

8.1.1.2 Módulo de controle do Motor de Indução (MI)

O Módulo de controle do MI possui um conversor PWM. Esse conversor é um módulo trifásico baseado em semicondutores IGBT SK75GB123 da Semikron®, que são montados em uma placa modelo SKB6I da Semikron®. Este módulo pode ser alimentado em até 800VDC, 20kW e 15 kHz. Um retificador trifásico em ponte completa é incluído e conectado ao barramento CC que é constituído por uma associação de capacitores de 680 μ F. Os IGBT's são controlados pelos drivers da Semikron® tipo SKHI 20op com um tempo morto de 1 μ s. Estes drivers são alimentados por um único circuito SKHI PS1 da Semikron® que requer 15V, 260mA da fonte de alimentação. Além disso, um termostato do tipo do NC é adicionado ao dissipador de calor para proteger o módulo de temperaturas excedentes. Uma foto do módulo de controle do Motor de Indução pode ser visto na Figura 8-6.

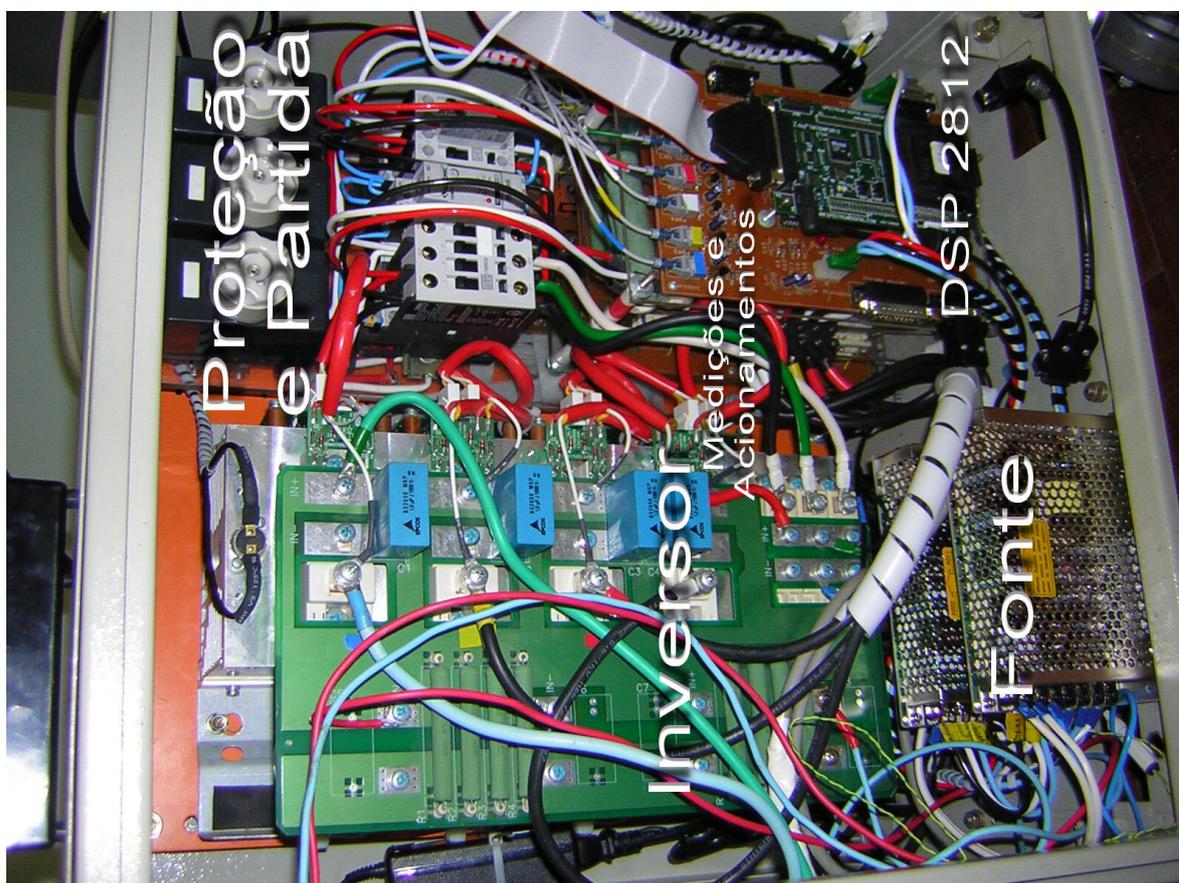


Figura 8-6 – Foto do Módulo de controle do MI

8.1.1.3 Conjunto Motor Gerador

O conjunto motor gerador é composto por uma Máquina Assíncrona Trifásica com o Rotor Bobinado e uma Máquina de Indução trifásica Gaiola de Esquilo. Ambas as máquinas são acopladas em uma placa base de montagem. As máquinas assíncronas trifásicas foram projetadas especialmente para serviço pesado em baixa tensão, para execução aberta com ventilação interna, proteção IP-23. Caracterizam-se por uma construção horizontal com pés e ponta de eixo com padrão B3. Possuem isolamento classe F da ABNT no rotor e no estator. Construídas para trabalho em ambiente à 40°C. Os enrolamentos foram especialmente tratados contra ação de umidade, ácidos e alcalinos específicos para a classe de tensão de 760 VCA. Os mancais foram dimensionados para acoplamento direto sem esforços radiais ou axiais acima da classe do diâmetro de ponta de eixo padrão da carcaça IEC/ABNT tipo 160. A máquina assíncrona com rotor bobinado tem potência nominal de 5kW, 4 pólos, tensão de 220/380 V no estator e 220 V para o rotor, frequência 60 Hz. A máquina assíncrona gaiola de esquilo, padronizada com carcaça 160M, com 4 pólos, para uso em uma faixa de frequência de rotação de 1200 a 2500 RPM, desenvolvendo 5 kW em 1200 RPM e 11,2 kW em 2500 RPM, com tensão de 220/380 V. Os parâmetros das máquinas podem ser vistos no Anexo 1.

O diagrama de blocos equivalente do conjunto motor gerador pode ser visto na Figura 8-8. Uma foto do conjunto motor gerador pode ser vista na Figura 8-7.



Figura 8-7 – Foto do conjunto Motor Gerador

ATENÇÃO: ESTE DESENHO É DE PROPRIEDADE DA EQUACIONAL ELÉTRICA E MECÂNICA LTDA. NÃO PODEMOS SER CÓPIADO, REVELADO, REPRODUZIDO OU TRANSMITIDO TOTAL OU PARCIALMENTE, NEM UTILIZADO PARA E POR TERCEIROS, SEM PERMISSÃO DA EQUACIONAL.

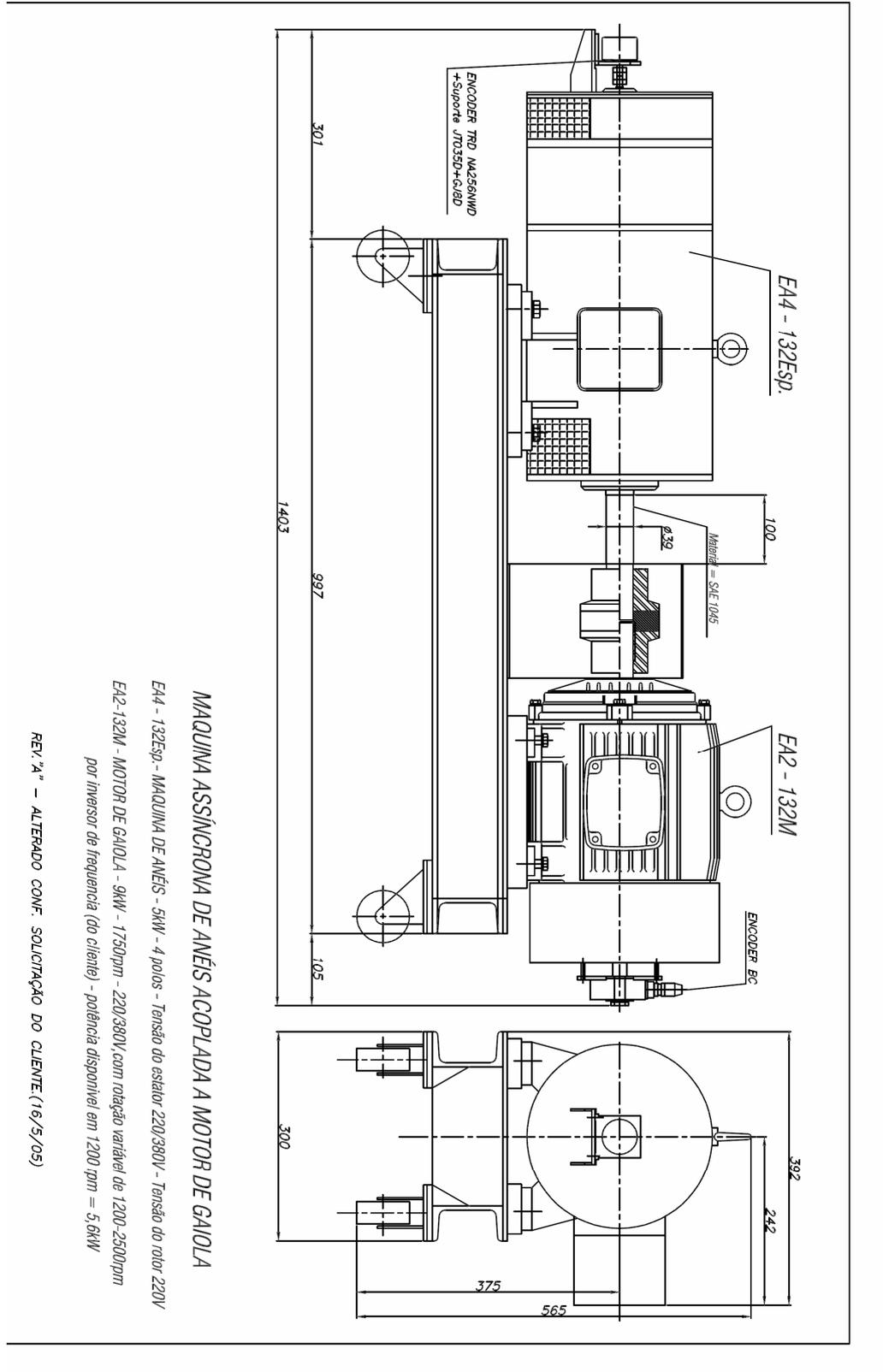


Figura 8-8 – Conjunto Motor-Gerador acoplados na placa base

8.1.1.4 Transformador

O transformador trifásico com três enrolamentos tem como principal função adequar os valores de tensão para o estator e rotor da MATRADA. Uma representação por diagramas de blocos pode ser vista na Figura 8-9.

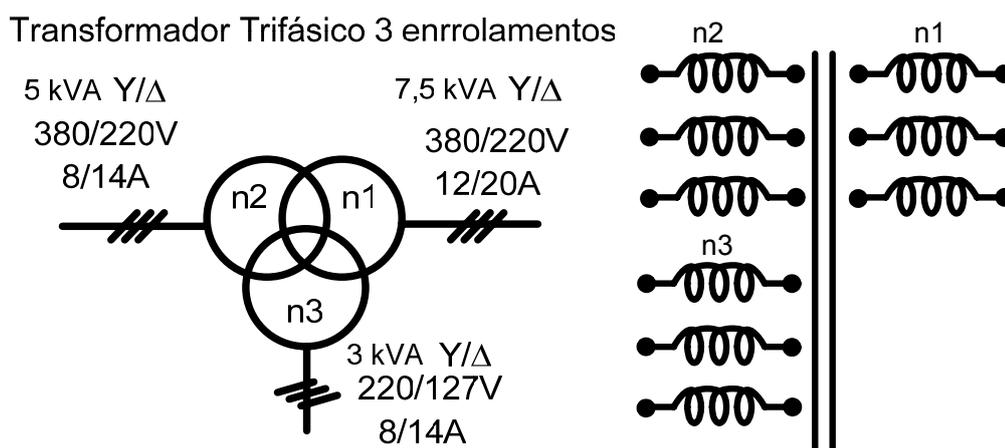


Figura 8-9 – Diagrama de Blocos do Transformador

8.1.1.5 Fonte de Energia Ininterrupta

Um sistema de alimentação isolado e estabilizado foi projetado para garantir a alimentação dos circuitos auxiliares, como por exemplo, as fontes de alimentação dos circuitos, bobinas das seccionadoras, sistemas de controle, medições e proteções da plataforma. Esse sistema é importante para garantir a operação durante quedas de tensões na rede elétrica a UPS utilizada é da empresa NHS e tem como principais características saída senoidal e potência de 1kVA.

8.1.1.6 *Software* de Gerenciamento e Controle

O *software* de gerenciamento e controle foi desenvolvido em linguagem de programação *C/Assembly*. Para a programação é utilizado um computador compatível para gravar o *software* no DSP. Detalhes do DSP e dos principais recursos utilizados em programação estão mostrados no Anexo 6.

8.2 **Sumário**

Este capítulo apresentou uma plataforma experimental voltada para o estudo e o desenvolvimento de estratégias de controle para geradores de indução utilizados em aplicações de geração de energia eólica. O sistema executa técnicas de controle em tempo real e faz uso de um software desenvolvido em linguagem *C/Assembly*. Essa plataforma desenvolvida pode ser utilizada para controlar e para analisar uma grande classe de técnicas de controle para aplicações em máquinas elétricas que requerem a modulação PWM para o acionamento. Resultados experimentais comprovam a versatilidade do sistema desenvolvido.

CAPÍTULO 9

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesse Capítulo, serão apresentados resultados experimentais que mostram a versatilidade da plataforma desenvolvida e o desempenho dos controladores projetados para o controle da MATRADA.

9.1 Resultados da MATRADA

Nessa seção são apresentados os resultados experimentais dos controladores do conversor estático duplo da MATRADA.

9.1.1 Controle do conversor do lado da rede elétrica

O conversor do lado da rede opera com fator de potência unitário e é responsável pelo controle da tensão do barramento CC. Para isso, o conversor opera com três malhas de controle. A ação de controle sobre as correntes do filtro de rede é realizada em coordenadas síncronas orientadas no referencial da tensão da rede.

Após completar o estágio de pré-carga, o controle da tensão do barramento CC é habilitado. Na Figura 9-1 pode ser visto as correntes i_{af} , i_{bf} e i_{cf} na entrada do filtro de rede.

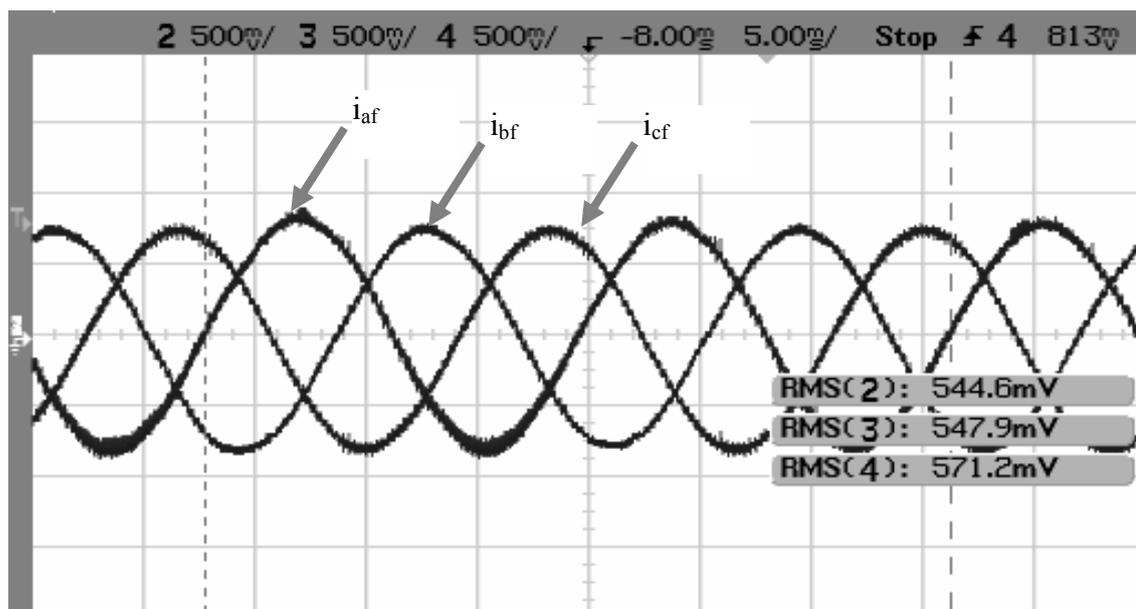


Figura 9-1 – Resultado experimental. Controle das correntes do conversor do lado da rede em *abc*. Escala Horizontal: Tempo 5ms/div. Escala Vertical da Corrente: 5 A/div

O comportamento da tensão do barramento CC durante degraus de carga pode ser visto na Figura 9-2.

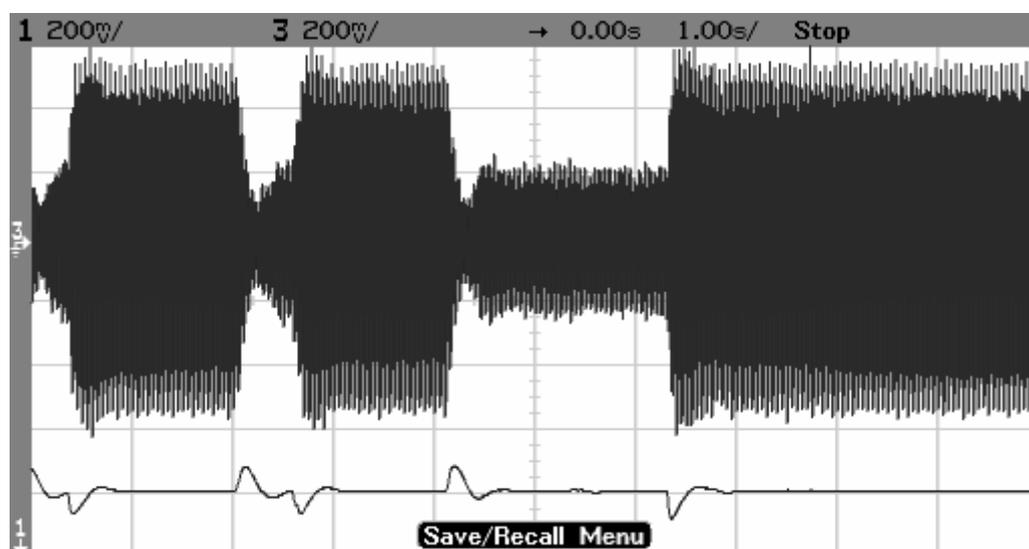


Figura 9-2 – Resultado experimental. Controle do barramento CC 450 V – Tensão do barramento 450V e correntes do filtro de rede durante degraus de carga no barramento CC. Escala Horizontal: Tempo 1s/div. Escala Vertical da Tensão: 100V/div. Escala Vertical da Corrente: 2 A/div

Um ensaio experimental de 1 kW pode ser visto na Figura 9-3. Onde o sistema opera com fator de potência próximo ao unitário, um diagrama fasorial ilustra o alinhamento das correntes e tensões de entrada do filtro de rede.

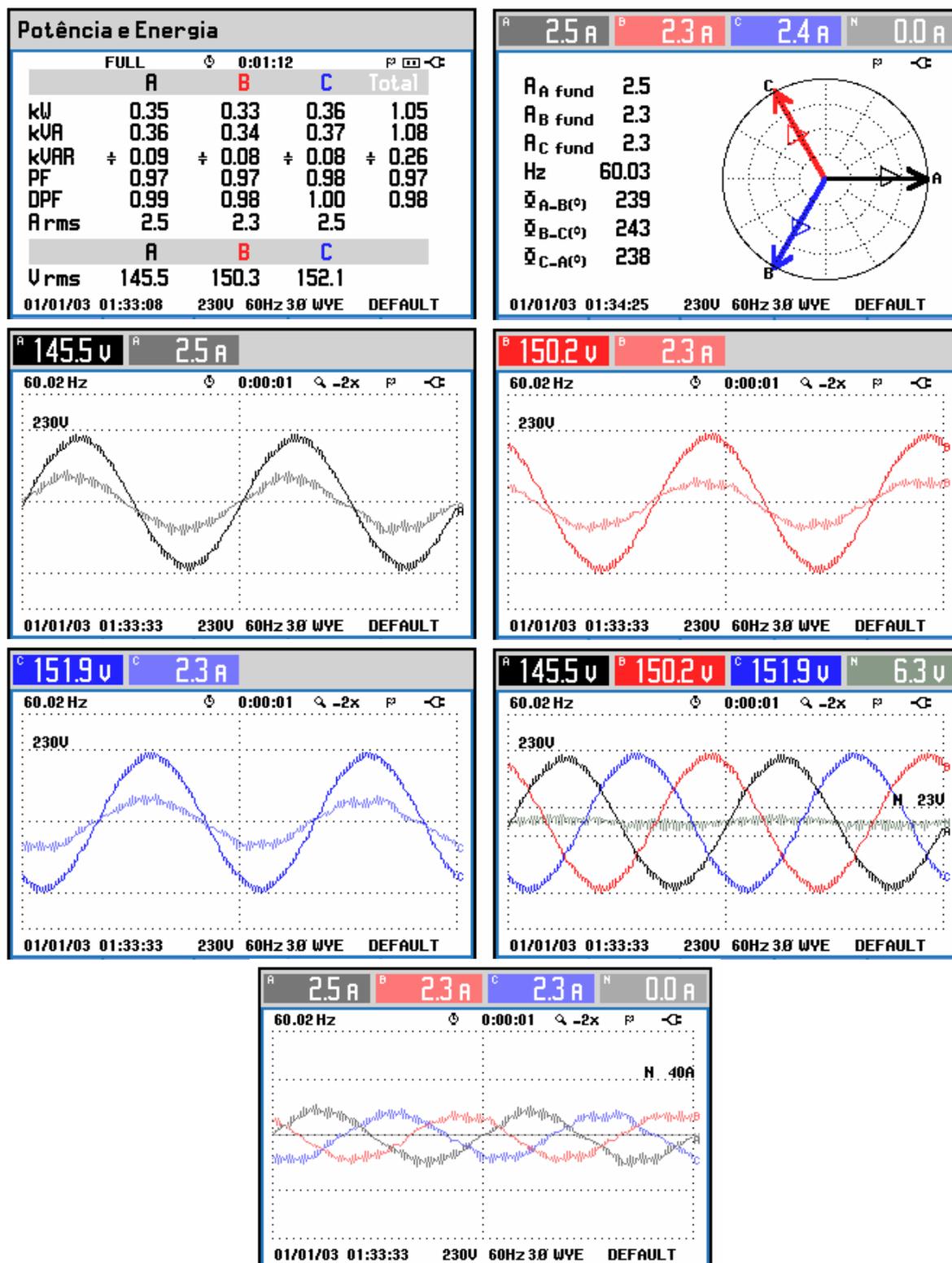


Figura 9-3 – Resultado experimental. 1kW - Tensões da rede elétrica em *abc* no secundário do transformador, correntes do filtro e diagrama fasorial.

As correntes do filtro de rede em coordenadas síncronas no referencial da tensão estatórica armazenadas na memória do DSP podem ser vistas na Figura 9-4.

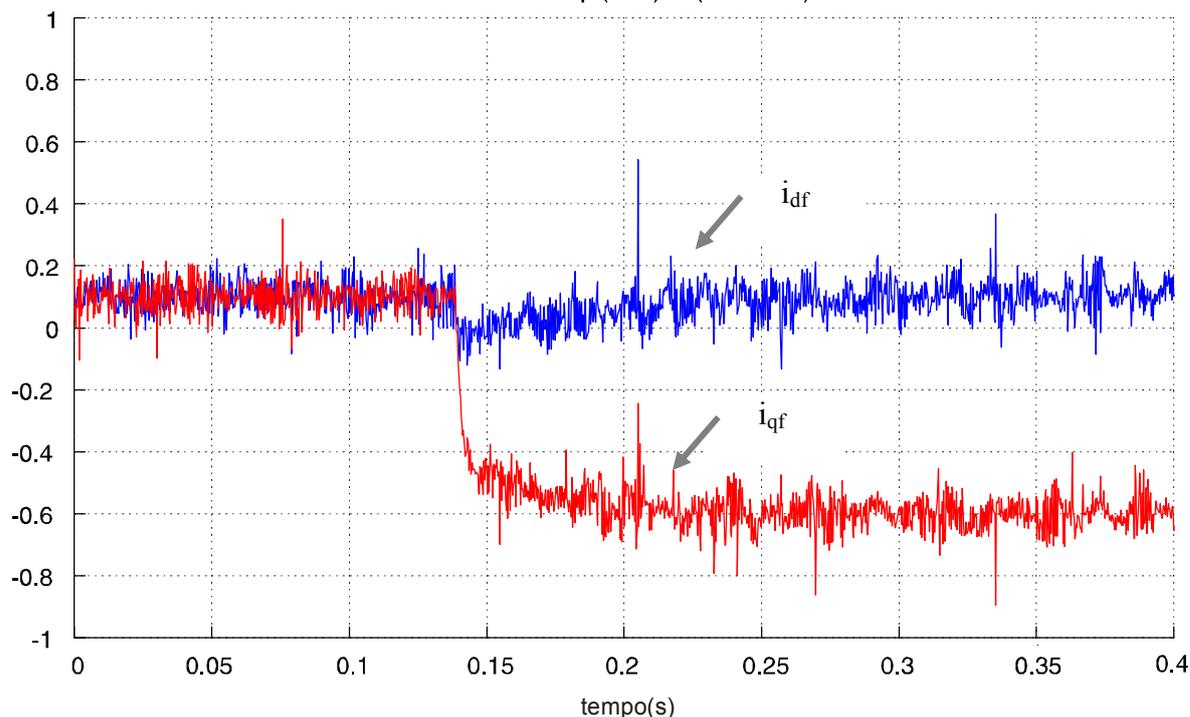


Figura 9-4 – Resultado experimental da memória do DSP. Controle das correntes do filtro de rede – Degrau de referência da corrente i_{qf} do filtro de rede. Mostra o acoplamento entre as correntes em coordenadas síncronas. Escala Horizontal: Tempo 50ms/div. Escala Vertical da Corrente: 1 A/div (1 p.u. = 10A)

Na próxima seção são apresentados alguns resultados experimentais para mostrar o desempenho dos controladores do conversor do lado do rotor da MATRADA.

9.1.2 Controle do conversor do lado do rotor da MATRADA

Conforme apresentado no Capítulo 4, o conversor do lado do rotor da MATRADA opera com duas malhas internas de corrente e duas malhas externas de potência. Para o controle independente das potências estatóricas, os controladores vetoriais operam em coordenadas síncronas com orientação na posição do fluxo estatórico estimado. A partir das tensões medidas no secundário do transformador, a frequência angular do fluxo estatórico pode ser estimada pelo algoritmo apresentado no capítulo 3. A estimativa da frequência elétrica angular do fluxo estatórico pode ser vista na Figura 9-5.

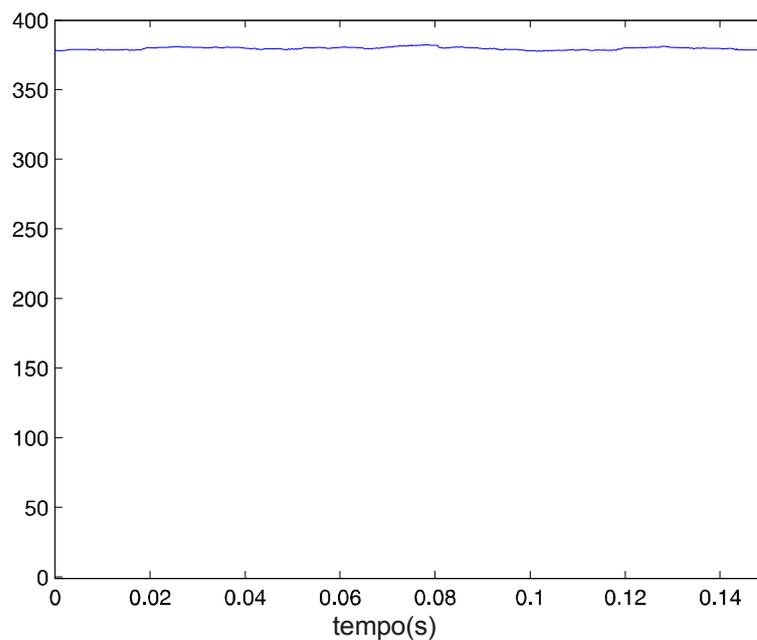


Figura 9-5 – Resultado experimental da memória do DSP. Estimador não linear - Frequência elétrica angular do fluxo estatórico estimado. Escala Horizontal: Tempo 20ms/div. Escala Vertical da frequência angular: rad/s

Na Figura 9-6 a posição do fluxo estatórico estimada é mostrada.

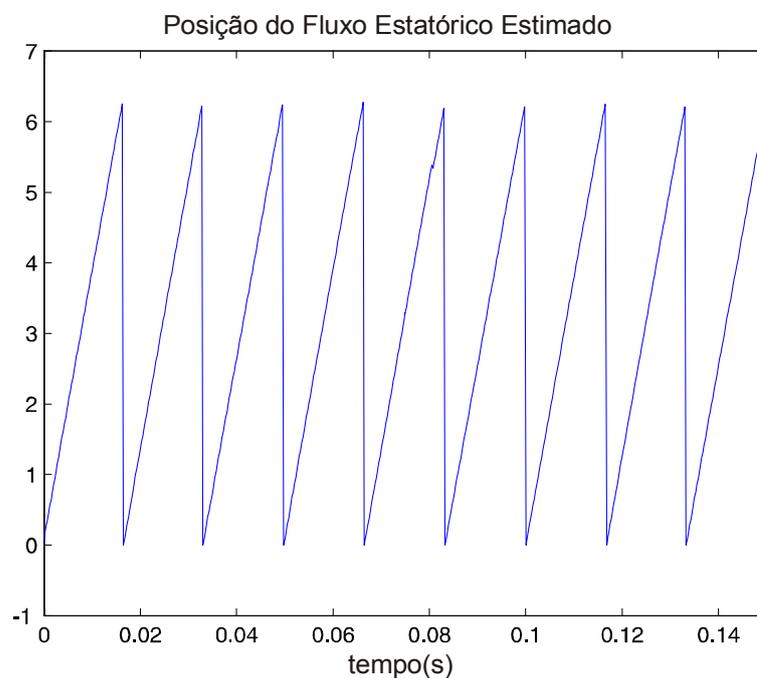


Figura 9-6 – Resultado experimental da memória do DSP. Estimador não linear - Posição estimada do fluxo estatórico da MATRADA. Escala Horizontal: Tempo 50ms/div. Escala Vertical da posição do fluxo: rad

O erro de estimação pode ser visto na Figura 9-7.

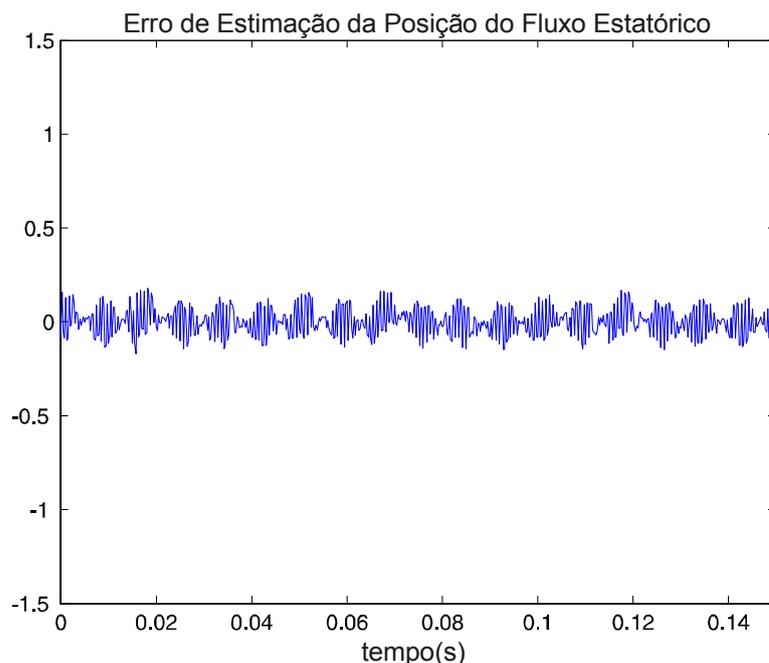


Figura 9-7 – Resultado experimental da memória do DSP. Estimador não linear – Erro da estimativa da posição do fluxo estático da MATRADA. Escala Horizontal: Tempo 50ms/div. Escala Vertical do erro: rad.

Conforme o procedimento de partida apresentado no capítulo 6, nesse instante, podem ser habilitadas as malhas de controle das correntes rotóricas da MATRADA. A Figura 9-8 mostra as correntes rotóricas em coordenadas síncronas armazenadas na memória do DSP e a Figura 9-9 mostra as correntes rotóricas em *abc*.

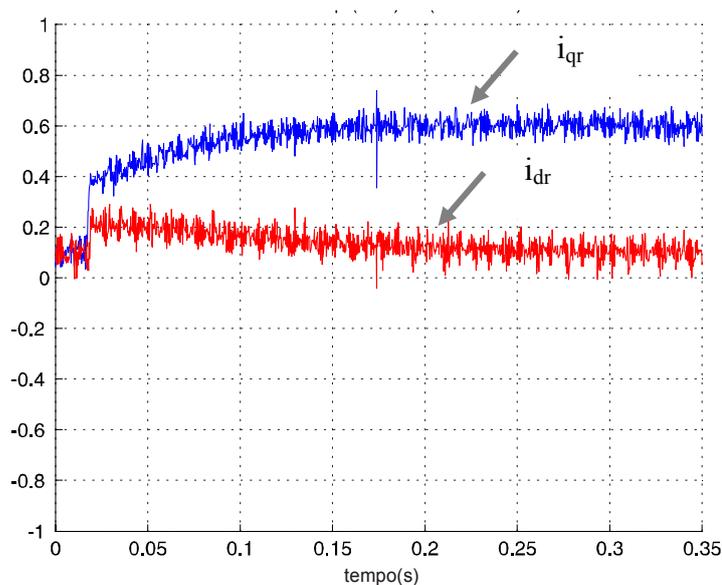


Figura 9-8 – Resultado experimental da memória do DSP. Controle da MATRADA - Correntes rotóricas da MATRADA em coordenadas síncronas. Acoplamento durante degrau de referência de corrente i_{qr} . Escala Horizontal: Tempo 50ms/div. Escala Vertical da corrente: 1 A/div.

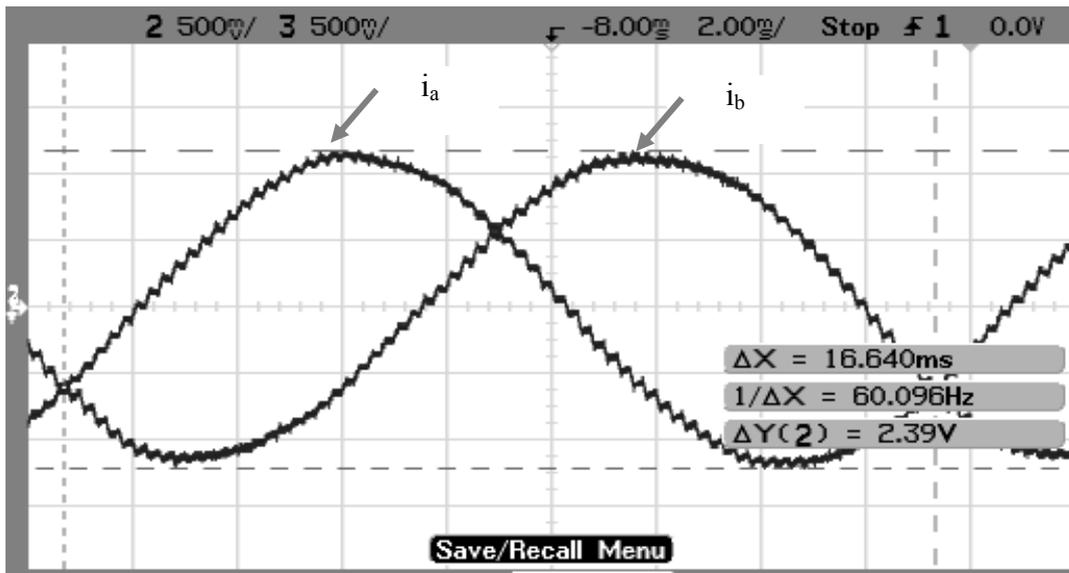


Figura 9-9 – Resultado experimental. Controle da MATRADA - Correntes rotóricas da MATRADA em coordenadas abc . Escala Horizontal: Tempo 20ms/div. Escala Vertical da Corrente: 5 A/div.

Conforme apresentado no capítulo 6, respeitando o procedimento de sincronização das equações (6.5) e (6.6), tem-se a tensão PWM induzida na fase a do estator da MATRADA e a tensão na fase a do secundário do transformador, que podem ser vistas na Figura 9-10.

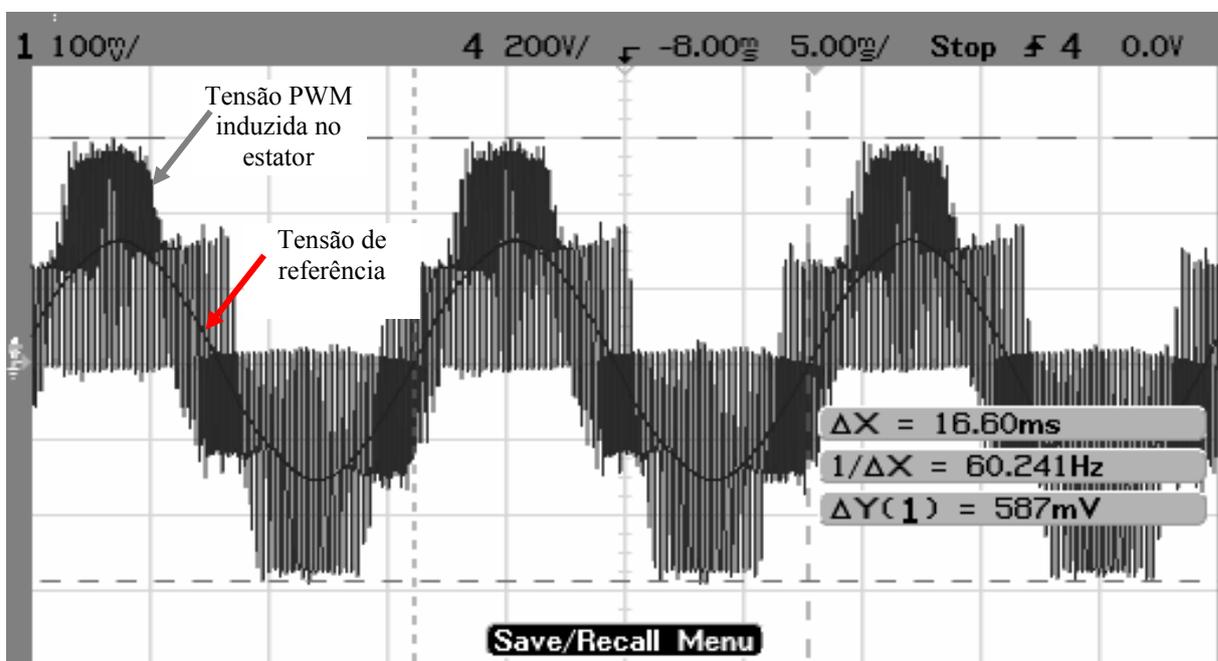


Figura 9-10 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Tensão PWM induzida na fase a do estator da MATRADA e tensão na fase a da rede elétrica. Escala Horizontal: Tempo 5ms/div. Escala Vertical da tensão: 200 V/div

As tensões induzidas no estator da MATRADA antes da conexão com a rede elétrica são PWM. Devido a esse fato, foi adicionado um filtro para melhorar a visualização da tensão induzida. A Figura 9-11 mostra a tensão induzida no estator da MATRADA.

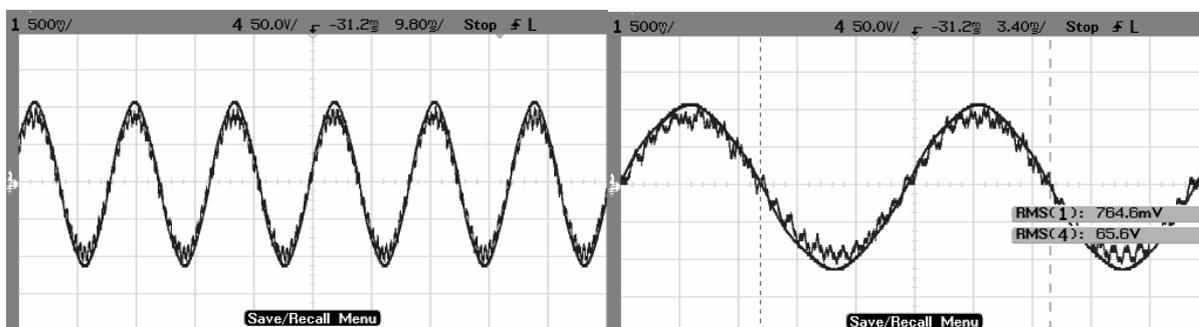


Figura 9-11 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Tensão filtrada induzida na fase *a* do estator da MATRADA e tensão na fase *a* da rede elétrica. Escala Horizontal: Tempo Fig (a) 9,8ms/div e Fig (b) 3,4ms/div. Escala Vertical da tensão: 50 V/div

Na Figura 9-12 pode ser visto a corrente e tensão da fase *a* do estator quando o gerador fornece potência ativa para a rede elétrica.

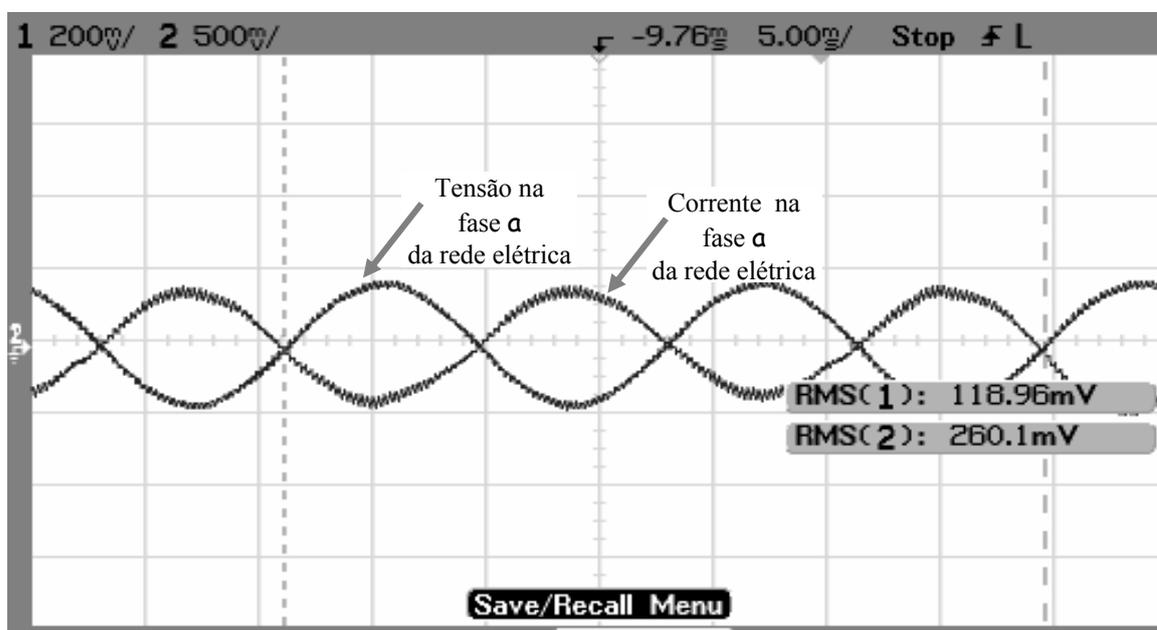


Figura 9-12 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Gerando potência Ativa. Corrente e tensão na fase *a* da rede elétrica. Escala Horizontal: Tempo 5ms/div. Escala Vertical da tensão: 100 V/div. Escala vertical da corrente: 5A/div

As correntes rotóricas durante a passagem entre os modos de operação subsíncrono, síncrono e sobre síncrono podem ser vistas na Figura 9-13.

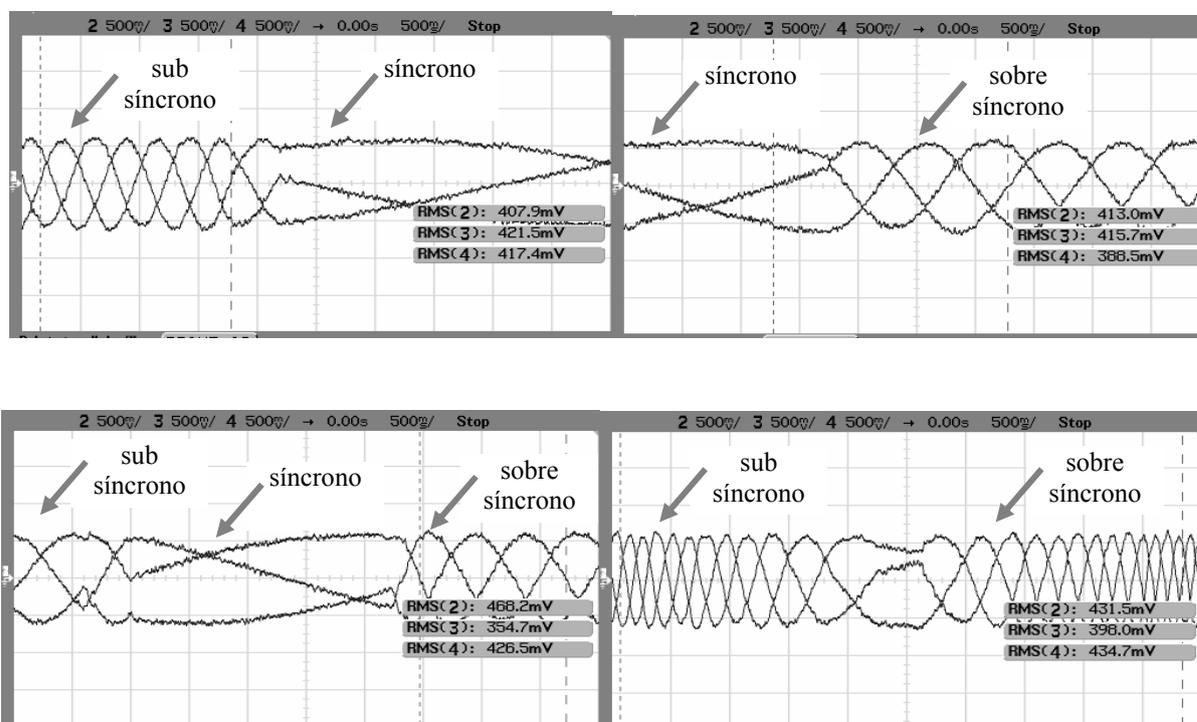


Figura 9-13 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Correntes rotóricas durante a passagem do modo de operação sub-síncrono para síncrono. Escala Horizontal: Tempo 5ms/div. Escala Vertical da corrente: 5A/div

Resultados em potência reduzida são apresentados para mostrar a operação quando a MATRADA fornece potência Ativa. A potência envolvida nos ensaios mostrados nas próximas figuras está na ordem de 160 W.

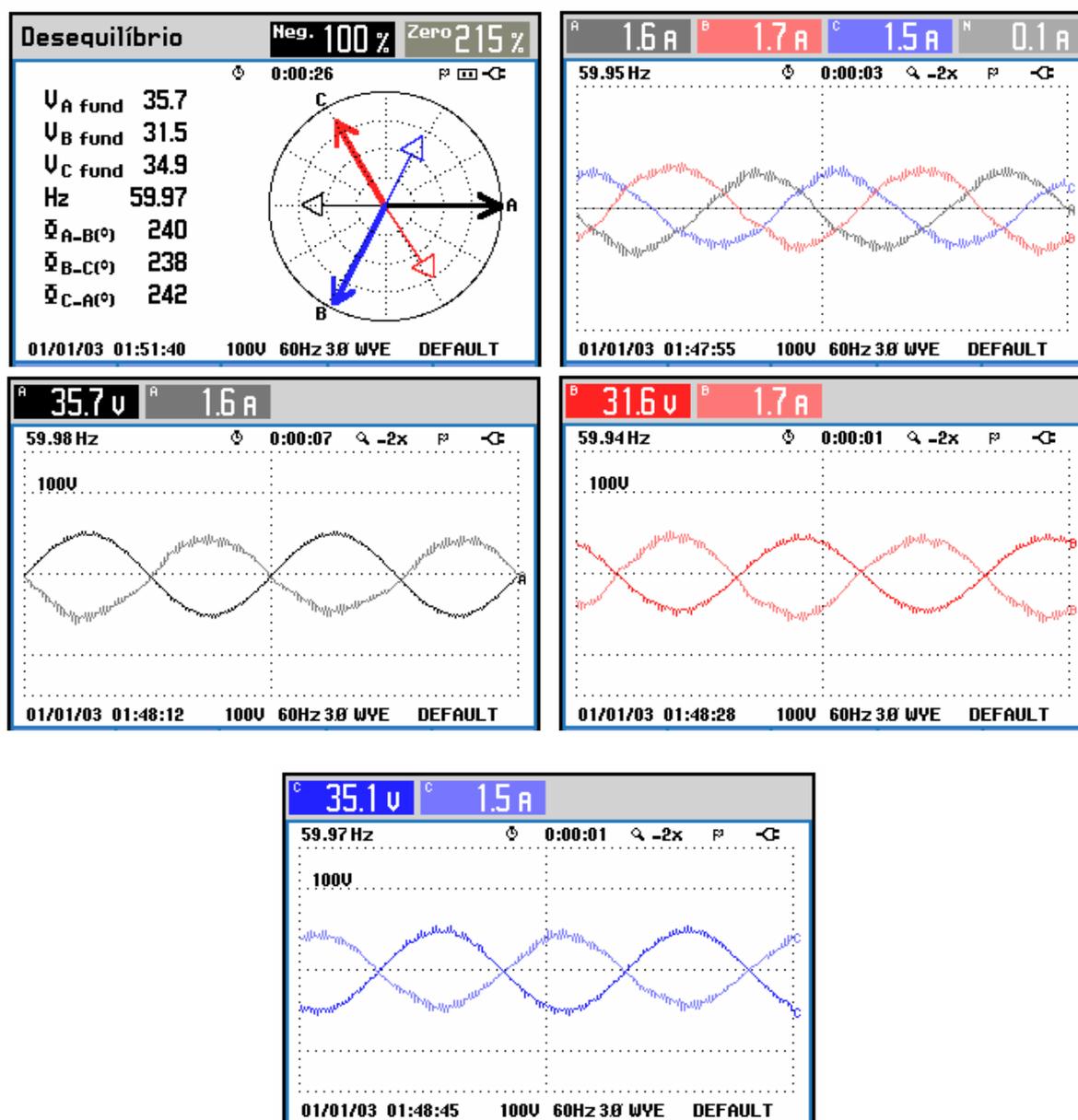
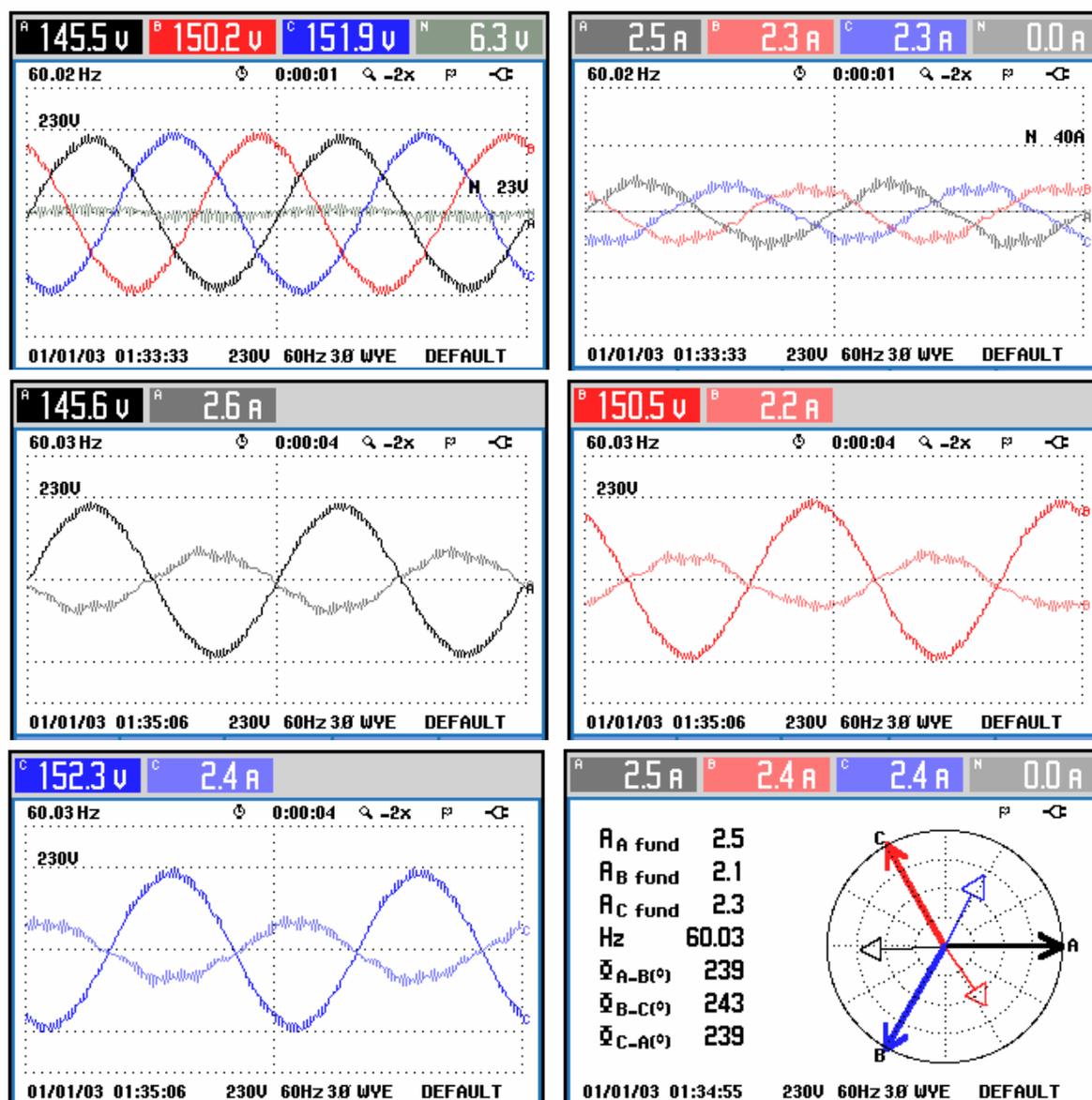


Figura 9-14 – Resultado experimental com potência reduzida. Controle da MATRADA – Gerando potência Ativa.

Resultados em potência intermediária são apresentados para mostrar a operação quando a MATRADA fornece potência Ativa. A Figura 9-15 ilustra um ensaio de 1kW.



Potência e Energia				
	A	B	C	Total
kW	- 0.35	- 0.34	- 0.36	- 1.05
kVA	0.36	0.35	0.36	1.08
kVAR	0.07	0.08	0.07	0.22
PF	-0.98	-0.98	-0.98	-0.98
DPF	-0.99	-1.00	-1.00	-0.99
I_{rms}	2.5	2.3	2.4	
V_{rms}	145.9	150.8	152.6	

Figura 9-15 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Gerando potência Ativa. Correntes e tensões nas fases *abc* da rede elétrica. Escala vertical da corrente: 10A/div

A Figura 9-16 ilustra uma operação em potência intermediária, 1.6 kW. Pode-se observar as formas de onda da corrente e da tensão no ponto de conexão com a rede elétrica.

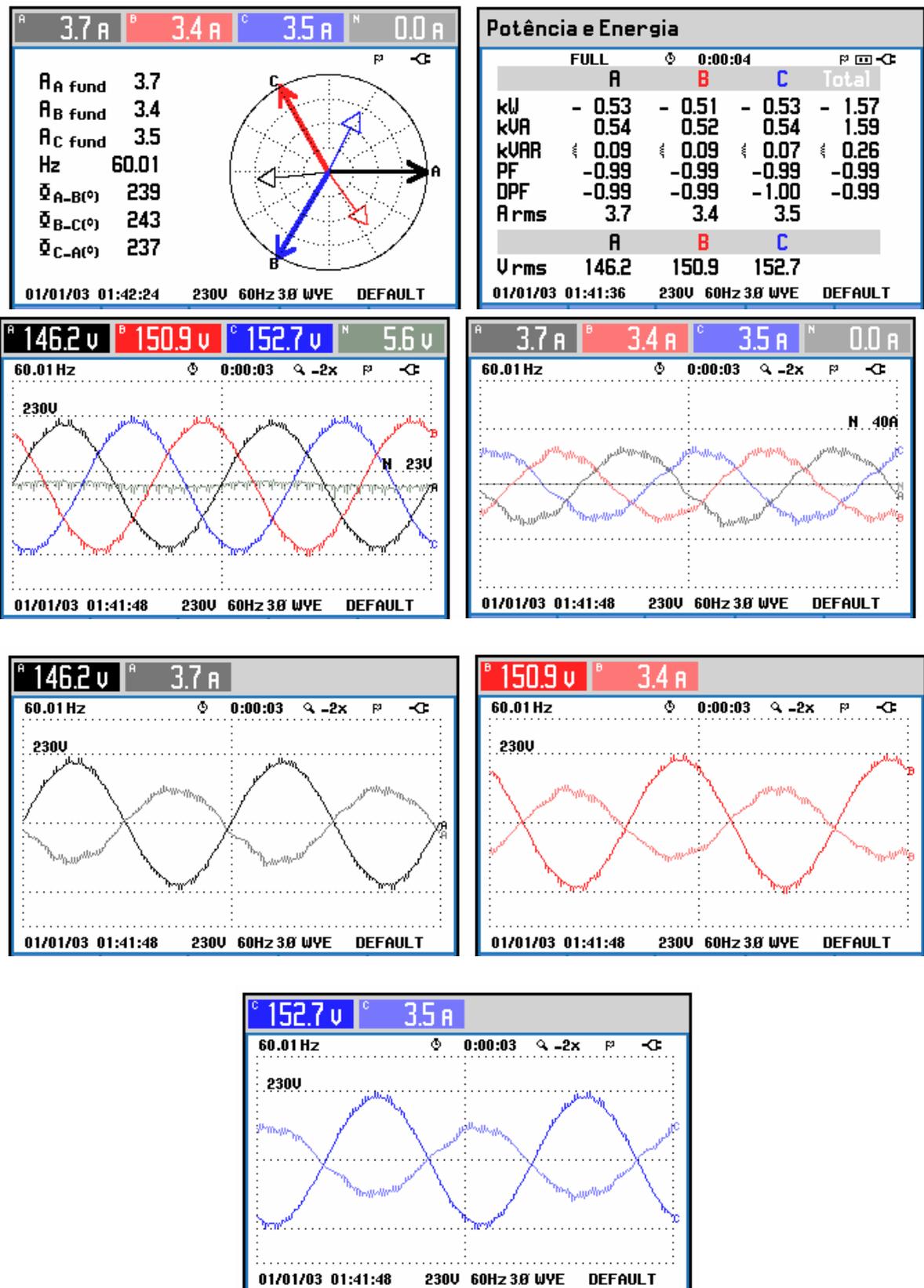


Figura 9-16 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Gerando potência Ativa. Correntes e tensões nas fases *abc* da rede elétrica. Escala vertical da corrente: 10A/div

Resultados na potência nominal da plataforma desenvolvida, 5 kVA, podem ser vistos na Figura 9-17. Nesse experimento a MATRADA fornece somente reativo a rede elétrica.

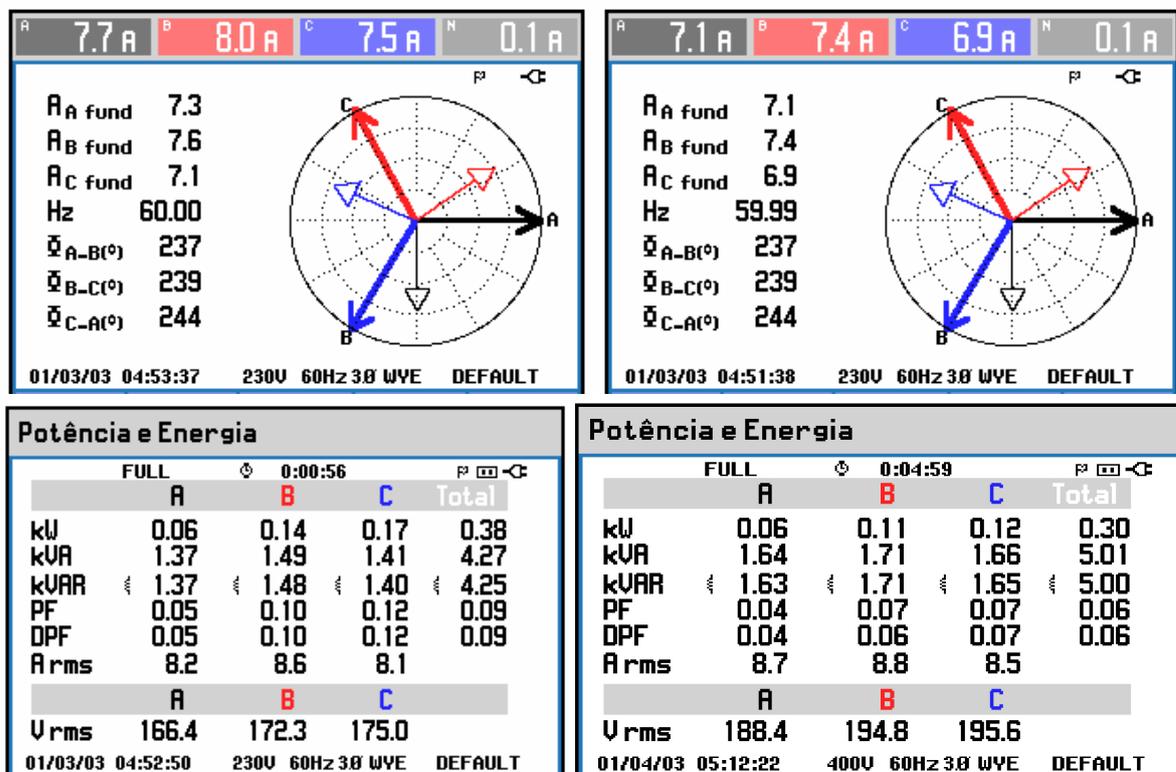


Figura 9-17 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Gerando potência reativa. Diagrama Fasorial.

A Figura 9-18 mostra a medida do torquímetro dinâmico durante degraus na referência de corrente rotórica de eixo direto.

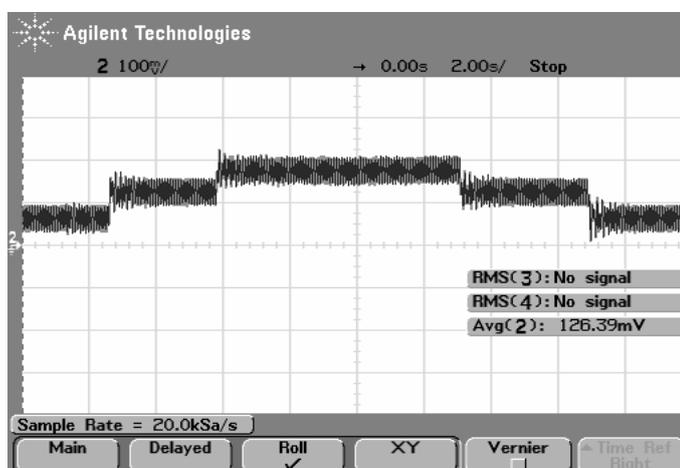


Figura 9-18 – Resultado experimental. Controle da MATRADA – Medida de torque durante degrau de referência de corrente i_{dr} .

9.1.3 Comparação dos resultados obtidos por simulação e experimental do comportamento transitório do sistema operando em malha fechada.

Com a finalidade de comparar os resultados obtidos por simulação com os resultados obtidos experimentalmente do sistema operando em malha fechada, foram realizados alguns ensaios. Os resultados de simulações foram obtidos a partir das equações descritas em (3.79). Colocando o sistema real em condições semelhantes, obteve-se os seguintes resultados:

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

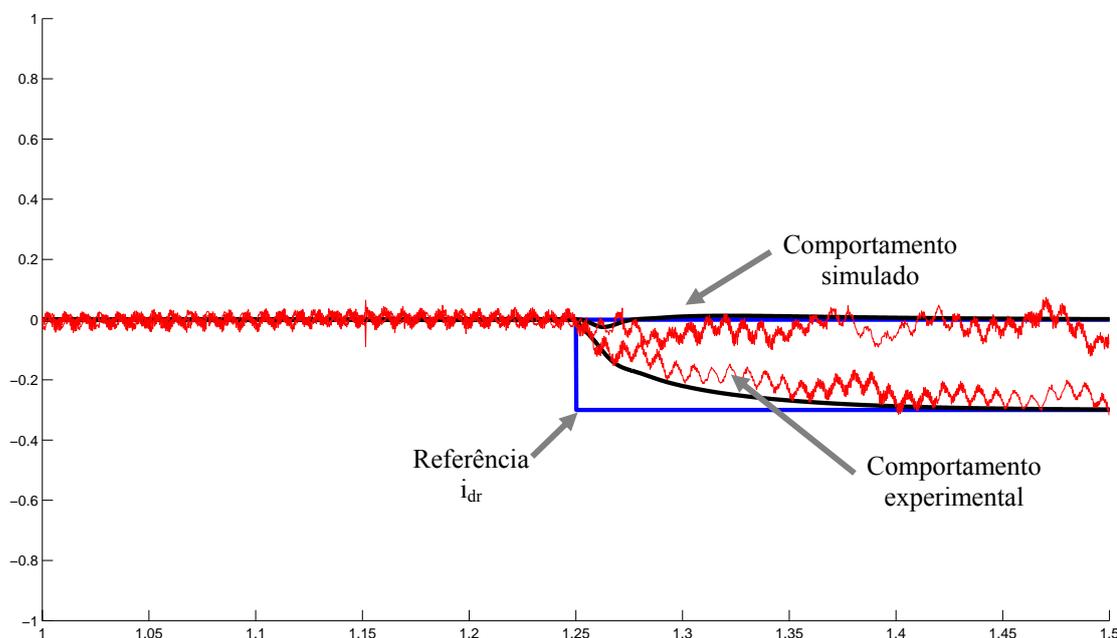


Figura 9-19 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

A Figura 9-20 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 30% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

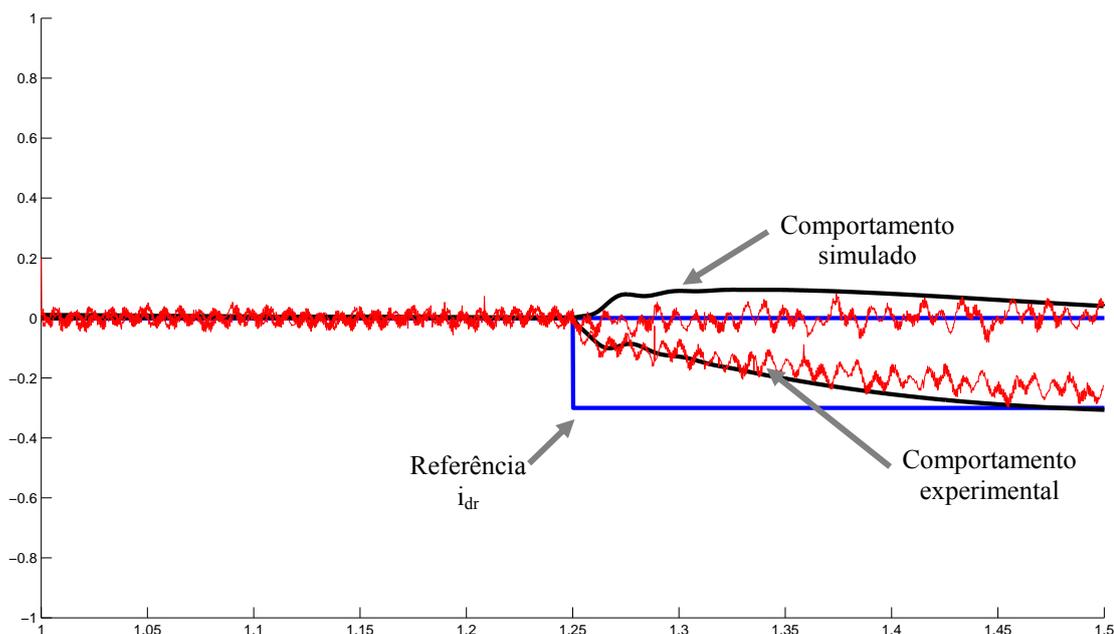


Figura 9-20 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 30% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

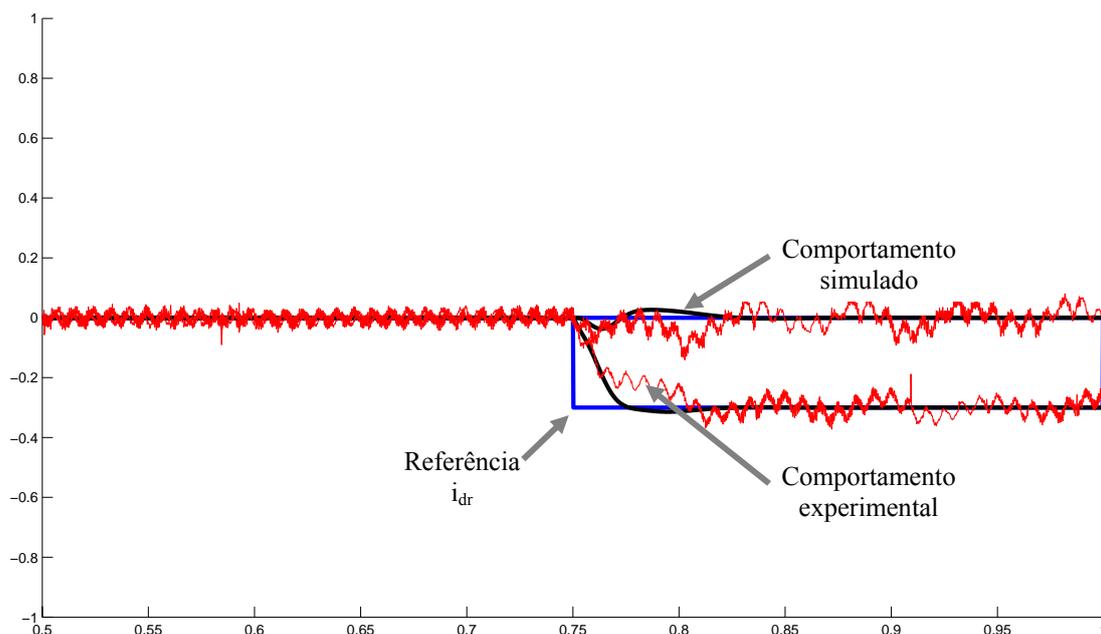


Figura 9-21 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 30% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

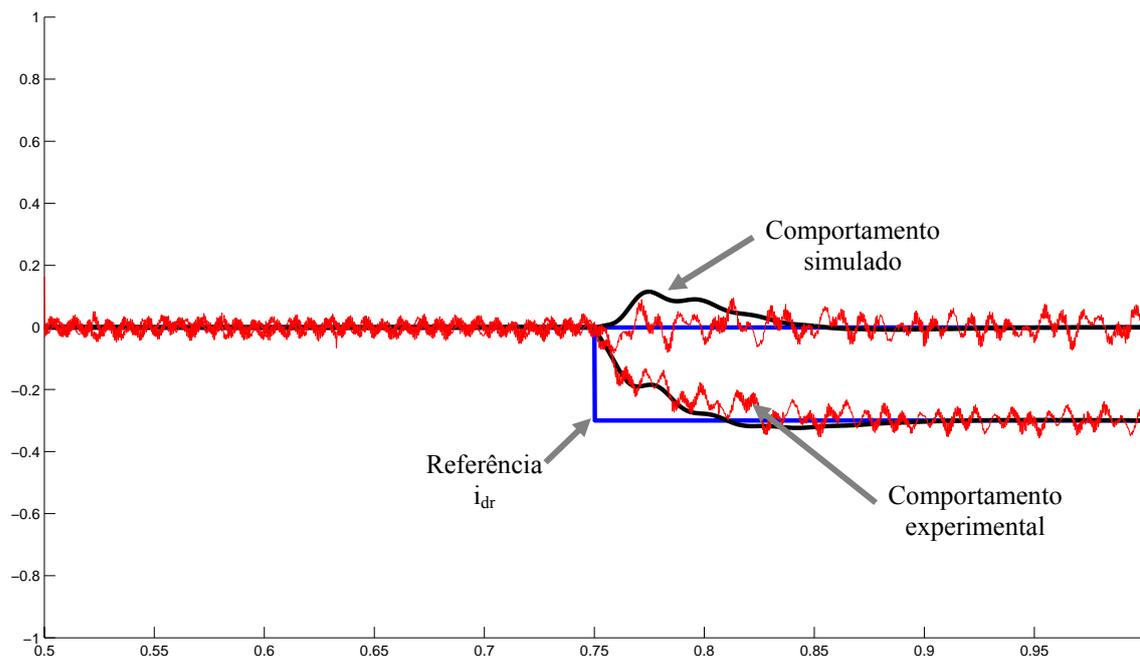


Figura 9-22 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 30% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1500 rad/s.

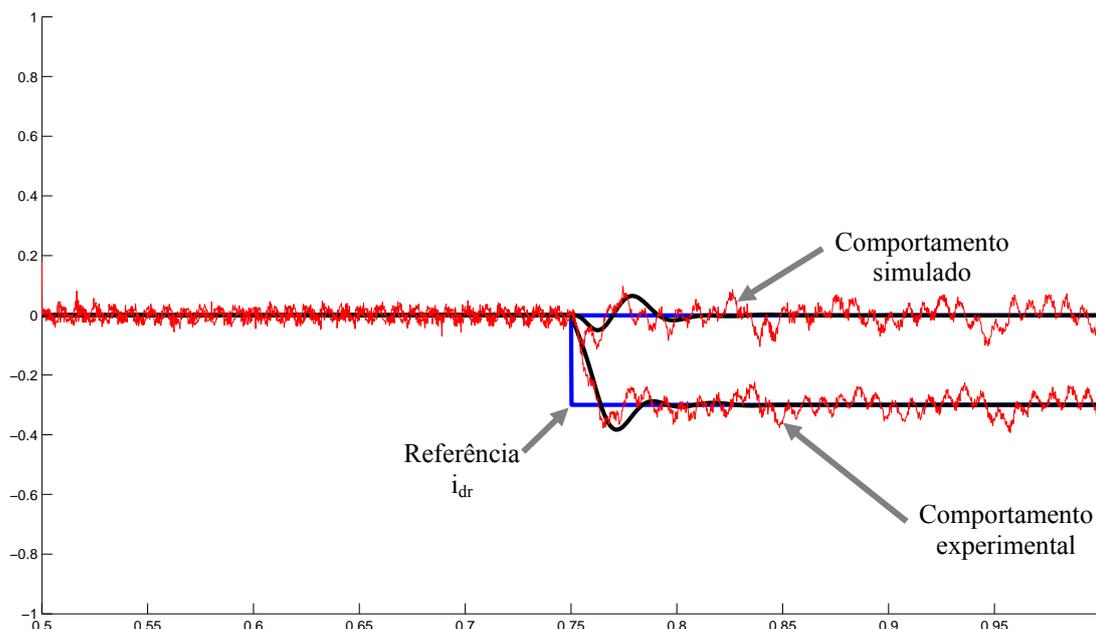


Figura 9-23 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1500 rad/s.

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

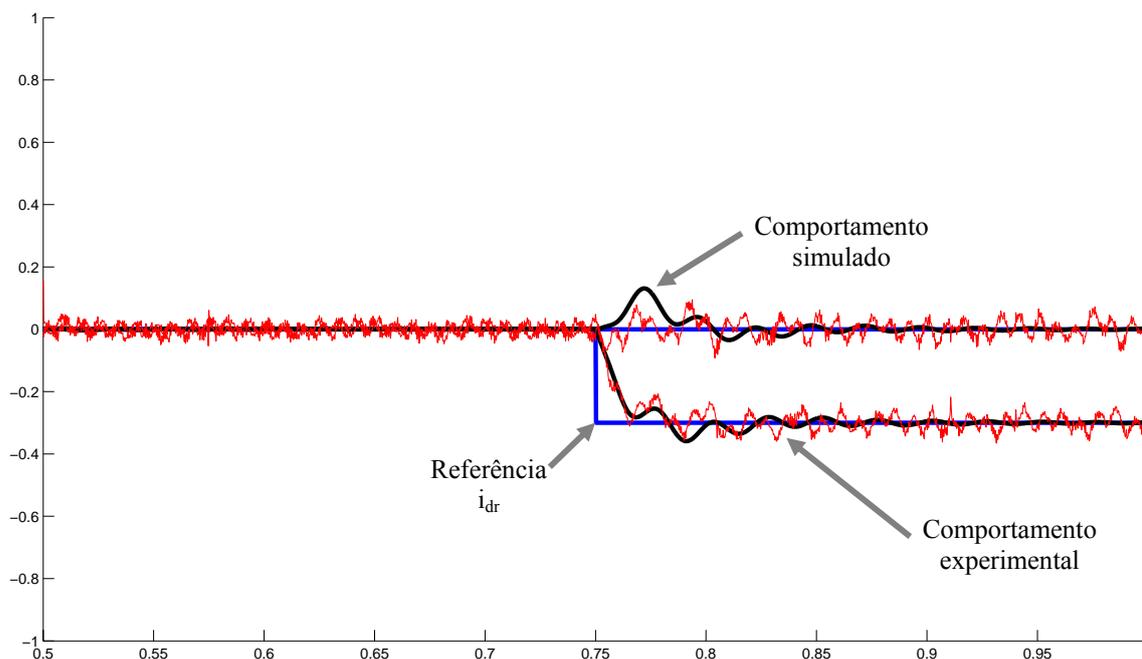


Figura 9-24 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 2% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 500 rad/s.

A Figura 9-19 mostra em azul as referências de corrente rotórica, em preto o comportamento transitório das correntes obtido por simulação, e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente para um escorregamento de 100% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

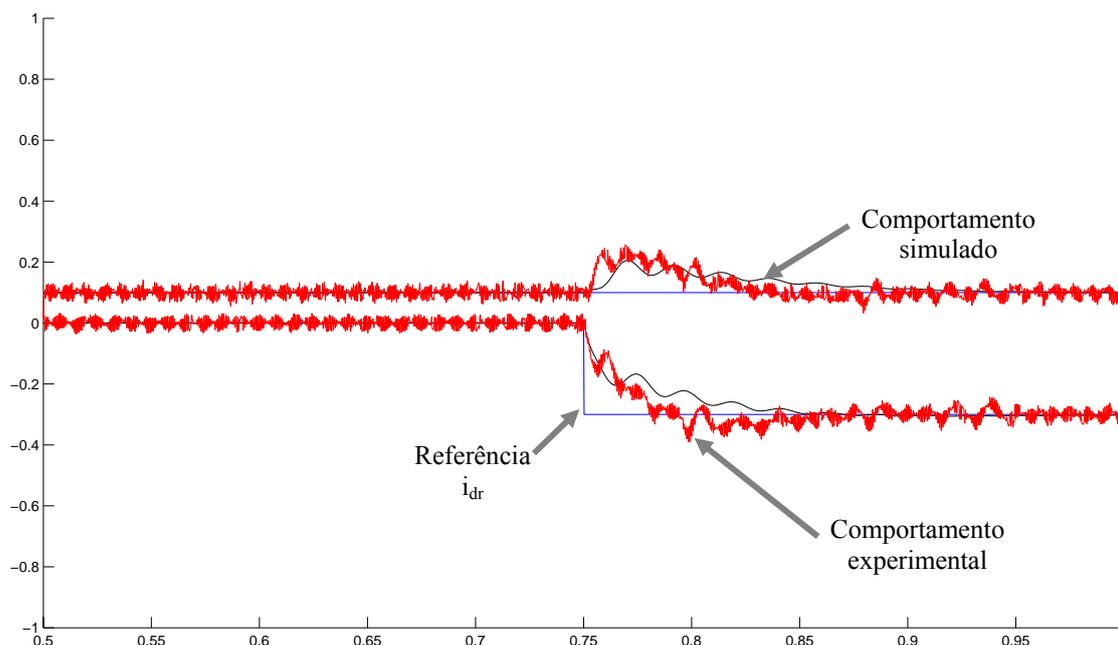


Figura 9-25 – Resultado experimental. Comportamento transitório – Em azul as referências de corrente, em preto o comportamento transitório simulado e em vermelho o comportamento transitório obtido experimentalmente. Para um escorregamento de 100% para uma banda passante do estimador de 100 rad/s e para uma banda passante dos controladores de corrente rotórica igual a 1000 rad/s.

9.2 Sumário

Esse capítulo apresentou os resultados experimentais do sistema de geração com a MATRADA conectada a rede elétrica com o controle do conversor estático duplo.

Principais conclusões:

Os resultados experimentais comprovam a metodologia desenvolvida para a partida e sincronização independente da velocidade do rotor da turbina.

Os resultados obtidos da memória interna do DSP comprovam o bom desempenho do algoritmo de estimação do fluxo estático e validam o modelo e projeto desenvolvidos teoricamente.

O comportamento dinâmico das malhas de corrente rotóricas obtidos experimentalmente são muito próximos dos apresentados em simulação, o que comprova e

valida o modelo desenvolvido matematicamente representa a maioria dos fenômenos de interesse que envolvem a MATRADA conectada com a rede elétrica.

O controle independente da potência ativa e reativa pode ser comprovado.

Os resultados experimentais comprovam a versatilidade da plataforma de ensaios desenvolvida.

Os resultados obtidos para uma faixa de potência reduzida até a nominal comprovam o desempenho do sistema em toda a faixa de operação.

CAPÍTULO 10

CONCLUSÕES

Este trabalho trouxe contribuições para o desenvolvimento de sistemas de turbina eólica que utilizam a máquina assíncrona trifásica com rotor em anéis duplamente alimentada para geração de energia elétrica. Entre os estudos realizados, algumas contribuições destacam-se:

O desenvolvimento de modelos matemáticos que possibilitam o projeto dos controladores de corrente rotórica e potência estatórica da MATRADA. Através desses modelos também foi possível realizar uma análise da estabilidade do sistema operando em malha fechada com a orientação no fluxo estatórico estimado.

Foi desenvolvida uma estratégia de controle para o conversor estático duplo com controle da energia no barramento CC, controle das correntes rotóricas e potências estatóricas da MATRADA.

Foi apresentado um estimador da posição do fluxo estatórico da MATRADA para orientação dos controladores vetoriais. Uma metodologia de projeto e a prova matemática da estabilidade desse estimador foi apresentada.

Investigou-se uma metodologia de partida e sincronização para o sistema de geração da MATRADA com a rede elétrica que independe da velocidade de rotação do eixo da turbina eólica.

Foi desenvolvido também um método para a operação do conversor em paralelo que possibilita o seu desligamento em qualquer modo de operação do sistema de geração.

Este trabalho também teve um caráter experimental muito acentuado ao passo que tratou de assuntos relativos à implementação de uma plataforma experimental para ensaios de conexão da MATRADA com a rede elétrica.

Os resultados experimentais obtidos comprovaram os estudos realizados. Melhorias de desempenho podem ser alcançadas com o uso de outras técnicas de sincronismo que sejam indiferentes ao desequilíbrio das tensões da rede. Além dessas melhorias, como sugestão para trabalhos futuros pode-se citar:

1. Desenvolver técnicas de sincronismo considerando as tensões da rede elétrica desequilibradas;
2. Investigação do comportamento de outras técnicas de controle frente às distúrbios na rede elétrica;
3. Desenvolver um sistema que independa da medida de posição do eixo do rotor da turbina para uma operação *sensorless*.
4. Desenvolver um sistema de alto desempenho para a operação durante afundamentos de tensão.
5. Validar experimentalmente a estratégia desenvolvida para a atuação do circuito *crowbar*.
6. Investigar outras topologias de conversores para o acionamento da MATRADA, como por exemplo, a utilização de conversores multiníveis e topologias de conversores em operando em paralelo.

REFERÊNCIAS

BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Lei, vol. 10.438: Presidência da República, Casa Civil, 2002.
- [2] R. C. dos Santos, "Parâmetros de Projeto de Fazendas Eólicas a Aplicação Específica no Rio Grande do Sul, " Dissertação de Mestrado, Porto Alegre, RS, Brasil. Pontificia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2002.
- [3] "Atlas eólico do Brasil e dos Estados do Paraná e Ceará," Secretaria de Energia, Minas e Comunicações.
- [4] O. A. Camargo, F. J. L. d. Silva, R. d. S. Custodio, and N. Gravino, "Atlas eólico: Rio Grande do Sul," Estado do Rio Grande do Sul, Secretaria de Energia, Minas e Comunicações.
- [5] "Programa de Apoio ao Aproveitamento do Potencial eólico do Estado do Rio Grande do Sul," vol. decreto 41.812: Governo do Estado do Rio Grande do Sul, 2002.
- [6] CREA, in *Revista setembro 2004*. www.crea-rs.org.br: Conselho Regional de Engenharia, Arquitetura e Agronomia do Rio Grande do Sul, 2004.
- [7] J. Niiranen, "Voltage dip ride through of a doubly-fed generator equipped with an active crowbar," *Nordic Wind Power Conference*, 2004.
- [8] C. EnBlin and B. Hahn, "Wind Energy Report Germany," *ISET*, 2003.
- [9] G. O. Rodrigo, R. S. Selênio, L. R. P. Eduardo, F. S. Kleber, A. S. José, and S. C. Gustavo, "Análise do Impacto de Distúrbios em Sistemas com Geradores de Indução de Dupla Alimentação Conectados a Rede Elétrica," *CBA*, 2004.

- [10] R. Datta and V. Ranganathan, "A simple Position-Sensorless Algorithm for Rotor-Side Field-Oriented Control of Wound-Rotor Induction Machine," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 48, 2001.
- [11] A. Petersson, "Analysis, Modeling and Control of Doubly Fed Induction Generators for Wind Turbine," vol. Doctor Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2003.
- [12] J. Marques, "Turbinas Eólicas: Modelo, Análise, e Controle do Gerador de Indução com Dupla Alimentação," vol. Dissertação de Mestrado. Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2004, pp. 200.
- [13] J. Marques, H. Pinheiro, J. R. Pineiro, H. L. Hey, and H. A. Gründling, "Survey on Variable Speed Wind Turbine System," *COBEP*, 2003.
- [14] R. Pena, J. C. Clare, and G. M. Asher, "Doubly fed induction generator using back-to-back PWM converters and its application to variable-speed wind-energy generation," in *IEE Proceedings Electric Power Applications*, vol. 143, 1996, pp. 231-240.
- [15] Gokhale, "Controller for a Wound Rotor Slip Ring Induction Machine," vol. 6.448.735 B1. United State Patent, 2002.
- [16] S. A. Gómez and J. R. Amenedo, "Grid Synchronization of Doubly Fed Induction Generator using Direct Torque Control," *IECON*, 2002.
- [17] E. Kim, Y. Kim, and C. Kim, "Power Control of a doubly-fed induction machine without Rotational transducers," presented at Power Electronics and Motion Control Conference, PIEMC, 2000.
- [18] W. Cheng and L. Xu, "Torque and Reactive Power Control of a Doubly-Fed Induction Machine by Position Sensorless Scheme," *Industry Applications Society Annual Meeting*, vol. 1, pp. 496 - 502, 1994.

- [19] R. Datta and V. T. Ranganathan, "Direct power control of grid-connected wound rotor induction machine without rotor position sensors," in *IEEE Transaction on Power Electronics*, 2001.
- [20] R. S. Pena, R. J. Cardenas, G. M. Asher, and J. C. Clare, "Vector controlled induction machines for stand-alone wind energy applications," *Industry Applications Society Annual Meeting, IAS*, pp. 1409 - 1415, 2000.
- [21] A. Petersson, L. Harnefors, and T. Thiringer, "Comparison Between Stator-Flux and Grid-Flux-Oriented Rotor Current Control of Doubly-Fed Induction Generators," *Power Electronics Specialists Conference, PESC*, vol. 1, pp. 482 - 486, 2004.
- [22] M. Heller and W. Schumacher, "Stability analysis of doubly-fed induction machines in stator flux reference frame," *Power Electronics Specialist PESC*, vol. 2, pp. 707-710, 1997.
- [23] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, 2^a ed: Wiley, 2006.
- [24] J. P. da Costa, J. Marques, H. A. Gründling, and H. Pinheiro, "Comportamento Dinâmico do Gerador de Indução com Dupla Alimentação Orientado no Fluxo Estatórico," *iSOBRAEP*, 2005.
- [25] S. Wang and Y. Ding, "Stability analysis of field oriented doubly-fed induction machine drive based on computer simulation," *Electric Machines and Power Systems*, pp. 11-24, 1993.
- [26] ANEEL, "Procedimentos de Distribuição," Agência Nacional de Energia Elétrica, 2006.
- [27] ONS, "Procedimentos de Rede," Operador Nacional do Sistema Elétrico, 2004.
- [28] M. Lindgren, "Modeling and control of voltage source converters connected to the grid," vol. Ph.D. dissertation. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 1998.

- [29] P. C. Krause, *Analysis of electric machinery*: McGraw-Hill, 1986.
- [30] Y. Tang and L. Xu, "Stator field oriented control of doubly-excited induction machine in wind power generating system," *Midwest Symposium on Circuits and Systems*, 1992.
- [31] L. Harnefors, "Control of Variable-Speed Drives," *Applied Signal Processing and Control*, 2002.
- [32] B. Hopfensperger, "Stator-Flux-Oriented Control of a Doubly-Fed Induction Machine With and Without Position Encoder," *Electric Power Applications, IEE Proceedings*, vol. 147, pp. 241 - 250, 2000.
- [33] R. Cardenas, "Sensorless Control of Induction Machines for Wind Energy Applications," *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC02*, vol. 1, pp. 265-270, 2002.
- [34] M. Cirrincione, M. Pucci, G. Cirrincione, and G. Capolino, "A New TLS Based MRAS Speed Estimation with Adaptive Integration for High Performance Induction Machine Drives," *Industry Applications Society Annual Meeting, IAS*, vol. 1, pp. 140 - 151, 2003.
- [35] A. L. F. Costa, "O Princípio de Invariância de LaSalle estendido aplicado ao estudo de coerência de geradores e à análise de estabilidade transitória multi-“swing”," vol. Tese de Doutorado. São Paulo: USP, 2000.
- [36] J. Holtz, "Sensorless Control of Induction Motor Drives," *proceedings of the IEEE*, vol. 90, pp. 1359 - 1394, 2002.
- [37] F. Peng and T. Fukao, "Robust Speed Identification for Speed-Sensorless Vector Control of Induction Motors," *Industry Applications, IEEE Transactions on*, vol. 30, pp. 1234 - 1240, 1994.

- [38] F. Z. Peng, "Speed and Flux Sensorless Field Oriented Control of Induction Motors for Electric Vehicles," *Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2000. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE*, vol. 1, pp. 133 - 139, 2000.
- [39] C. Schauder, "Adaptive Speed Identification for Vector Control of Induction Motors without Rotational Transducers," *IEEE*, 1992.
- [40] L. Zhen and L. Xu, "Sensorless Field Orientation Control of Induction Machines Based on a Mutual Scheme," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 45, 1998.
- [41] R. Zhou and J. Lai, "Low-Speed Performance Comparison of Induction Motor Sensorless Control Methods," *Computers in Power Electronics, 2000. COMPEL 2000. The 7th Workshop on*, pp. 247 - 252, 2000.
- [42] M. H. J. Bollen, "Fast Assessment Methods for Voltage Sags in Distribution Systems," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 32, pp. 1414 - 1423, 1996.
- [43] L. Harnefors and H.-P. Nee, "A General Algorithm for Speed and Position Estimation of AC Motors," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 47, pp. 77 - 83, 2000.
- [44] F. Botteron, "Análise, Projeto e Implementação de um Inversor PWM Trifásico para UPS de Média Potência," vol. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica. Santa Maria, RS, Brasil: Universidade Federal de Santa Maria, 2001.
- [45] R. F. d. Camargo, "Contribuição ao Estudo de Filtros Ativos de Potência," vol. Dissertação de Mestrado em Engenharia Elétrica: Universidade Federal de Santa Maria, 2002.
- [46] L. Malesani, P. Mattavelli, and S. Buso, "Robust dead-beat current control for PWM rectifiers and active filters," *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol. 35, pp. 613-620, 1999.

- [47] A. H. Mitwalli, S. B. Leeb, G. C. Verghese, and V. J. Thottuvelil, "An Adaptive Digital Controller for a Unity Power Factor Converter," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 11, pp. 374 - 382, 1996.
- [48] G. F. Franklin, D. J. Powell, and M. L. Workman, *Digital Control of Dynamic Systems*: Addison-Wesley, 1990.
- [49] ONS, "Estudos Complementares para Acesso à Rede Elétrica de Centrais Eólicas do PROINFA," Operador Nacional do Sistema, 2005.
- [50] "International Standard Situation Concerning Components of Distributed Power Systems and Recommendations of Supplements," *DISPOWER*, 2005.
- [51] "Ireland's Grid Code," 2005.
- [52] "Regole Tecniche di Connessione," GRTN www.grtn.it, 2001.
- [53] "VDN Guidelines on REAs Generating Plants Connected to High and Extra High Voltages," www.vdn-berlin.de, 2004.
- [54] "Wind Energy – The Facts: An Analysis of Wind Energy in the E-25," European Wind Energy Association (EWEA), 2003.
- [55] C. Aubrey, C. Kjaer, C. Millais, and S. Teske, "Wind Force 12: A Blueprint to Achieve 12% of the World Electricity from Wind Power by 2020," *Global Wind Energy Council (GWEC) e Greenpeace*, 2005.
- [56] E. N. Azcunaga, "DG in European Interconnected Grids," *DISPOWER*, 2006.
- [57] E. N. Azcunaga, "DG Status in Spain: National Codes, Standards, Requirements and Rules for Grid-interconnection and Operation," *DISPOWER*, 2005.
- [58] E. N. Azcunaga, "Grid Interconnection of DG in Europe: Current Requirements and recommendations for future activities," *DISPOWER*, 2005.
- [59] A. Badelin, "Wind Generation on the German Interconnected Grid," *DISPOWER*, 2005.

- [60] R. Belhomme, "Study on High Penetration of Wind Energy in the French Interconnected System," *DISPOWER*, 2005.
- [61] R. Bründlinger, "DG Status in France: National Codes, Standards, Requirements and Rules for Grid-interconnection and Operation," *DISPOWER*, 2005.
- [62] R. Bründlinger, "DG Status in Germany: National Codes, Standards, Requirements and Rules for Grid-interconnection and Operation," *DISPOWER*, 2005.
- [63] E.ON., "Grid Code High and Extra High Voltages," E.ON Netz, 2003.
- [64] B. Engler, "Distributed Generations with High Penetration of Renewable Sources," *DISPOWER*, 2004.
- [65] I. Erlich and U. Bachmann, "Grid Code Requirements Concerning Connection and Operation of Wind Turbines in Germany," 2005.
- [66] VDN, "Distribution Code 2003," www.vdn-berlin.de.
- [67] VDN, "Transmission Code 2003," www.vdn-berlin.de, 2003.
- [68] C. M. Wagner, "Long Term Perspectives for DG in Europe," *DISPOWER*, 2005.
- [69] "Wind Directions - Focus on Spain," *EWEA*, 2005.
- [70] "Wind Energy in France: Recent Legal Developments and Overview of Specific Tax Aspects," Ernst & Young Societe d'Avocats, 2005.
- [71] ABB, "Wind Farm Integration in British Columbia – Stages 1 & 2: Plannig and Interconnection Criteria," ABB, 2004.
- [72] Decreto, vol. 5.025: Presidência da República, Casa Civil, 2004.
- [73] J. K. Niiranen, "Simulation of Doubly Fed Induction Generator Wind Turbine with an Active Crowbar," *EPE*, 2004.
- [74] M. V. A. Nunes, J. A. P. Lopes, H. H. Zürn, U. H. Bezerra, and R. G. Almeida, "Influence of the Variable-Speed Wind Generators in Transient Stability Margin of the

Conventional Generators Integrated in Electrical Grids," *IEEE Transactions On Energy Conversion*, vol. 19, 2004.

Bibliografias

- [75] Aströn, K. J. et al. *Computer-Controlled Systems – Theor and design*. 3 ed., Prentice-Hall, 1997.
- [76] Barbi, I. *Teoria Fundamental do Motor de Indução*. Brasil: Editora da UFSC, Eletrobrás, 1985.
- [77] Bose, B. K. *Modern Power Electronics and AC Drives*. USA: Prentice-Hall, Inc, 2002.
- [78] Chapman, S. J. *Electric Machinery Fundamentals*. 3. ed. Estados Unidos da América: McGraw-Hill, 1999.
- [79] Chi – Tsong Chen, *Introduction To Linear System Theory*;
- [80] Leonhard, W. *Control of Electrical Drives*. Alemanha: Springer-Verlag, 1985.
- [81] Ogata, K. *Discrete-Time Control Systems*. 2. ed Estados Unidos da América: Prentice-Hall, 1995.
- [82] Texas Instruments Inc. *IQmath Library - A Virtual Floating Point Engine*. Module user's Guide C28x Foundation Software, June 2002.
- [83] Texas Instruments Inc. *Sensorless V/Hz closed loop controller using reactive power MRAS speed estimator System Document*. Digital Control Systems (DCS) Group April 30, 2003
- [84] Texas Instruments Inc. *TMS320F2810, TMS320F2811, TMS320F2812 TMS320C2810, TMS320C2811, TMS320C2812 - Digital Signal Processors Data Manual*. Literatura nº: SPRS174L, April 2001 – Revisão de 2004.

Anexo 1

Definição das Bases

$$P_{\text{base}}=5000 \text{ (W)}$$

$$V_{\text{base}}=450 \text{ (V)}$$

$$I_{\text{base}}=P_{\text{base}}/V_{\text{base}} \text{ (A)}$$

$$Z_{\text{base}}= V_{\text{base}}/I_{\text{base}} \text{ (oms)}$$

$$T_e = 15 \text{ (Nm)}$$

$$\omega_{\text{rbase}} = 1800 \text{ (RPM)}$$

As Tabela A10.1 e

Tabela A10.2 apresentam os parâmetros das máquinas utilizadas na plataforma experimental desenvolvida.

Tabela A10.1 – Parâmetros da MATRADA

Potência: 5 kVA	Indutância própria do estator (L_{ls}): 5,5 mH
Tensão do Estator (V_n): 311 V	Indutância própria do rotor (L'_r): 5,5 mH
Tensão do Rotor: 220 V	Indutância mútua (M): 100 mH
Corrente estatórica (i_n): 25 A	Número de pólos: 4
Corrente rotórica (i_r): 15 A	Velocidade síncrona: 1750 rpm
Resistência estatórica (R_s): 0,8 Ω	Relação de transformação entre estator e rotor: 1.7
Resistência rotórica (R'_r): 0,5 Ω	Conexão do rotor e do estator: estrela

Na tabela abaixo, pode-se verificar os parâmetros do MI

Tabela A10.2 – Parâmetros do MI

Potência: 12 kVA	Indutância própria do estator (L_{ls}): 6 mH
Tensão do Estator (V_n): 311V	Indutância própria do rotor (L'_{lr}): 6 mH
Tensão do Rotor: -----	Indutância mútua (M): 60,1 mH
Corrente estatórica (i_n): 32A	Número de pólos: 4
Corrente rotórica (i_n): ----	Velocidade síncrona: 1750 rpm
Resistência estatórica (R_s): 0,4 Ω	Relação de transformação entre estator e rotor: -
Resistência rotórica (R'_r): 0,2 Ω	Conexão do estator: delta

2006

Mestre

da Costa, Jean Patric

PPGEE/UFSM, RS