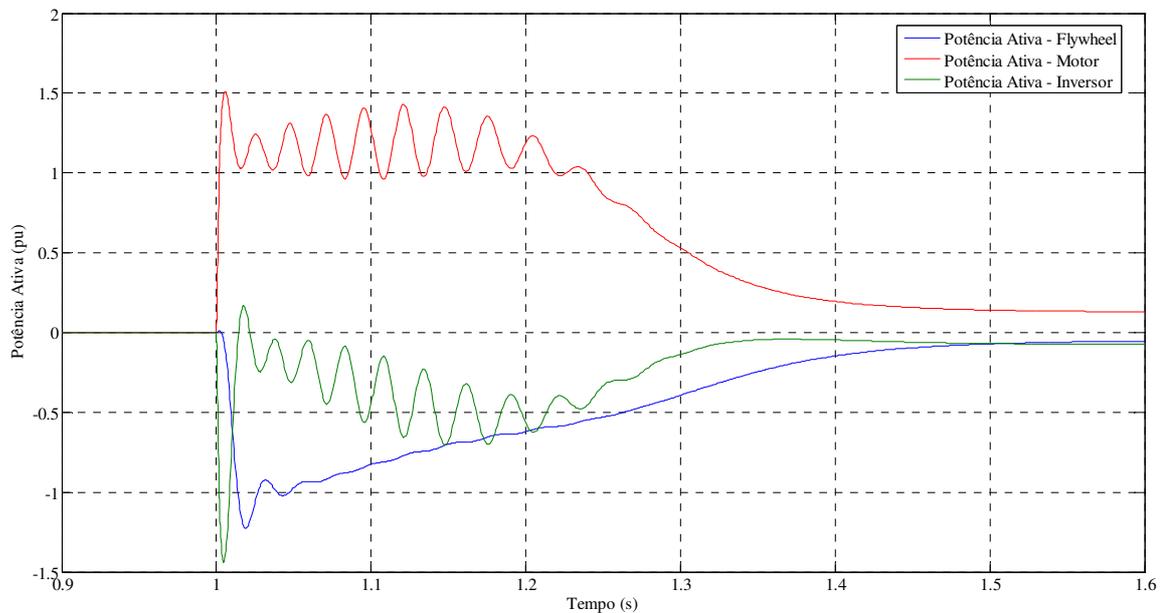


Figura 43 – Gráfico das Potências Ativa do *Flywheel* e Motor de Indução

A figura 44, mostra como o controle proposto no modelo é eficiente na redução da potência ativa a ser consumida pelo motor de indução. Enquanto na partida direta (caso 1) o valor máximo ultrapassa 7,5 pu, a máxima potência atingida pelo modelo (caso 2) não ultrapassa 1,5 pu.

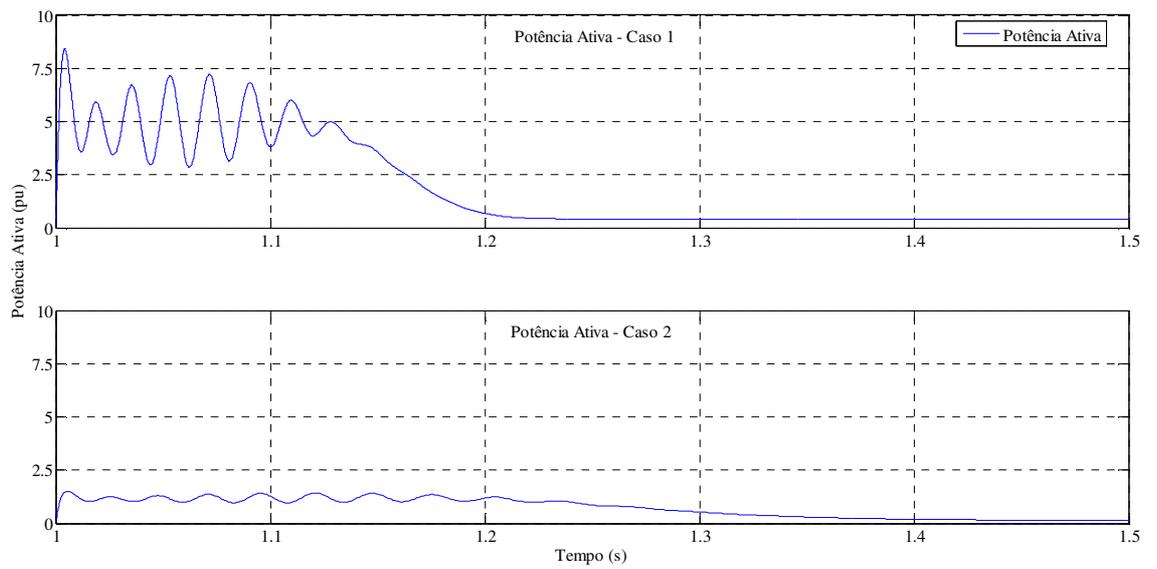


Figura 44 - Comparação entre as Potências Ativas do Motor – Caso 1 x Caso 2

A figura 45 mostra quais equipamentos fornecem e quais consomem potência reativa na simulação do modelo proposto.

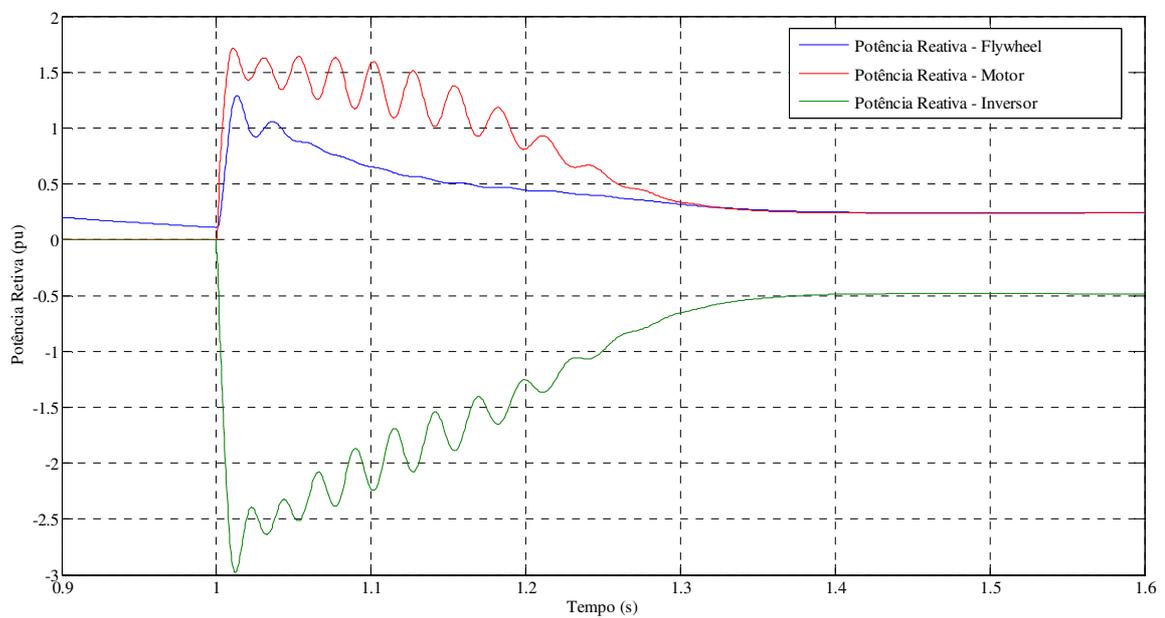


Figura 45 – Gráfico das Potências Reativas do *Flywheel* e Motor de Indução

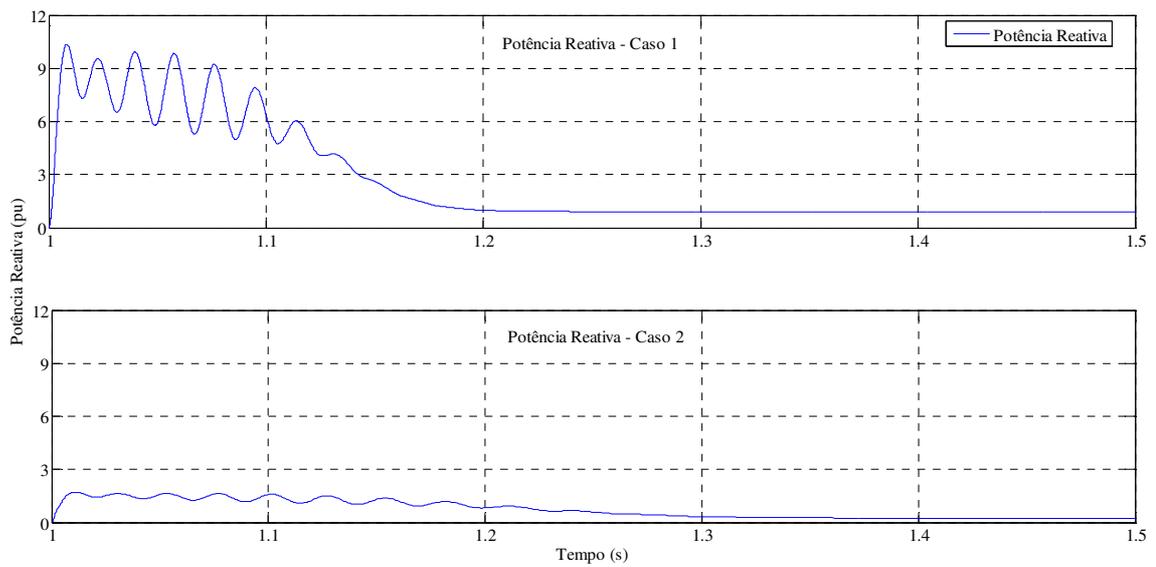


Figura 46 - Comparação entre as potências reativas do Motor – Caso 1 x Caso 2

Observando-se a figura 46, conclui-se que assim como acontece com a potência ativa, o máximo valor da potência reativa na simulação do modelo (caso 2) é menor que a máxima potência atingida durante a simulação de partida (caso 1) onde o valor é 6 vezes menor.

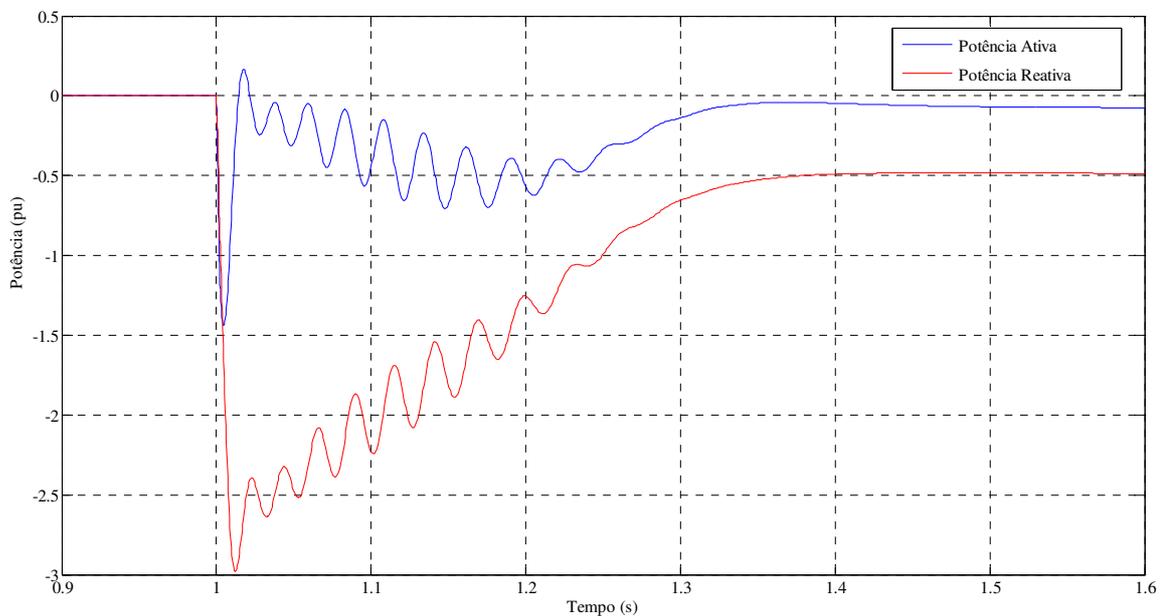


Figura 47 – Gráfico das Potências Ativa e Reativa do inversor em pu durante a partida do motor

A figura 47 mostra que o controle mantém a potência ativa abaixo de 1,5 do seu valor nominal. Outro ponto que pode ser abordado na figura 46 é o fato da potência reativa ser muito maior que a potência ativa, resultando em um baixo fator de potência conforme

apresentado por Liu, H. em [10] e Mamede Filho, J. em [5], lembrando que os valores negativos são apenas ilustração de que estas potências estão sendo fornecidas ao sistema.

5 Conclusão

Hoje em dia é de suma importância usar a energia de forma eficiente e responsável. Esta busca pela eficiência e pela responsabilidade leva à pesquisa como a deste trabalho.

Os resultados obtidos pelo modelo mostram que é possível acionar um motor de indução sem que haja uma sobrecarga no inversor. No modelo, a energia usada para movimentar o flywheel é devolvida ao sistema, numa forma eficiente de usar toda a energia sem que haja desperdício.

O resultado da potência ativa demandada da fonte no modelo se mostrou bastante satisfatório, visto que ocorreu uma diminuição do valor em até 4 vezes o valor da potência durante uma partida direta.

Analisando-se o controle de frequência, excluindo-se o retorno à frequência nominal que não há lógica proposta, este é feito sem que haja transitórios bruscos, o que traz benefícios ao sistema. Grandes variações no sistema provocam distorções que podem levar alguns equipamentos do sistema a se danificarem.

5.1 Trabalhos Futuros

Um trabalho futuro apresentando um ensaio prático deste modelo serviria para consolidar o modelo proposto na simulação.

O trabalho futuro apresentando um controle feito também através da potência reativa além da potência ativa também pode ser desenvolvido para aperfeiçoamento do método de partida proposto e viabilizar sua consolidação junto aos outros métodos usados atualmente.

Outros aspectos que podem ser levados em conta em trabalhos futuros são:

- Obter um circuito de disparo do controle de frequência e tensão a partir da ligação do motor à fonte, ou seja, quando o motor for acionado, o controle da frequência é acionado junto;
- Implementar no controle de frequência e da tensão um retorno aos seus valores nominais, 60 Hz e 220V respectivamente, após a partida.

5.2 Referências Bibliográficas

- [1] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy*, http://www.eere.energy.gov/windandhydro/wind_history.html
- [2] Programa PROINFA, http://www.eletronbras.gov.br/EM_Programas_Proinfa
- [3] NBR 7094, “Máquinas elétricas girantes – Motores de Indução – Especificação”, ABNT, fev. 2003
- [4] Kwak, S. e Toliyat, H. A., “A Hybrid Solution for Load-Commutated-Inverter-Fed Induction Motor Drives”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 41, nº 1 (January/February), pp. 83-90, 2005.
- [5] Mamede Filho, J., “Instalações Elétricas Industriais”, Editora LTC, 1997
- [6] Larabee, J.; Pellegrino, B. e Flick, B., “Induction Motor Starting Methods and Issues”, *IEEE PCIC 2005-24*, pp.217-221, 2005.
- [7] Albers, T.; Cade, C., Ruffing, S. e Robinson, F., “Techiques in Motor Starting”, *IEEE PPIC 2005*, pp. 43-57, 2005.
- [8] Fitzgerald, A. E.; Kingsley Jr. C.; Kusko, A., “Máquina Elétricas”, Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda., 1975.

- [9] Del Toro, V., “Fundamentos de Máquinas Elétricas”, LTC – Livros Técnicos e Científicos Ltda., 1994.
- [10] Liu, H.; Jiang, Q.; Hu, Q. e Zhou E., “Modeling and Simulation of the Capacitor Starting System of Large and Medium Squirrel Cage Motors on Limited Capacity Transmission Lines”, *Electric Machines and Drives Conference Record, 1997. IEEE International Volume (Maio 1997)*, pp. WB1/8.1 - WB1/8.3
- [11] Camargo, I., “Motor de Indução Trifásico”, texto extraído do site do Prof. Ivan Marques de Toledo Camargo do Grupo de Sistemas Elétricos de Potência da Universidade de Brasília, http://www.gsep.ene.unb.br/osem_ivan.php
- [12] Iglesias, I. J.; García-Tavares, L.; Agudo, A.; Cruz, I. e Arribas, L., “Design and Simulation of a Stand-alone Wind-Diesel Generator with a Flywheel Energy Storage System to Supply the Required Active and Reactive Power”, *IEEE 31st Annual Power Electronics Specialists Conference (PESC 000)*, vol. 3, pp. 1381–1386, 2000.
- [13] Iglesias, I. J.; García-Tavares, L.; Lafoz, M.; Calero, J.; Portillo, S.; Cruz, I., Toral, F. e Abramian, P., “A Flywheel Switched Reluctance Motor Drive for Wind Energy Applications”, *International Conference On Electrical Machines*, vol. 3, 2002.
- [14] Vere, H. “A Primer of Flywheel Technology”, *Distributed Energy*, vol.5, n° 3 (Maio/Junho), 2007.
- [15] Carvalho, A.M. S.; Marques, B. F. e Apura, P.F. da C., “Flywheel – A Bateria Electromecânica”, *Revista Millenium*, vol. 8 (Outubro), 1997.
- [16] Inovação Tecnológica,
<http://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=020170031202>
- [17] Miao Miao Cheng; Kato, S. e Shimada, R., “A Novel Method for Improving the Overload Capability of Stand-alone Power Generating Systems Based on a Flywheel Induction Motor”, *IEEE PESC 2008 (Junho)*, pp. 3677-3683, 2008.
- [18] Aredes, M. e Watanabe, E. H., “Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS”, *CBA98 - XII Congresso Brasileiro de Automática*, Uberlândia – Brasil, 1998.
- [19] Watanabe, E. H.; Stephan, R. M. e Aredes, M., “New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Powers in Electrical Systems with Generic Loads”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 8, n° 2, pp. 697-703, Abril 1993
- [20] Akagi, H. Ianagawa, Y. e Nabae A. - "Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-phase Circuits" - *Int. Conf. Power Electronics*, Tokyo, 1983.
- [21] NASA Glenn Research Center,

Anexo A – Resultados Complementares da Simulação da Partida de Motores pelo Matlab/Simulink

Carga 1 - Torque Constante

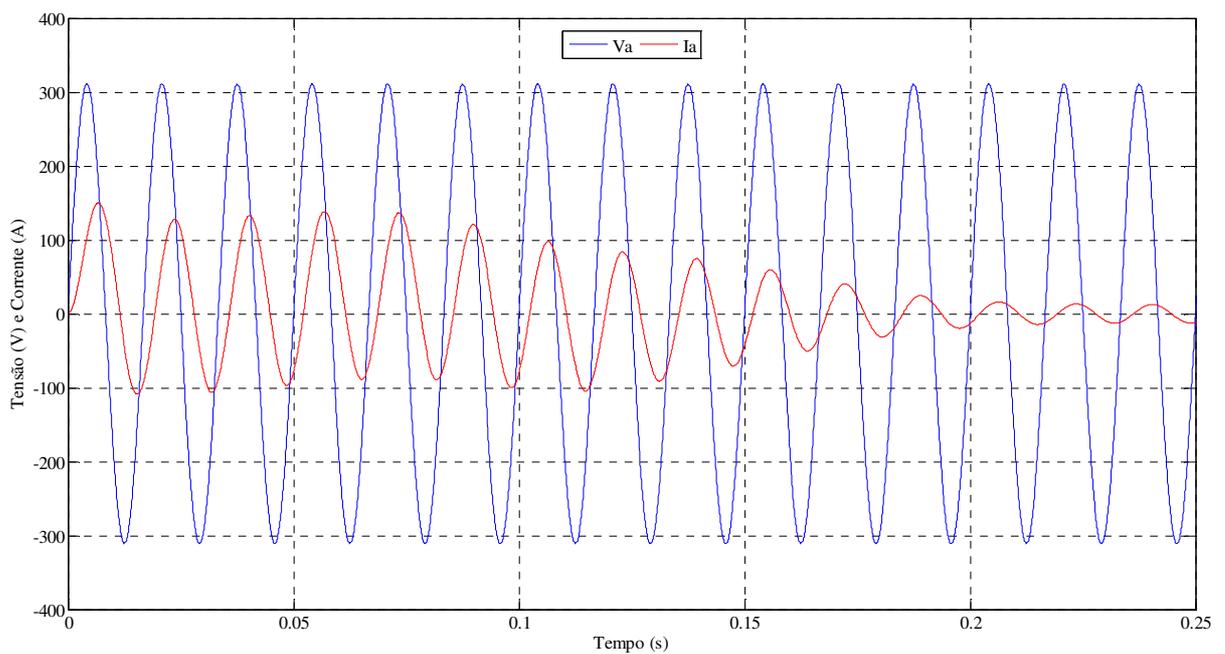


Figura 48 – Forma de onda da tensão e da corrente

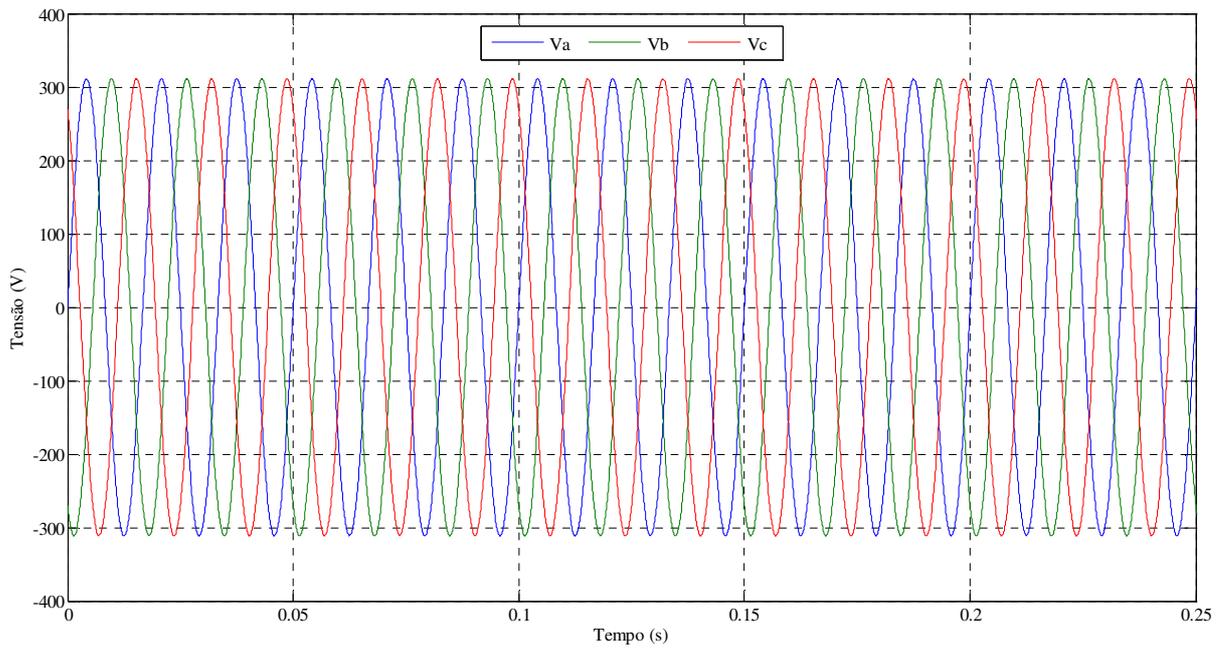


Figura 49 – Formas de onda das tensões de linha

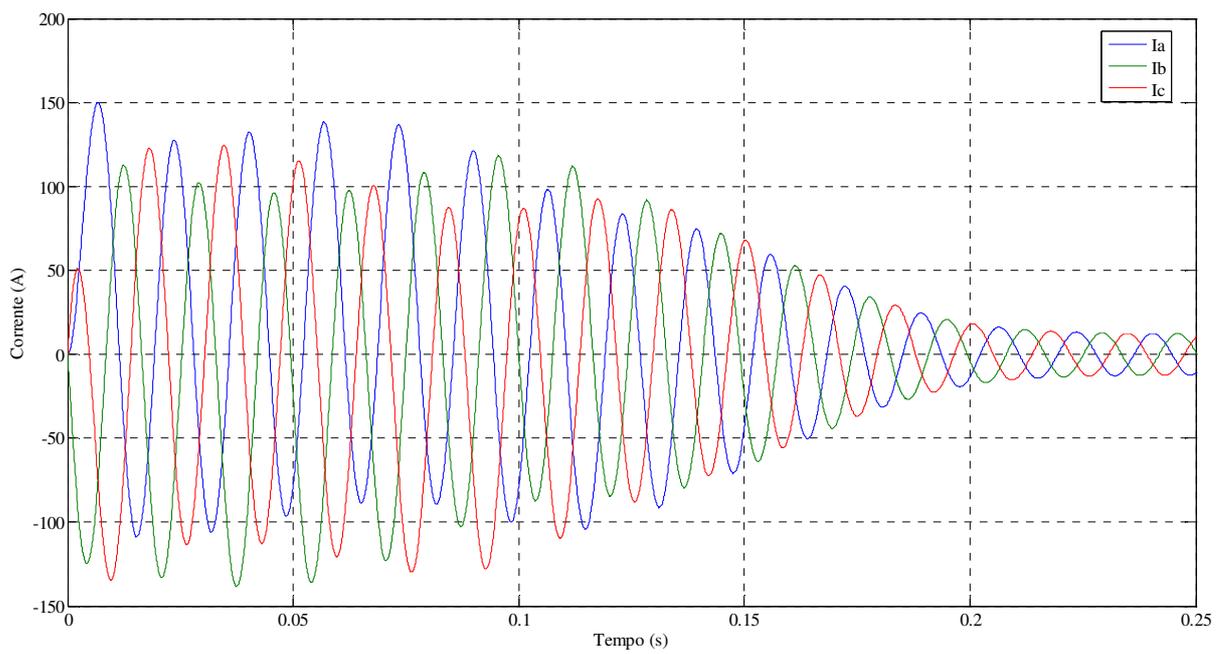


Figura 50 – Formas de onda das correntes de linha

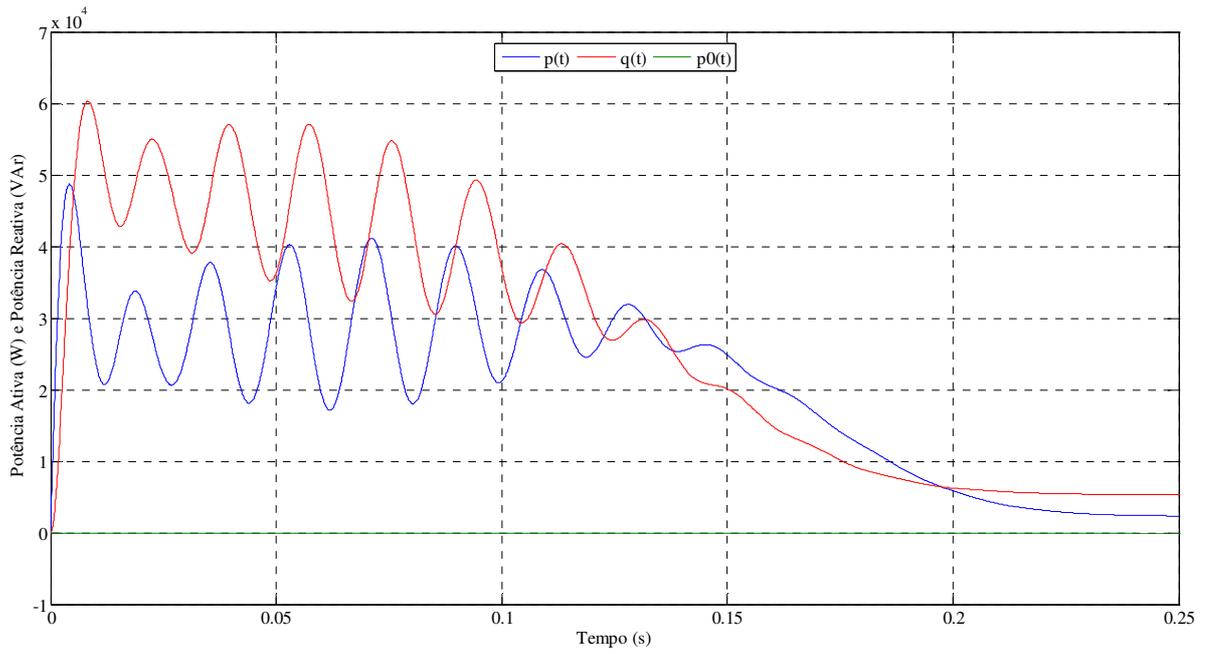


Figura 51 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Sequência Zero x tempo

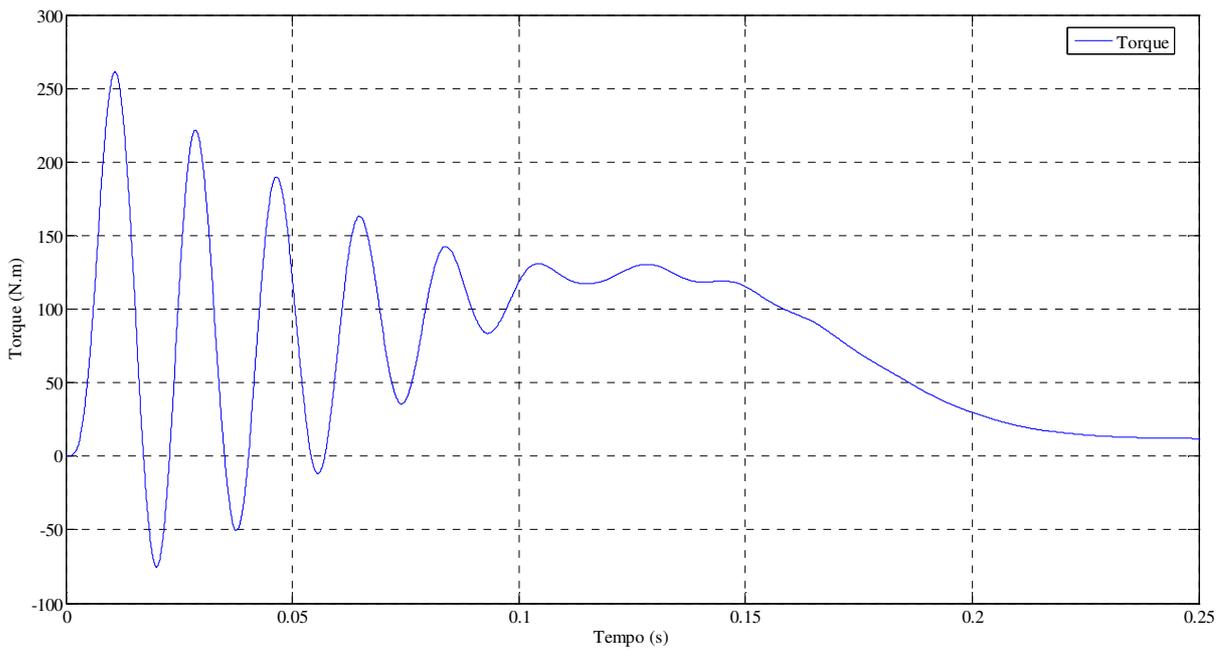


Figura 52 – Gráfico do Torque eletromagnético x tempo

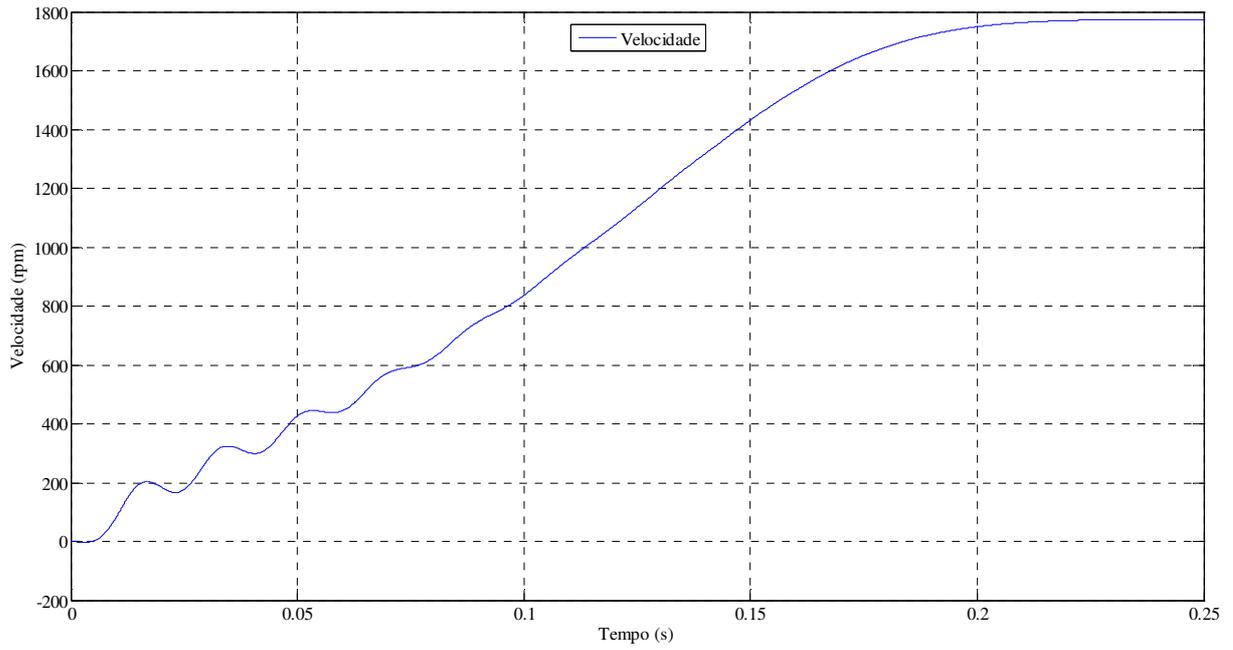


Figura 53 – Gráfico velocidade x tempo

Carga 2 - Torque proporcional a velocidade

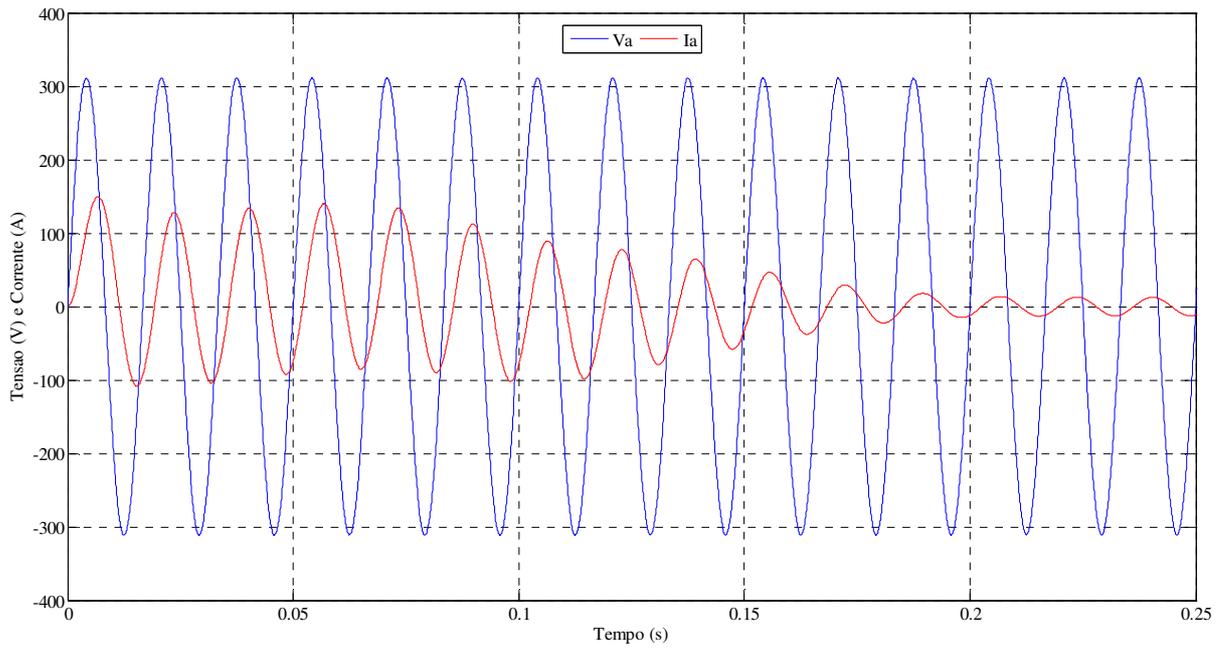


Figura 54 – Forma de onda da tensão e da corrente

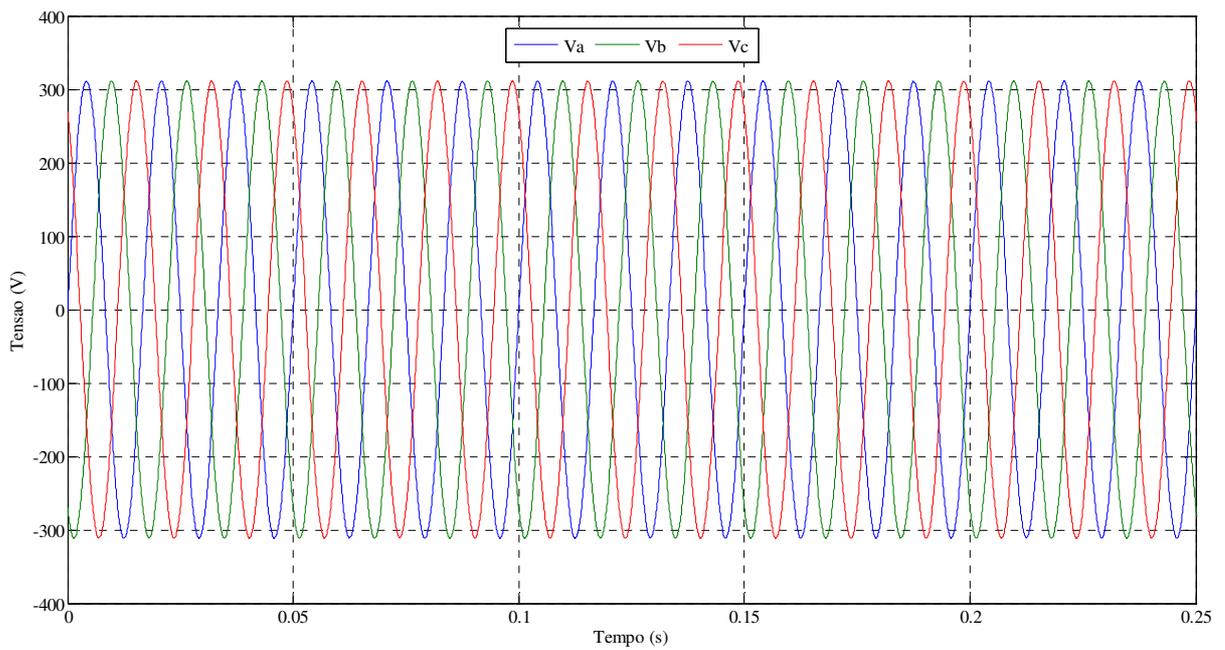


Figura 55 – Formas de onda das tensões de linha

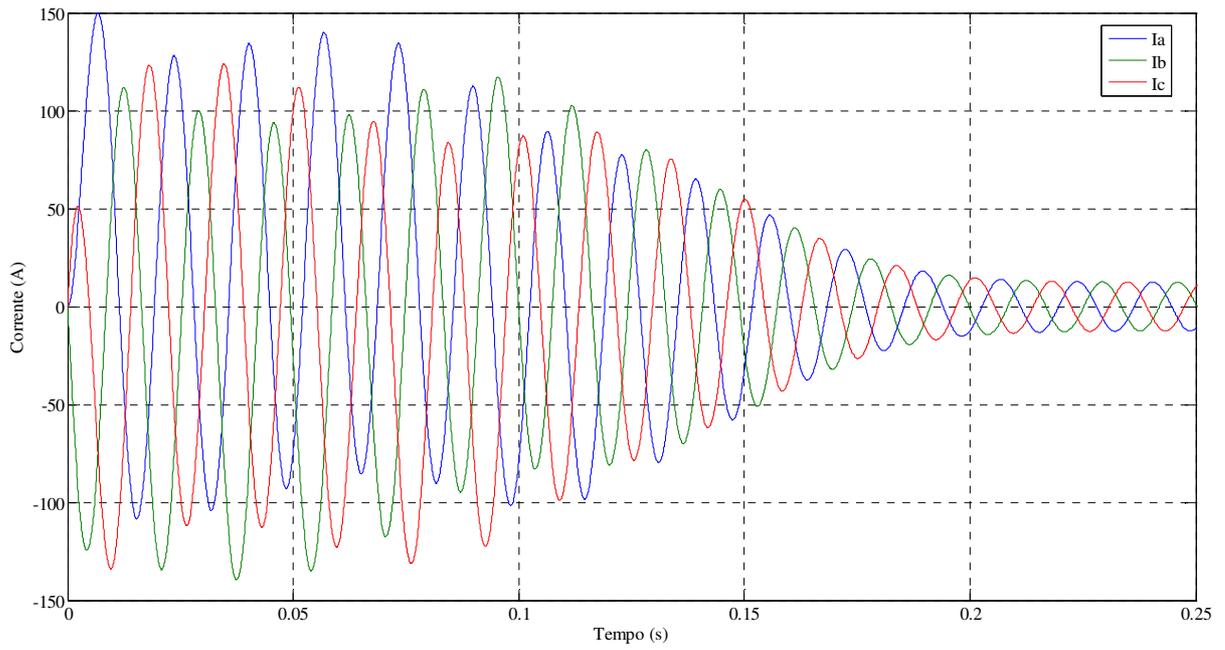


Figura 56 – Formas de onda das correntes de linha

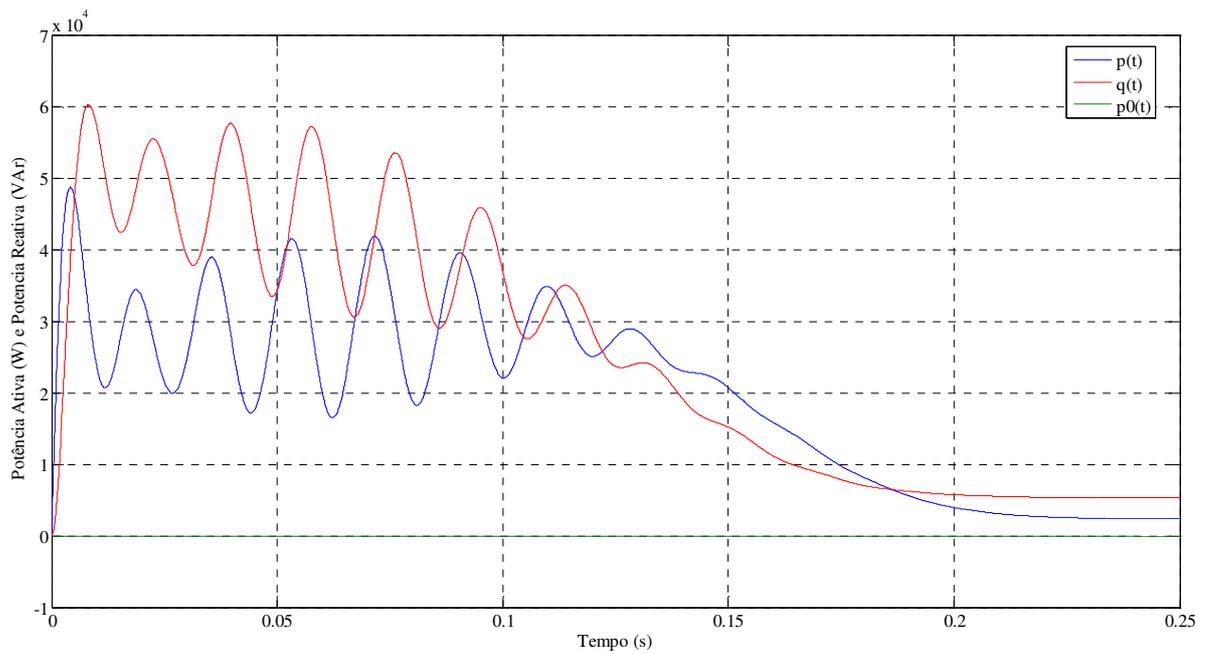


Figura 57 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Seqüência Zero

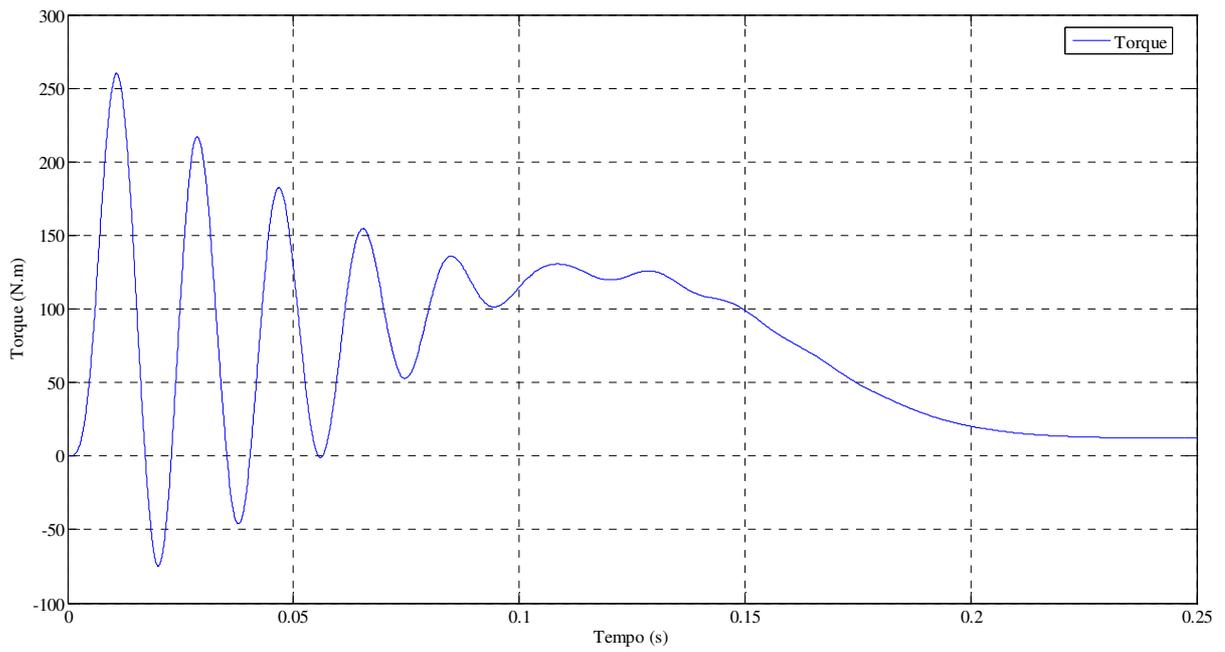


Figura 58 – Gráfico do Torque Eletromagnético x tempo

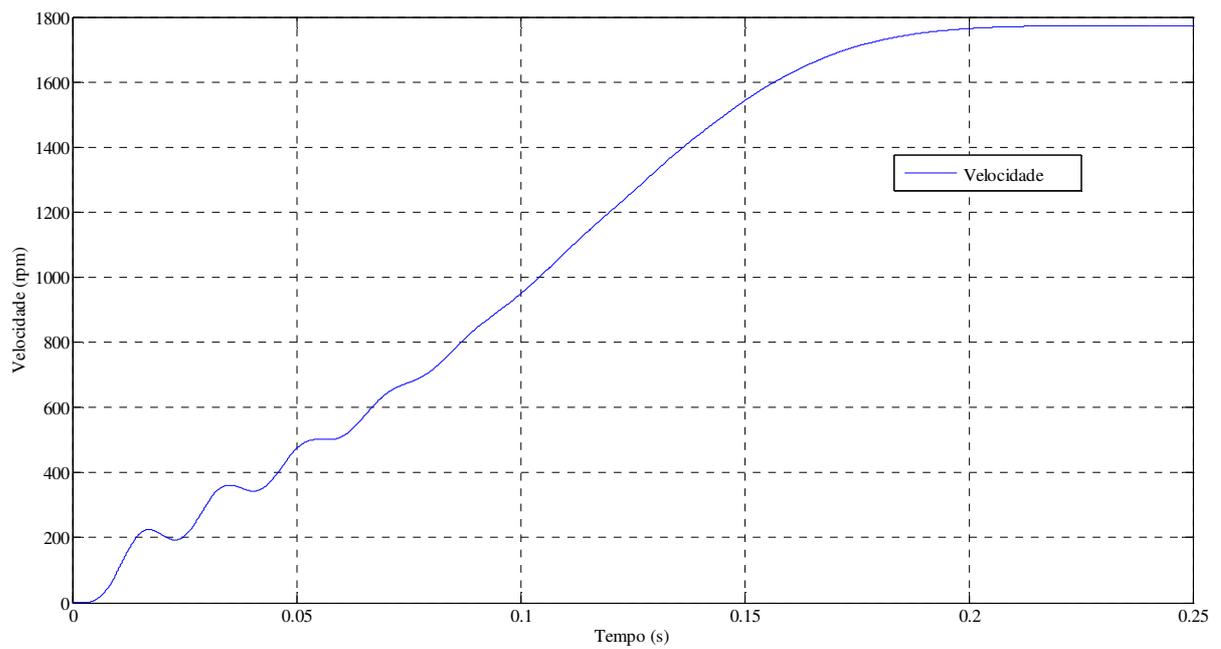


Figura 59 – Gráfico da velocidade x tempo

Carga 3 - Torque proporcional ao quadrado da velocidade

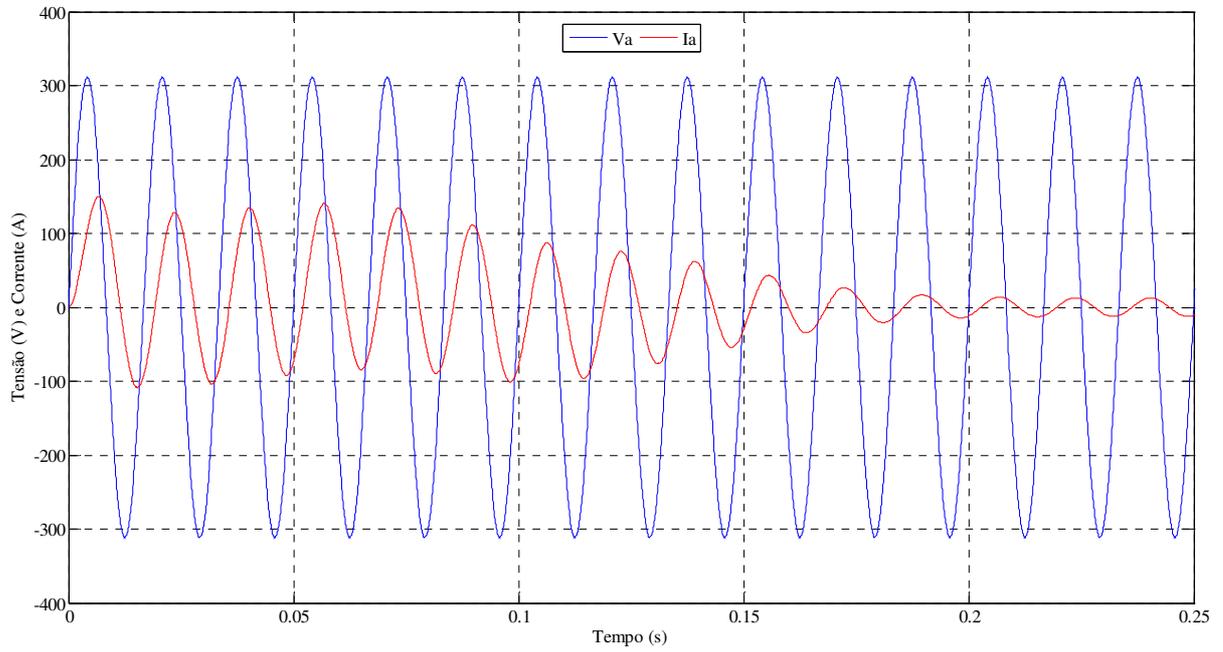


Figura 60 – Forma de onda da tensão e da corrente

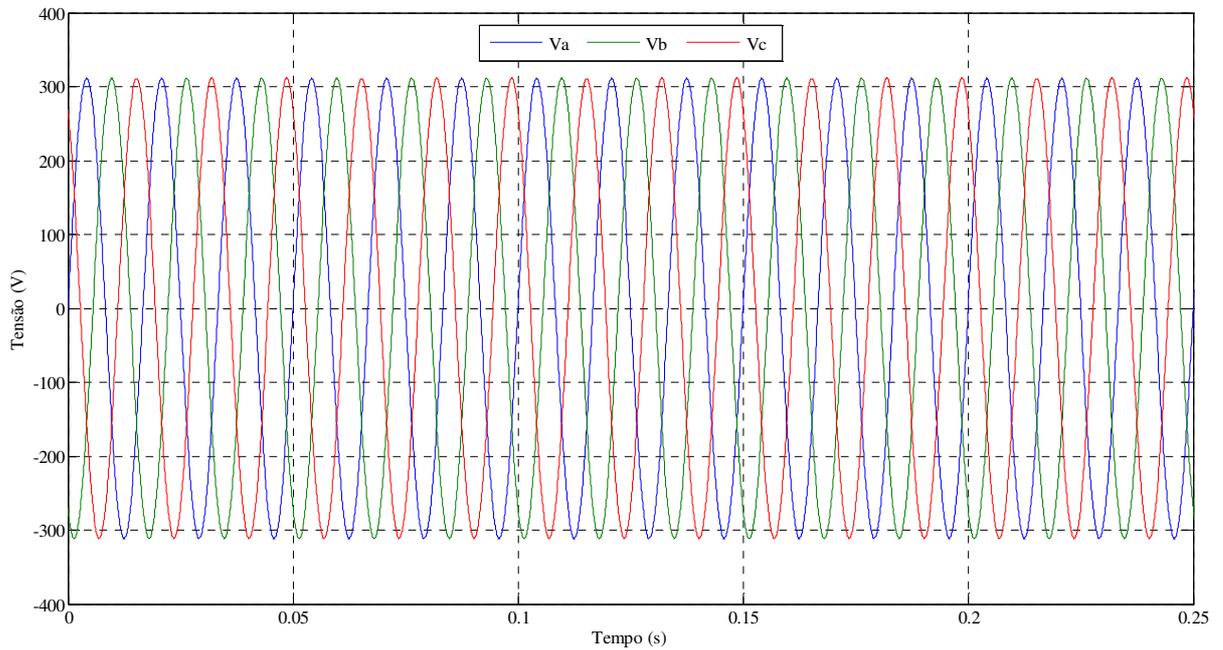


Figura 61 – Formas de onda das tensões de linha

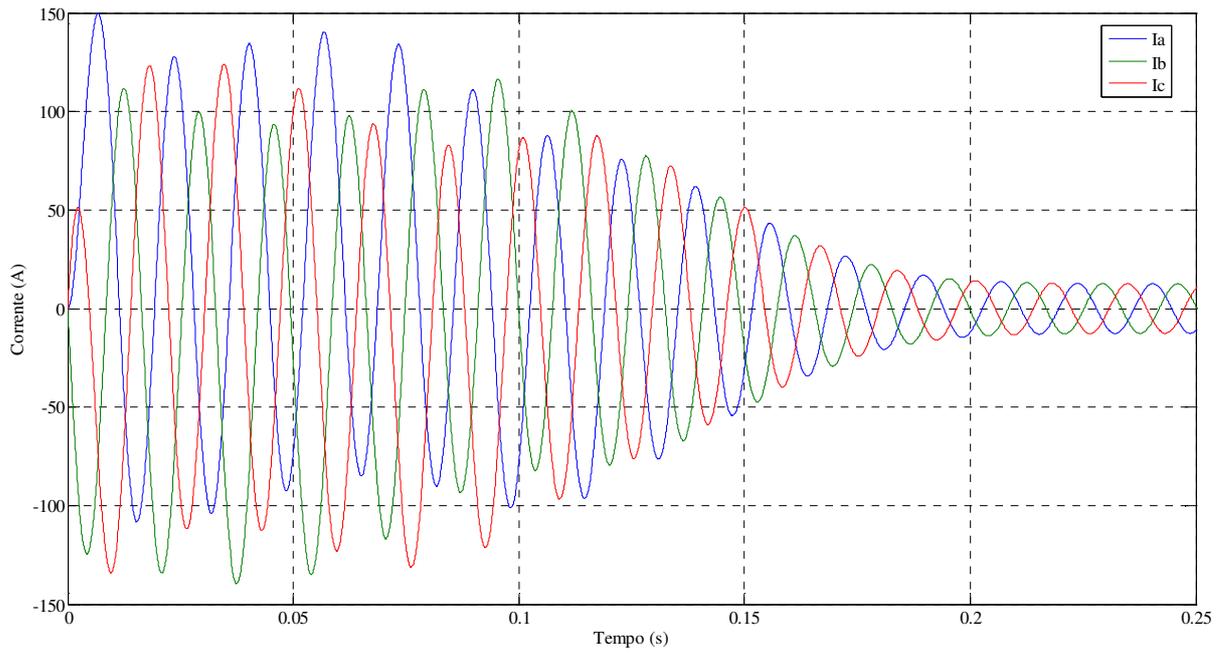


Figura 62 – Formas de onda das correntes de linha

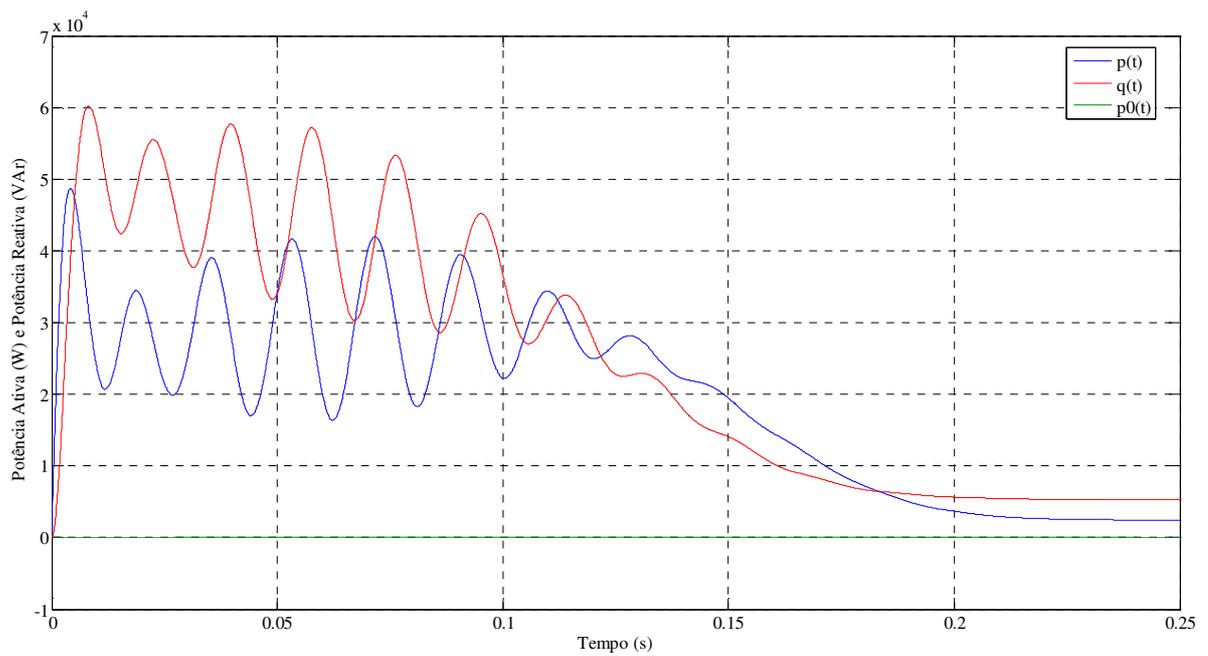


Figura 63 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Sequência Zero x tempo

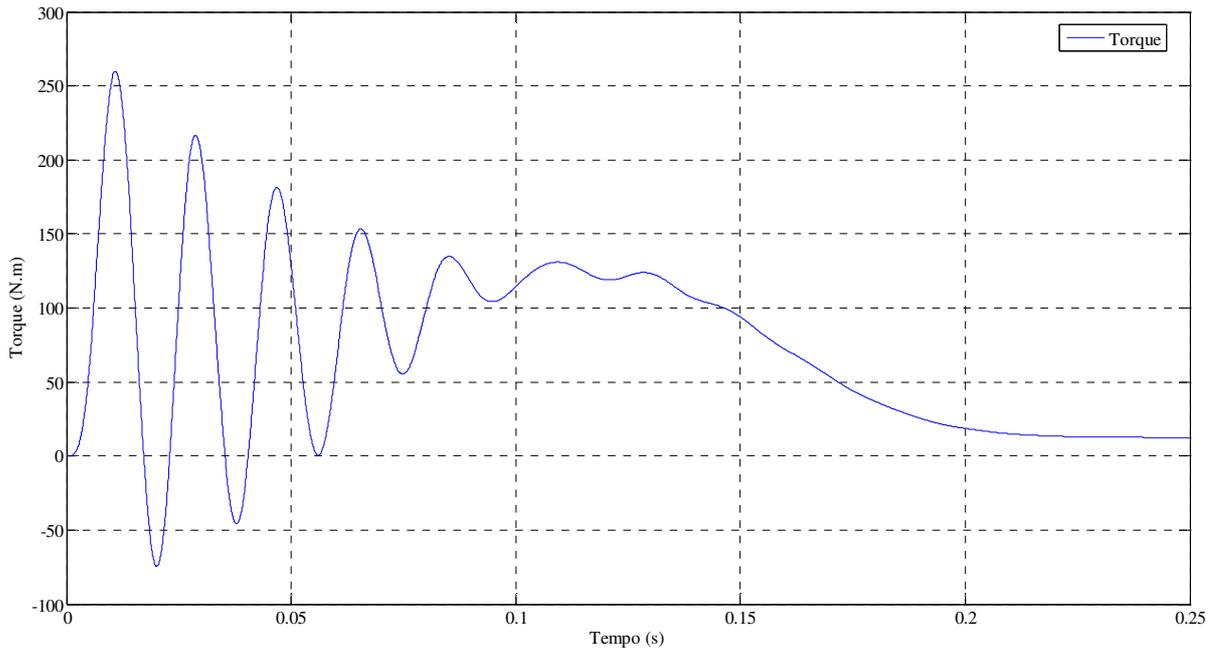


Figura 64 – Gráfico do Torque Eletromagnético x tempo

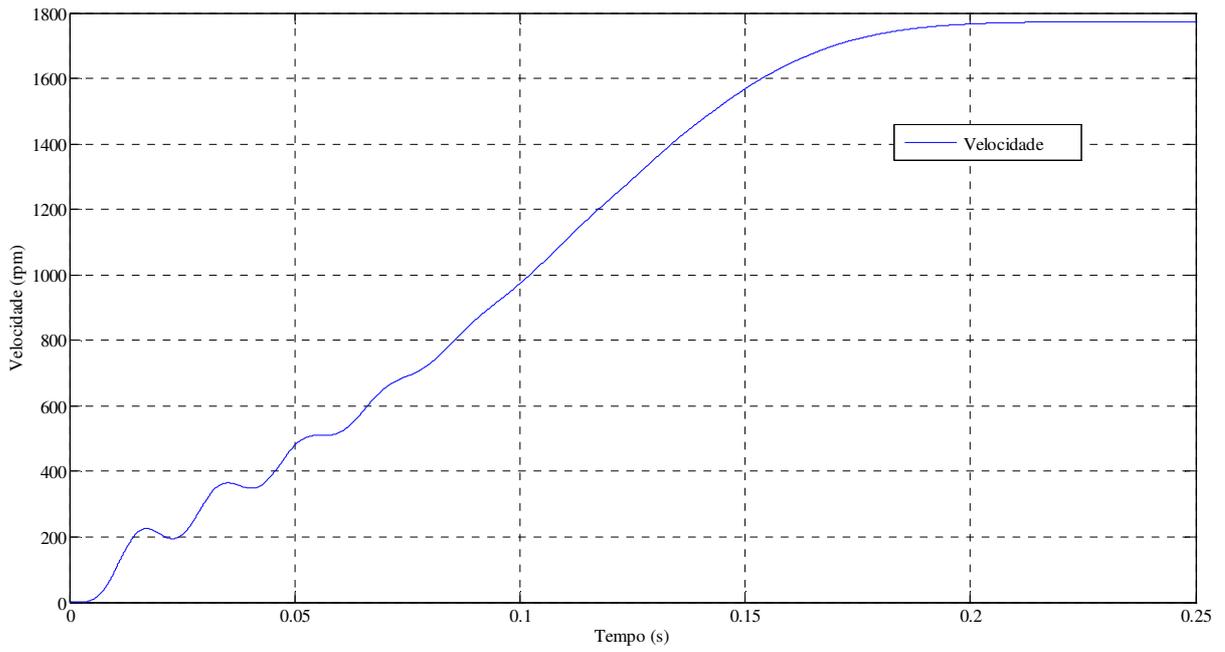


Figura 65 – Gráfico da velocidade x tempo

Anexo B – Resultados Experimentais dos Ensaios de Partida no Laboratório

Motor1

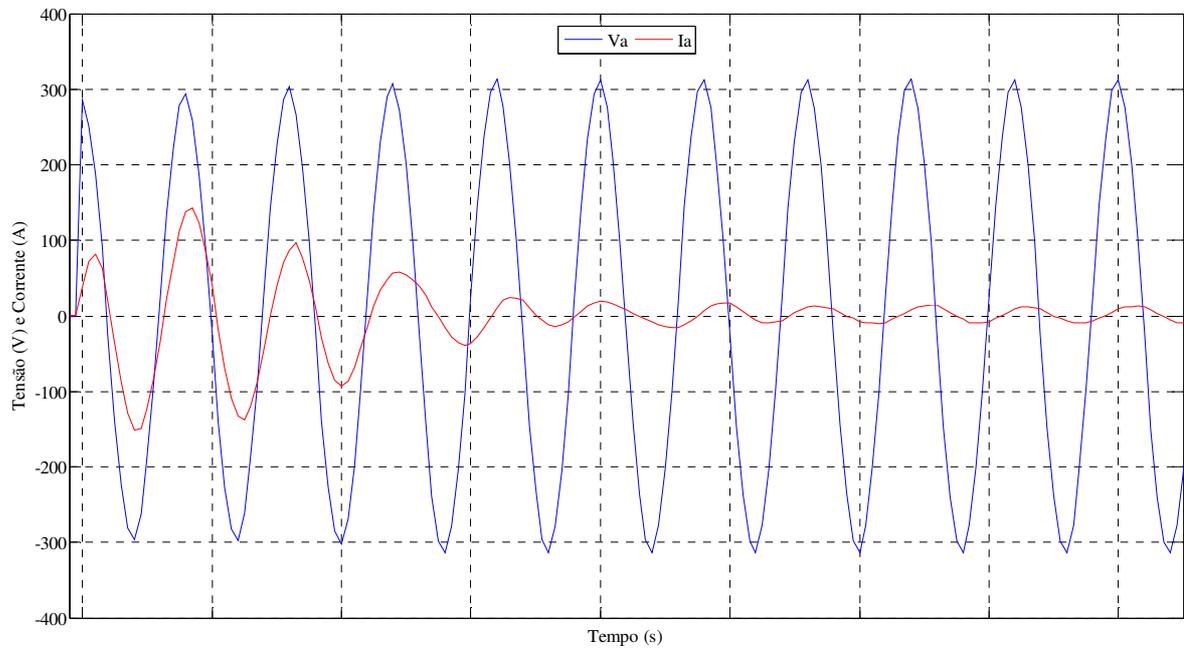


Figura 66 – Forma de onda da tensão e da corrente

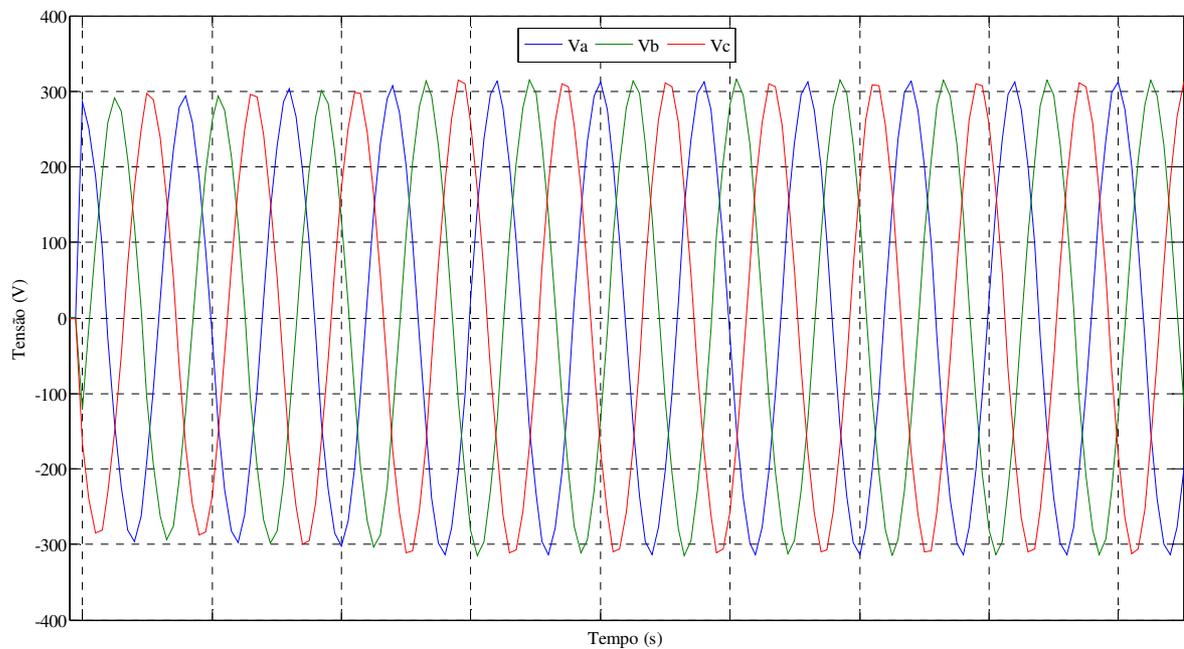


Figura 67 – Formas de onda das tensões de linha

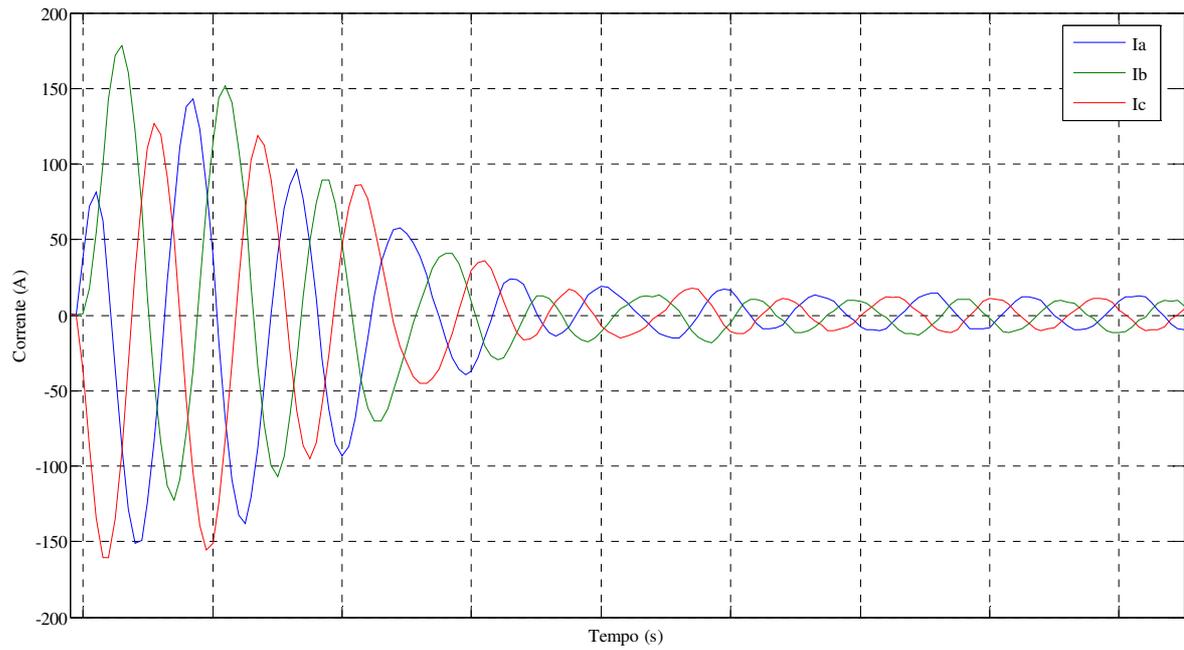


Figura 68 – Formas de onda das correntes de linha

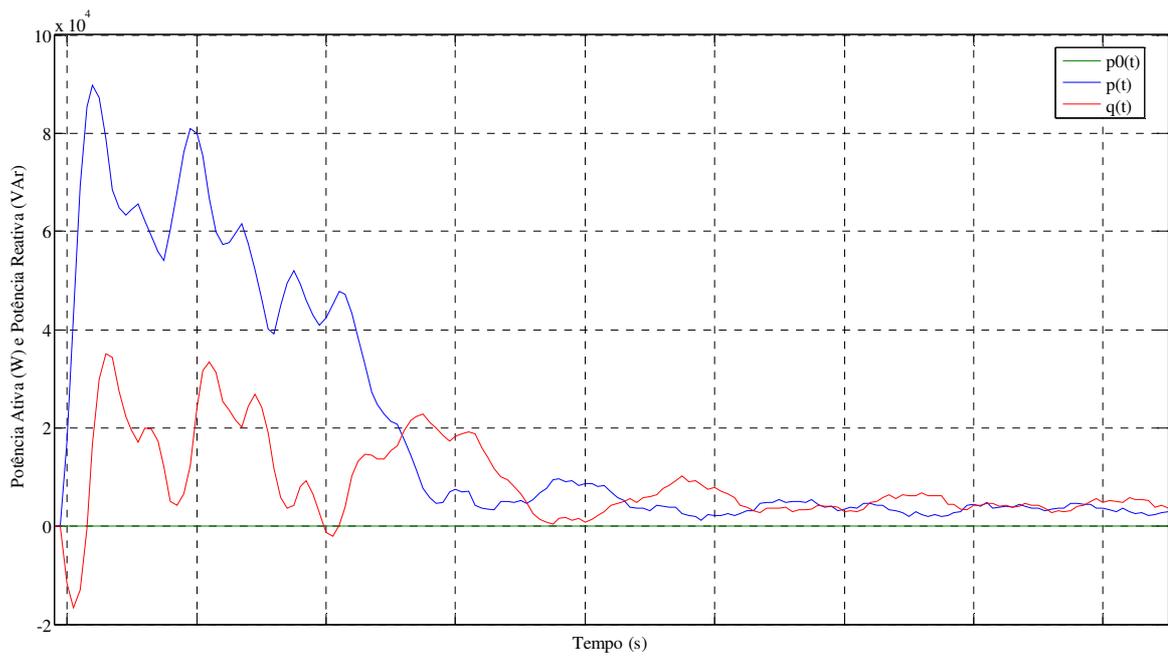


Figura 69 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Seqüência Zero

Motor2

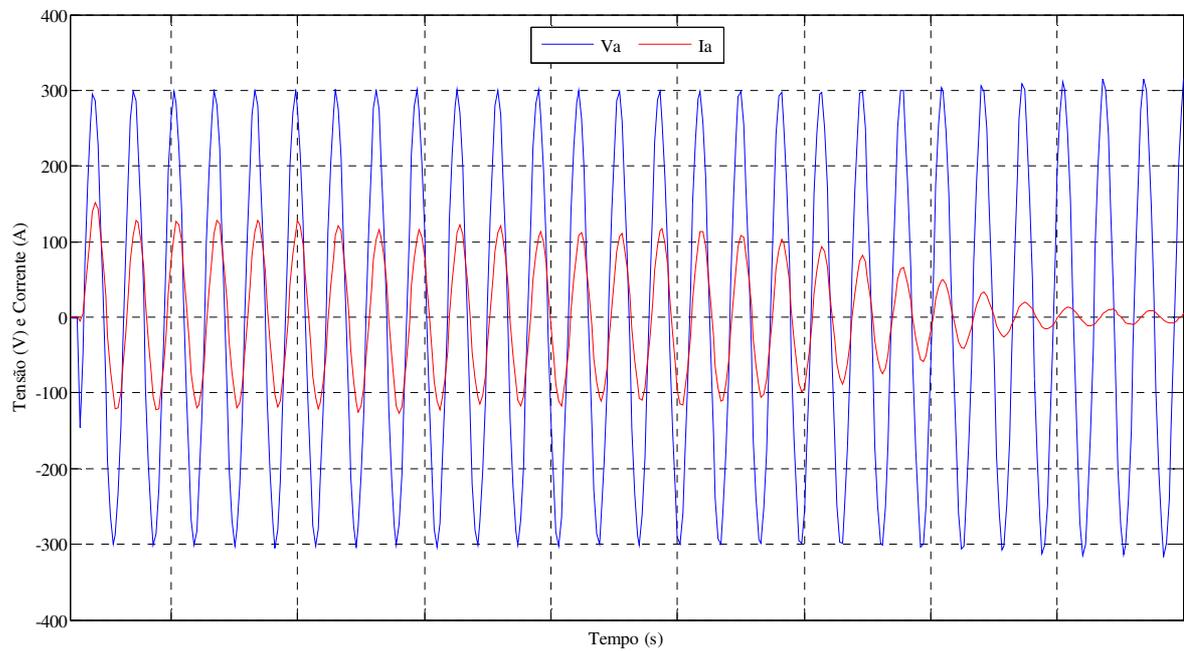


Figura 70 – Forma de onda da tensão e da corrente

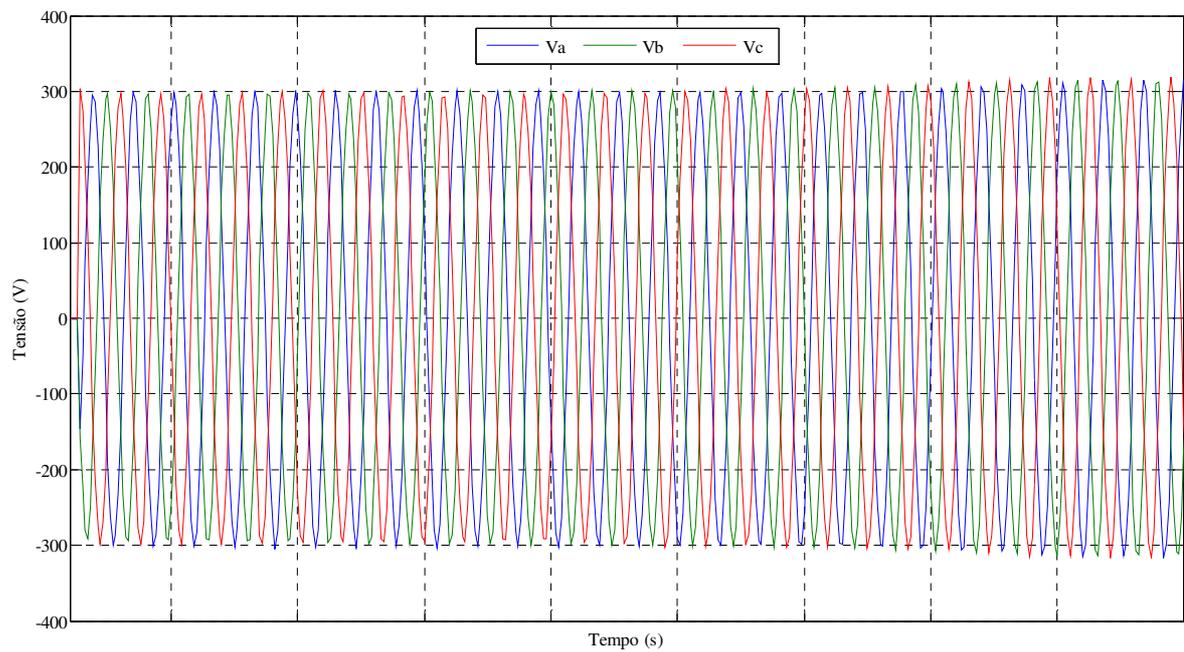


Figura 71 – Formas de onda das tensões de linha

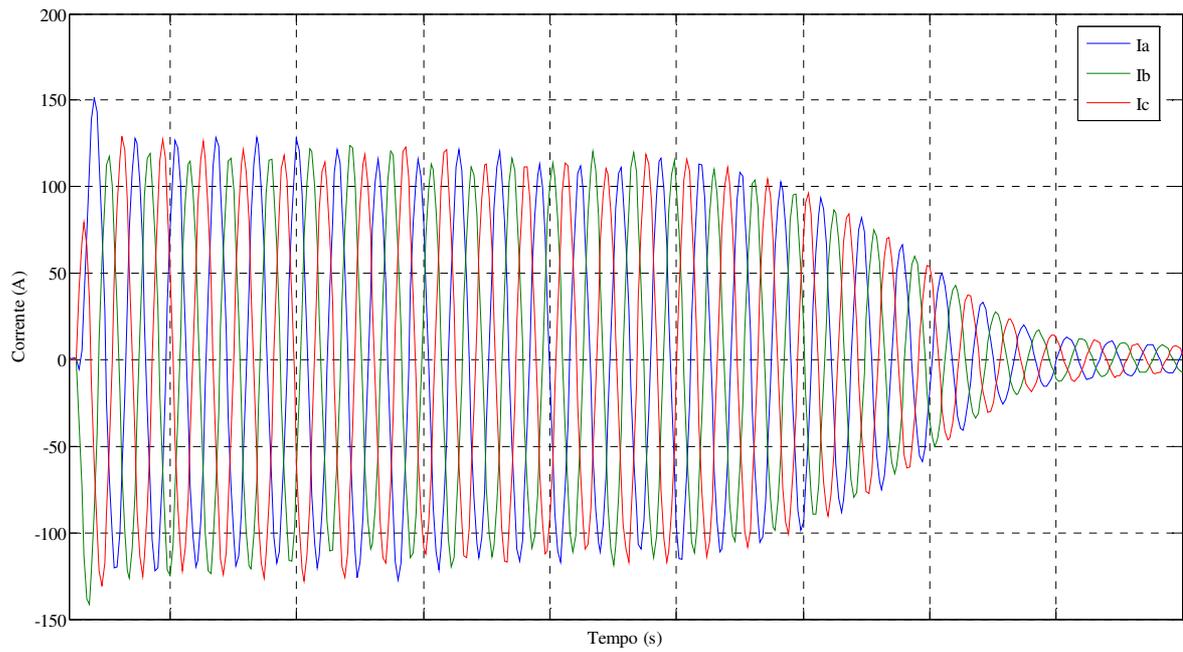


Figura 72 – Formas de onda das correntes de linha

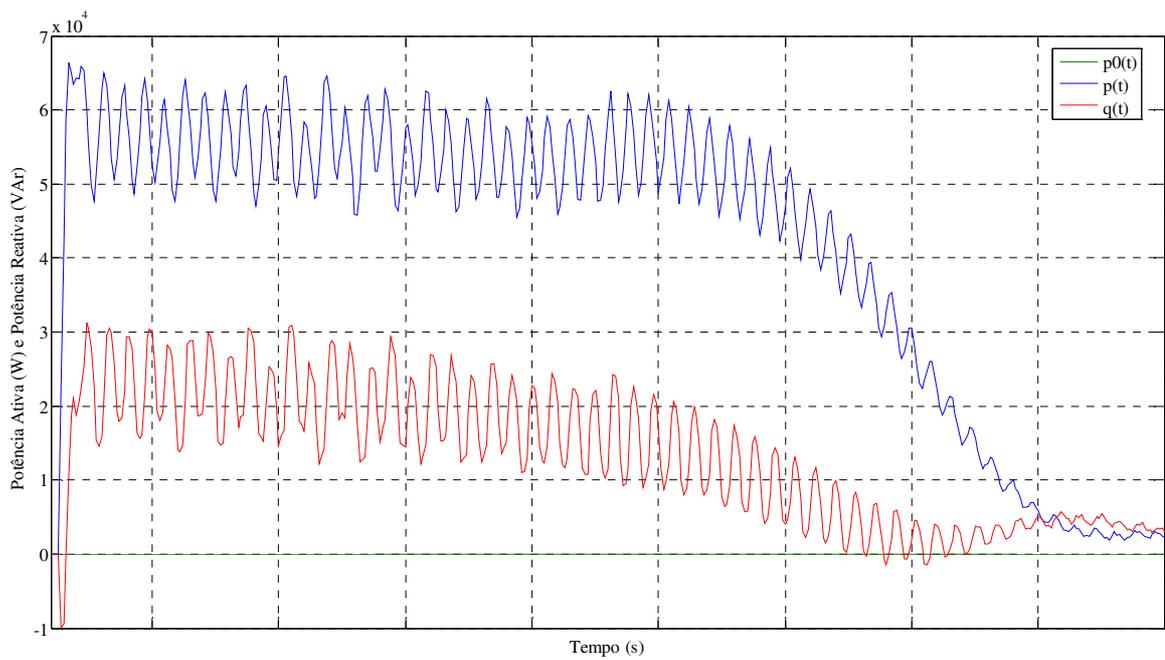


Figura 73 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Seqüência Zero

Motor3

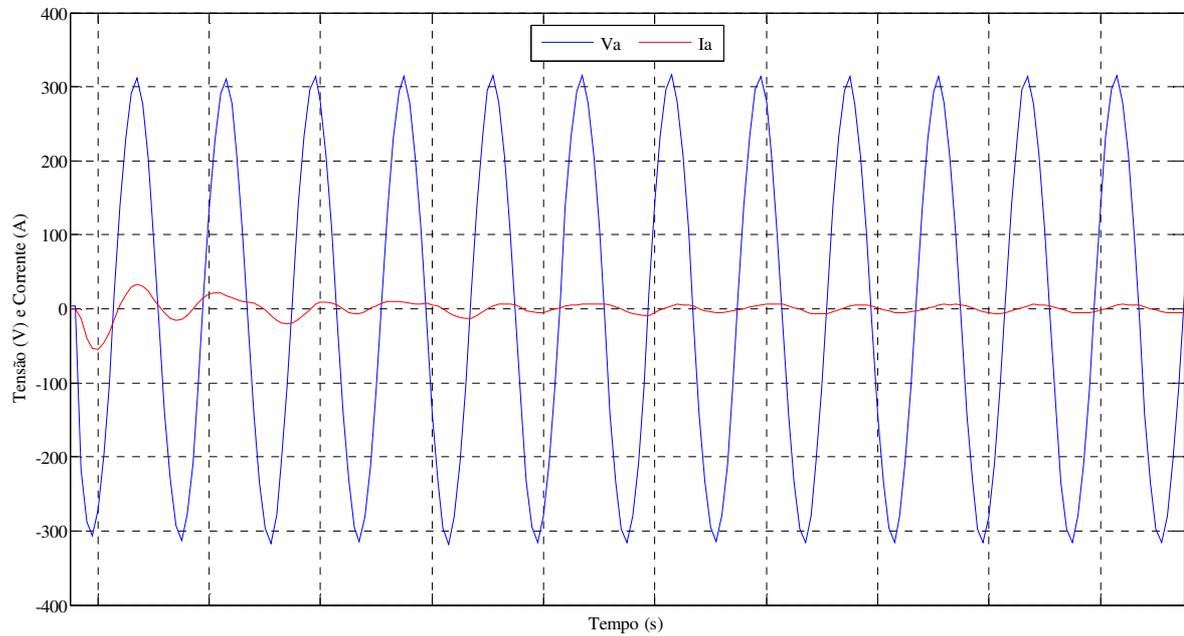


Figura 74 – Forma de onda da tensão e da corrente

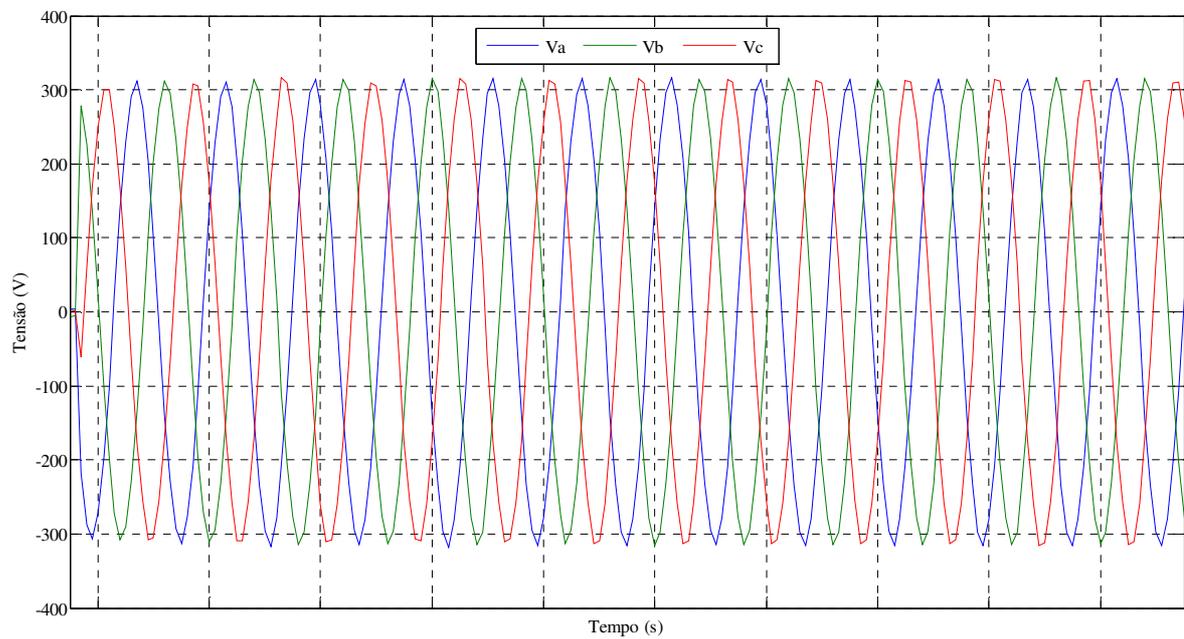


Figura 75 – Formas de onda das tensões de linha

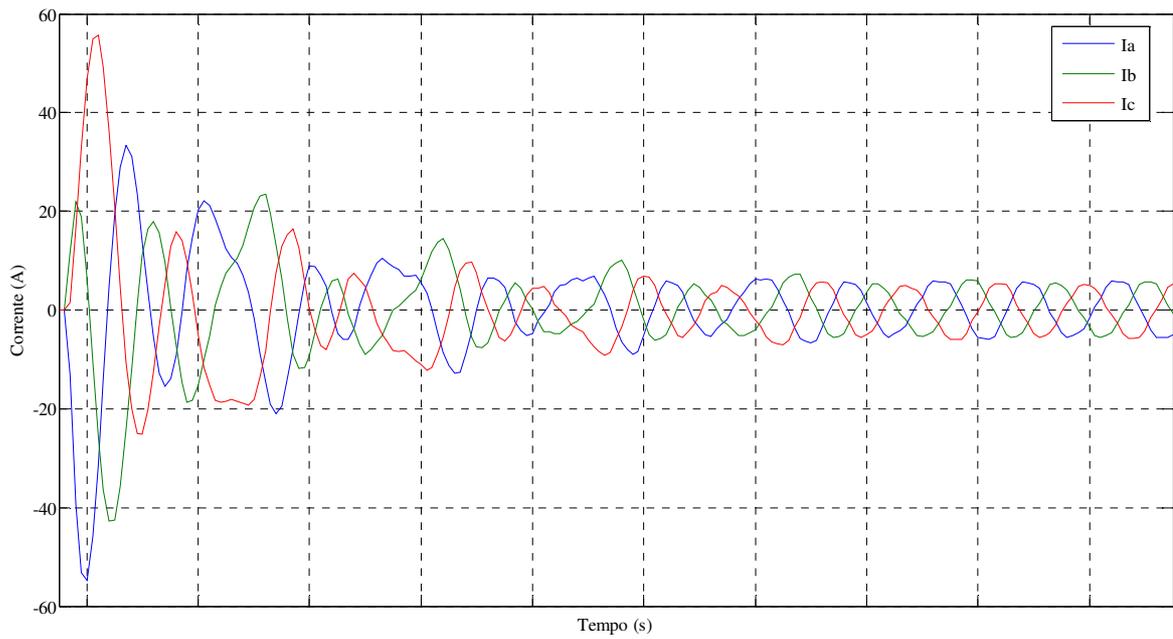


Figura 76 – Formas de onda das correntes de linha

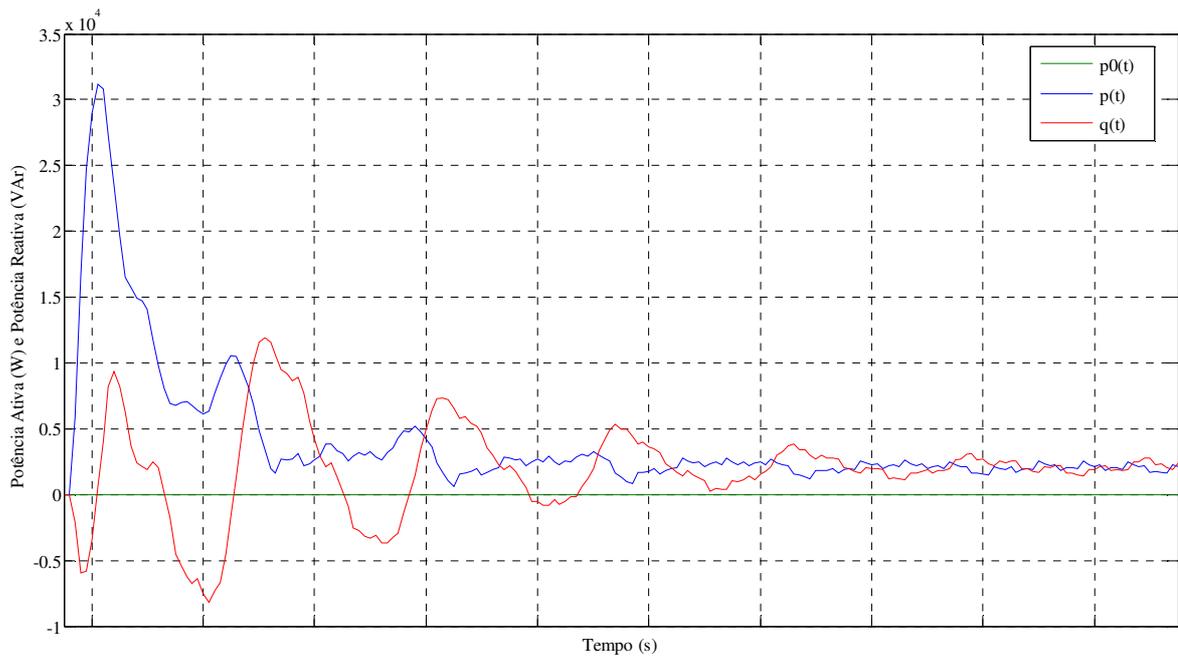


Figura 77 – Gráfico das Potências Ativa, Reativa e Sequência Zero x tempo

Anexo C - Fotos do Ensaio de Partida no Laboratório

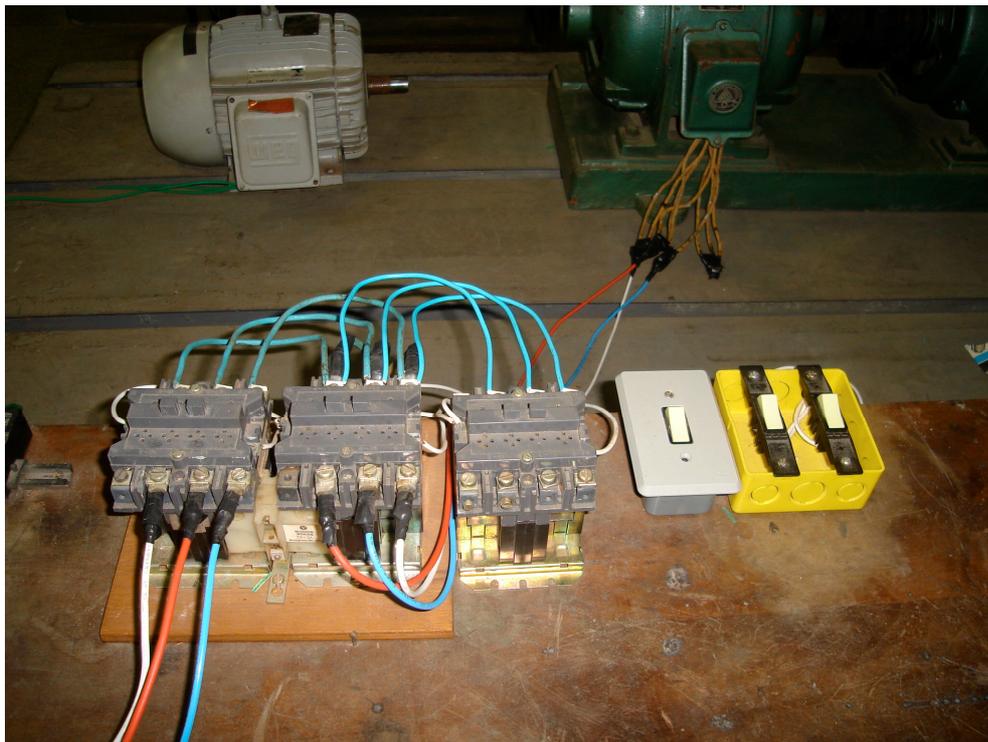


Figura 78 – Foto das chaves para acionamento de cada motor



Figura 79 – Foto de um dos motores utilizados no ensaio



Figura 80 – Foto de outro motor utilizado no ensaio



Figura 81 – Foto da bancada montada para realização do ensaio

Apêndice A – Teoria pq

A transformada de Clarke, abaixo, transforma o sistema trifásico (a-b-c) em um sistema de referência estacionária (α - β -0).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (25)$$

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} & 1/\sqrt{2} \\ 1 & -1/2 & -1/2 \\ 0 & \sqrt{3}/2 & -\sqrt{3}/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (26)$$

A potência trifásica instantânea é dada por:

$$\begin{aligned} p_{3\phi}(t) &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0 \\ &= p_\alpha(t) + p_\beta(t) + p_c(t) = p_\alpha(t) + p_\beta(t) + p_0(t) \\ &= p(t) + p_0(t). \end{aligned} \quad (27)$$

Onde:

$p = p_\alpha + p_\beta$ é a potência real instantânea,

$p_0(t) = v_0 i_0$ é a potência de sequência zero instantânea.

A partir da expressão usada para definir a potência reativa na teoria convencional,

$$q(t) = \frac{[(v_a - v_b)i_c + (v_b - v_c)i_a + (v_c - v_a)i_b]}{\sqrt{3}} \quad (28)$$

podemos obter uma expressão para o sistema de referência estacionário:

$$q(t) = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$$