

As Figura 5-9 e Figura 5-10 mostram uma simulação para banda passante dos PI's igual a 500 rad/s e a banda passante do estimador igual a 250 e 300 rad/s. Embora a Figura 5-2 não apresente regiões de instabilidade, devido à linearização, regiões muito próximas ao eixo imaginário, podem apresentar um comportamento instável, e por isso devem ser evitadas.

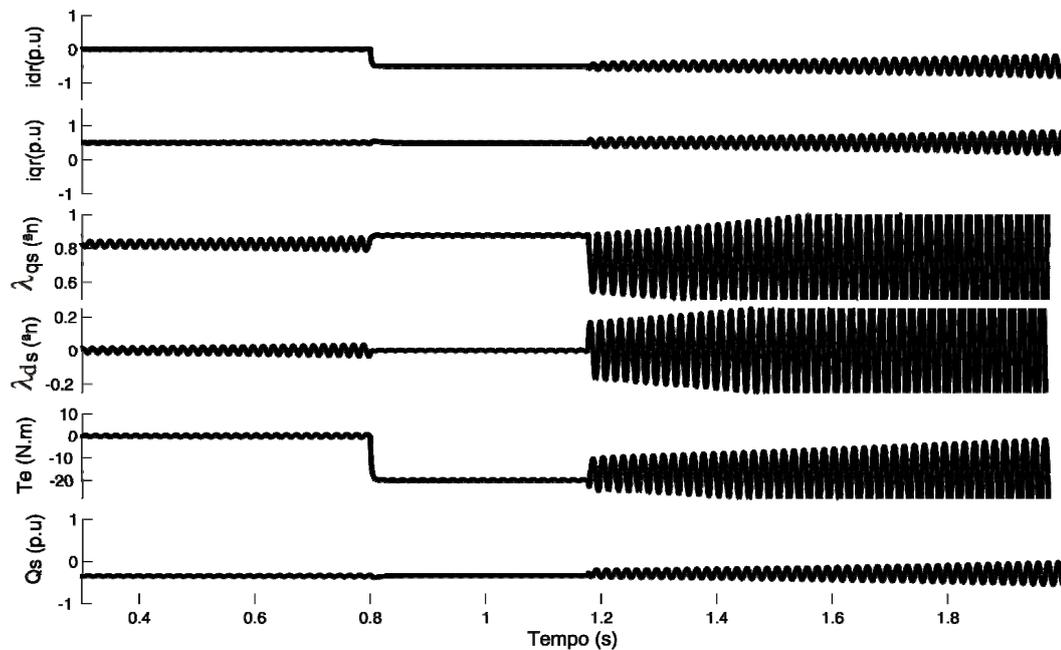


Figura 5-9 – Comportamento transitório das correntes rotóricas, fluxos estáticos, torque eletromagnético e potência reativa no estator da MATRADA. Banda passante dos controladores de eixo q e d igual a 500 rad/s e banda do estimador $a = 250$ rad/s

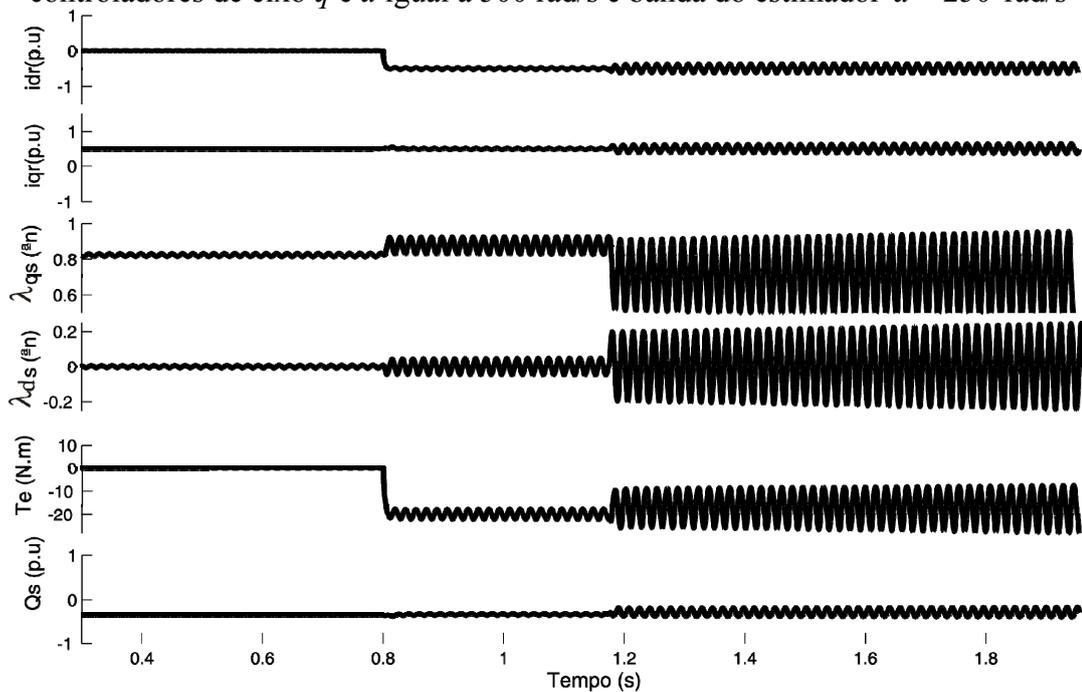


Figura 5-10 – Comportamento transitório das correntes rotóricas, fluxos estáticos, torque eletromagnético e potência reativa no estator da MATRADA. Banda passante dos controladores de eixo q e d igual a 500 rad/s e banda do estimador $a = 300$ rad/s

5.3 *Sumário*

Esse Capítulo apresentou uma análise da estabilidade e o comportamento transitório do sistema de geração com a MATRADA, incluindo o estimador da posição do fluxo estatórico. Pode ser visto através da Figura 5-9 e da Figura 5-10 que o desempenho e a estabilidade do sistema dependem tanto do projeto dos controladores como do projeto do estimador. Conforme mostrado na Figura 5-2, nem toda o conjunto solução do estimador pode ser escolhido quando se opera em malha fechada. Embora o erro de estimação seja normalizado pelas tensões da rede elétrica, durante quedas de tensões no PC o algoritmo de estimação tem seu desempenho prejudicado. Ensaios experimentais comprovam a convergência do algoritmo com tensões na rede elétrica próximas a 5 V (2% da tensão nominal). Por isso, um projeto adequado é importante para manter o trancamento de fase durante distúrbios provindos da rede elétrica e não comprometer a estabilidade do sistema.

Portnto, é importante considerar a inclusão do estimador da posição do fluxo no modelo do sistema, para verificar se o projeto do estimador não altera o desempenho dos controladores vetoriais.

CAPÍTULO 6

PARTIDA, SINCRONIZAÇÃO E MODOS DE OPERAÇÃO

Nesse capítulo, será apresentado um procedimento de partida, uma metodologia de sincronização e a análise dos diferentes modos de operação do sistema de geração eólico com a MATRADA conectada com a rede elétrica. Os procedimentos de partida e sincronização do gerador com a rede elétrica é indispensável para a conexão e a operação num sistema interligado. O sistema de geração eólico da Figura 6-1 apresenta três modos de operação: (i) Sub-síncrono, (ii) Síncrono e (iii) Sobre-síncrono.

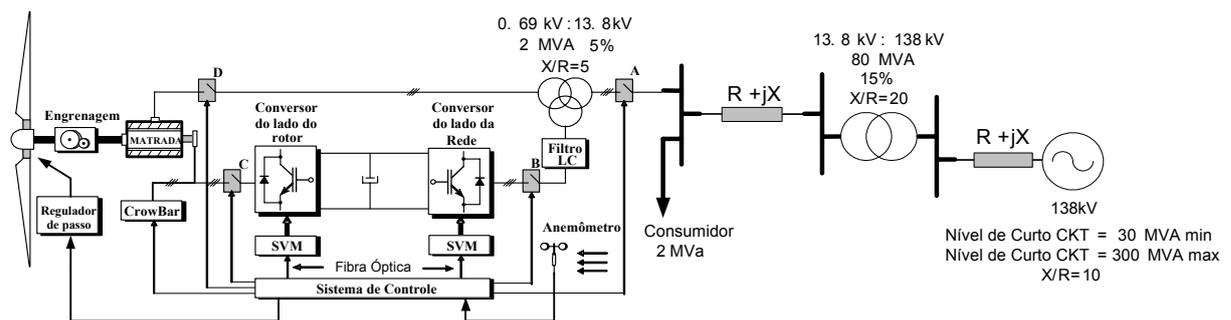


Figura 6-1 – Diagrama de blocos da MATRADA e do sistema de controle.

O processo de Partida é apresentado na próxima seção.

6.1 Partida do Sistema de Geração com a MATRADA

O modo de partida do sistema mostrado na Figura 6-1 inicia com o fechamento das seccionadoras A e B e com o conversor do lado da rede operando como retificador não controlado, conforme pode ser visto na Figura 6-2.

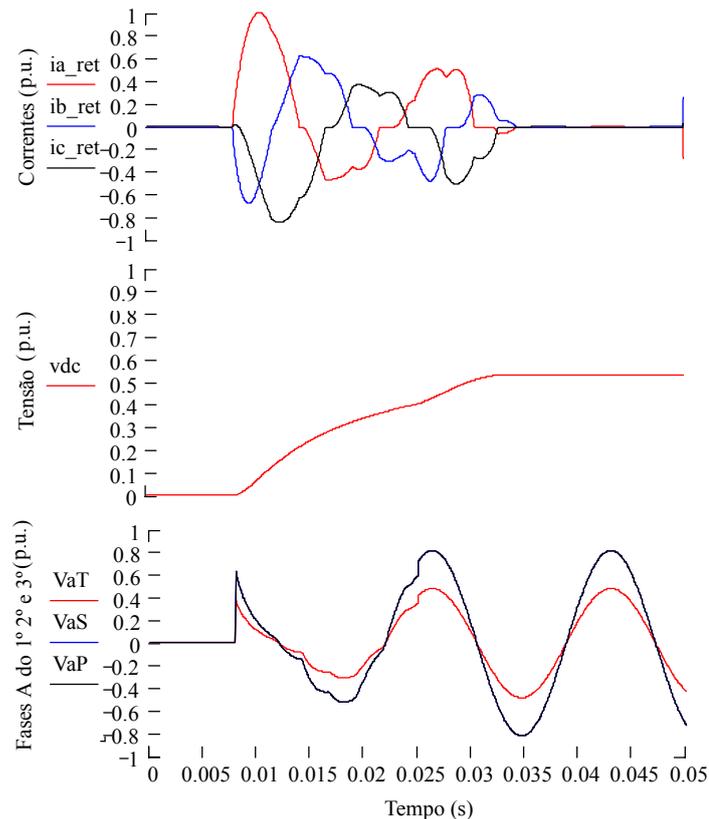


Figura 6-2 – Fechamento das seccionadoras A e B e operação como retificador não controlado.

Na Figura 6-2, pode ser visto o início da pré-carga do barramento CC. Depois que os resistores do circuito de pré-carga são curto-circuitados, o sistema passa a operar como retificador não controlado conectado a rede elétrica. Também pode ser visto na Figura 6-2 as correntes no filtro de entrada do conversor do lado da rede representadas por “ia_ret”, “ib_ret” e “ic_ret”; e a tensão da fase A no primário, fase A do secundário e fase A do terciário do transformador, representados nas figuras respectivamente por “VaT”, “VaS” e “VaP”.

Depois da pré-carga do barramento CC, os controladores do conversor do lado da rede são ligados e a tensão do barramento atinge o nível de tensão estabelecido pelo projetista, como pode ser visto na Figura 6-3.

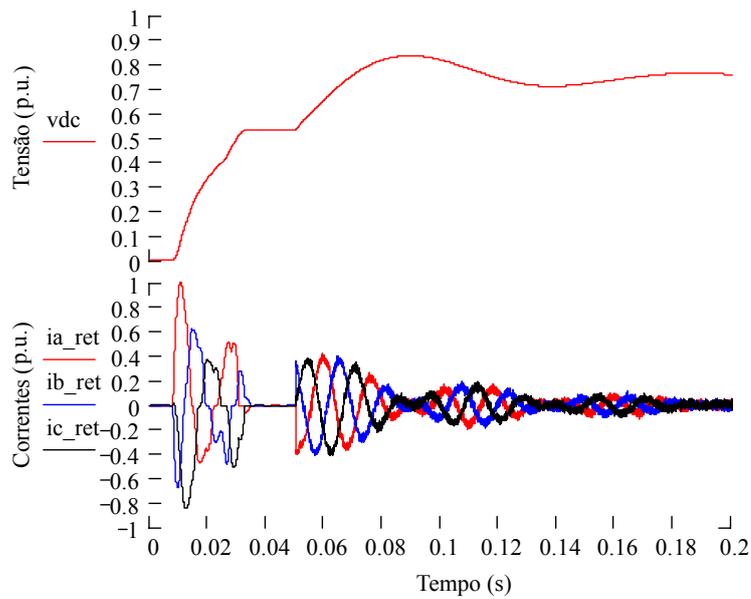


Figura 6-3 – Passagem do modo não controlado para o controlado.

Na Figura 6-3, pode ser visto a passagem do modo não controlado para o modo controlado. As correntes do filtro de entrada do conversor do lado da rede e a tensão do barramento CC estão representadas na Figura 6-3.

Depois que o nível de tensão do barramento CC atinge o valor determinado, a seccionadora C é ligada junto com os controladores de corrente rotórica da MATRADA. Nesse momento, o conversor do lado do rotor começa a aplicar a corrente de excitação da MATRADA Figura 6-4.

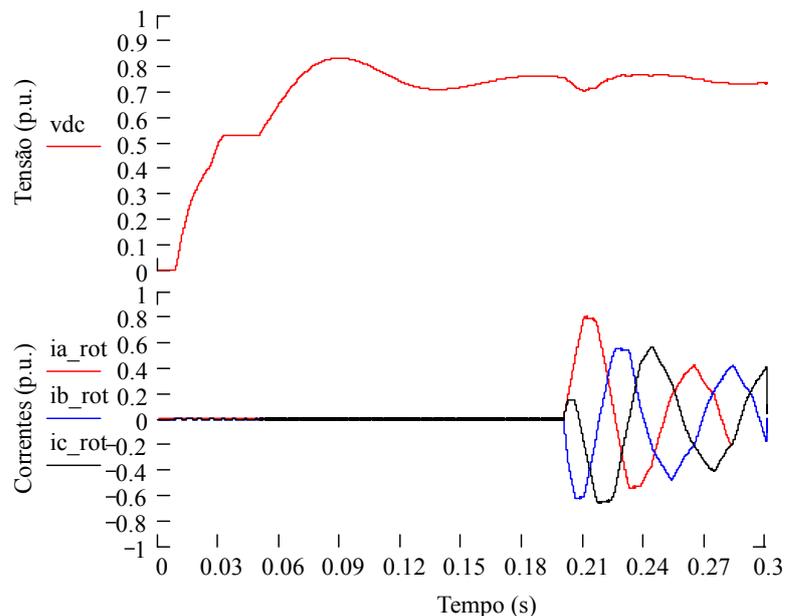


Figura 6-4 – Fechamento da seccionadora C e malhas de corrente rotóricas.

Com o barramento CC carregado e controlado, as malhas das correntes rotóricas são habilitadas e a tensão aplicada no rotor é induzida no estator do gerador. Quando a tensão induzida no estator estiver em fase com a mesma frequência e com a mesma amplitude das tensões da rede elétrica a seccionadora D é fechada e o sistema de geração eólica é conectado a rede elétrica finalizando o modo de Partida (Figura 6-5).

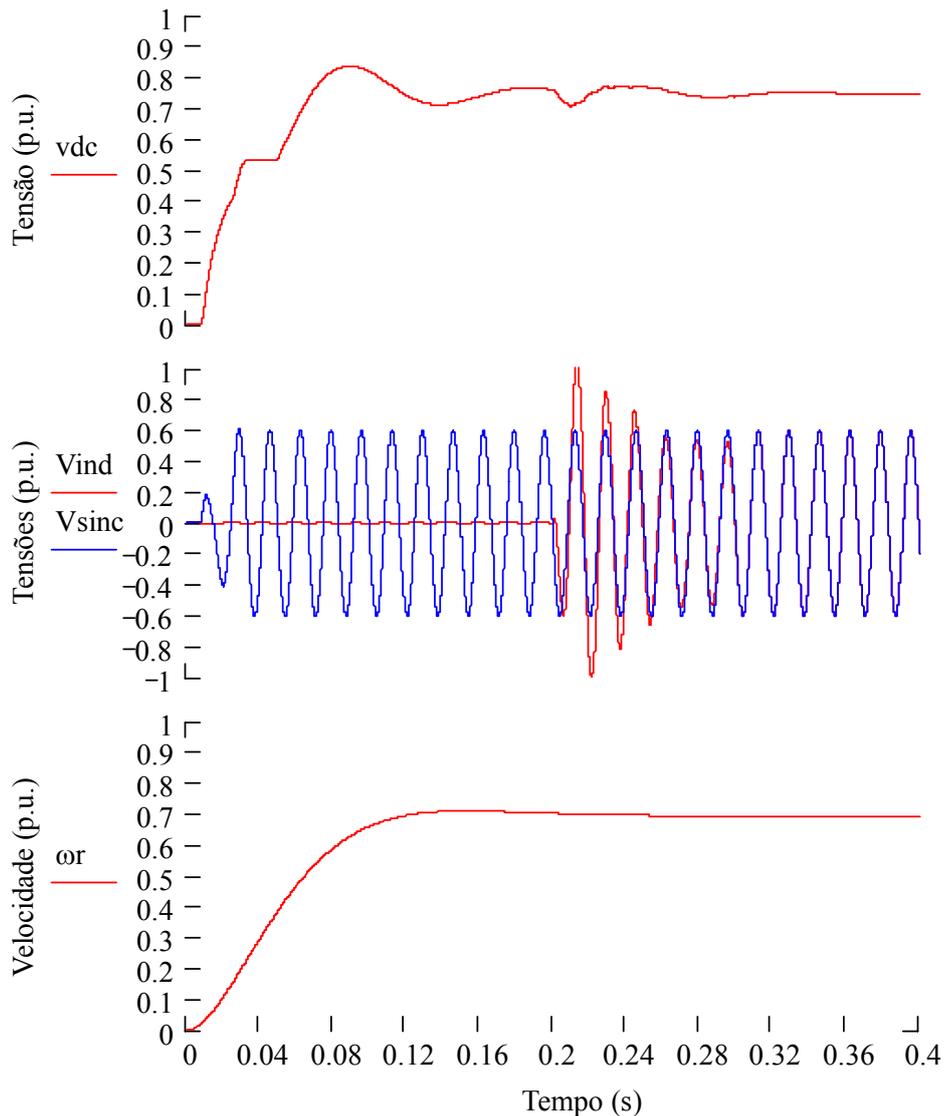


Figura 6-5 – Sincronização e Fechamento da seccionadora D.

Na Figura 6-5 pode ser visto a tensão induzida no estator e a tensão do secundário do transformador representadas respectivamente por “Vind” e “Vsinc”. Também pode ser vista a variação da velocidade do rotor de zero até 30% abaixo da velocidade síncrona representada

na figura pela variável “ ω_r ”. Também pode ser visto a tensão do barramento CC. Note que a seccionadora D é fechada no instante 0.3 s e o sistema é conectado a rede elétrica.

Na próxima seção, é apresentada uma metodologia desenvolvida para sincronizar as tensões induzidas no estator independentemente da velocidade do rotor da turbina.

6.2 Sincronização da MATRADA com a Rede Elétrica

Para que a seccionadora D da Figura 6-1 possa ser fechada, as tensões induzidas no estator do gerador devem estar em fase, com a mesma amplitude e mesma frequência das tensões da rede elétrica. Para isso, foi desenvolvida uma metodologia que permite a partida independente da velocidade de rotação do rotor, como pode ser visto na Figura 6-6, mesmo durante a variação de velocidade rotórica o sistema permanece sincronizado.

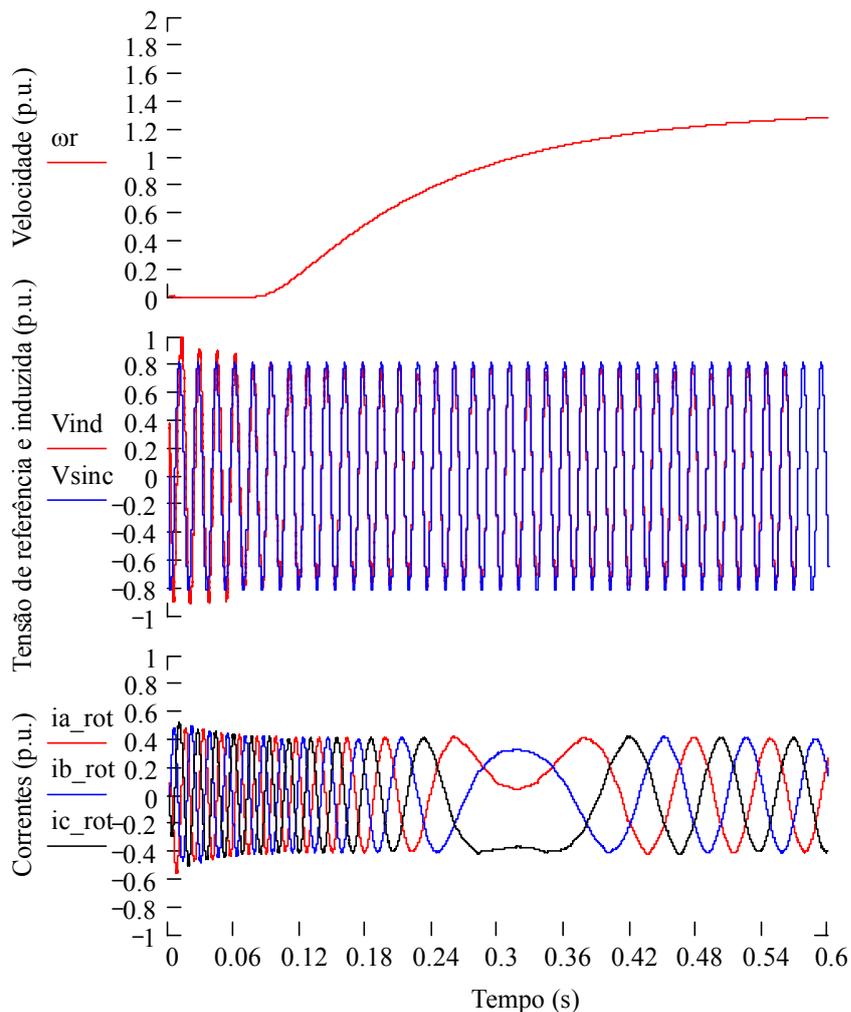


Figura 6-6 – Sincronização independente da velocidade da turbina.

Pode-se afirmar que enquanto a seccionadora D está aberta, as correntes $i_{qs} = i_{ds} = 0$.

Considerando os fluxos constantes $\frac{d\lambda_{qs}}{dt} = \frac{d\lambda_{ds}}{dt} = 0$ as equações (3.1), (3.2), (3.7) e (3.8)

podem ser expressas por:

$$v_{qs} = \omega \lambda_{ds} \quad (6.1)$$

$$v_{ds} = -\omega \lambda_{qs} \quad (6.2)$$

$$\lambda_{qs} = M i_{qr} \quad (6.3)$$

$$\lambda_{ds} = M i_{dr} \quad (6.4)$$

Substituindo (6.3) e (6.4) em (6.2) e (6.1) respectivamente, as tensões induzidas no estator do gerador podem ser representadas por:

$$v_{qs} = \omega M i_{dr} \quad (6.5)$$

$$v_{ds} = -\omega M i_{qr} \quad (6.6)$$

A partir de (6.5) e (6.6) pode-se concluir que:

- i As tensões induzidas no estator da MATRADA são diretamente proporcionais as correntes rotóricas conforme pode ser visto na Figura 6-7. Pode-se observar na Figura 6-7 que um degrau na corrente i_{qr} muda somente a amplitude das tensões induzidas. A fase e frequência permanecem constantes.
- ii As tensões podem ser induzidas de forma linearmente independente através das correntes i_{dr} e i_{qr} .
- iii As tensões induzidas não dependem da velocidade do rotor da turbina.

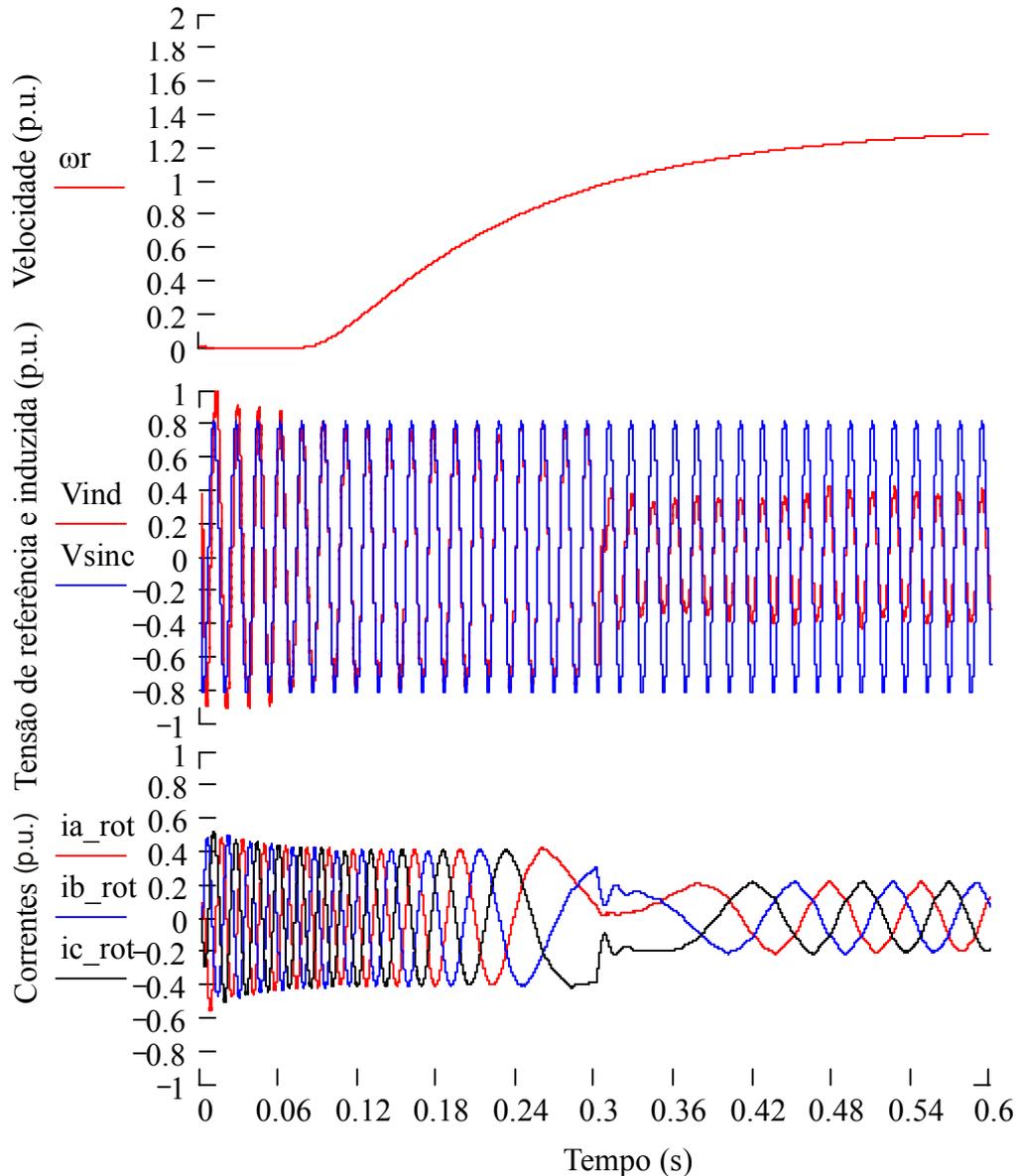


Figura 6-7 – Tensão induzida no estator, para uma redução de 50% na amplitude da corrente i_{qr} no referencial genérico.

Vale ressaltar que as equações (6.5) e (6.6) estão representadas em coordenadas síncronas orientadas em um referencial genérico. Outra observação importante é a necessidade do ajuste da posição inicial $\theta_r(0)$ da equação (3.32). Teoricamente todos os valores de $\theta_r(0) = 2n\pi$ com n par; podem ser utilizados para gerar as tensões induzidas ideais para a conexão com a rede elétrica. Nesse trabalho foi definido $\theta_r(0) = 0$.

Para demonstrar a versatilidade da metodologia desenvolvida, observe as Figura 6-8 à Figura 6.10.

As tensões da rede em coordenadas abc e síncronas podem ser vistas na Figura 6-10. Essas tensões são referências para gerar as tensões induzidas no estator da MATRADA.

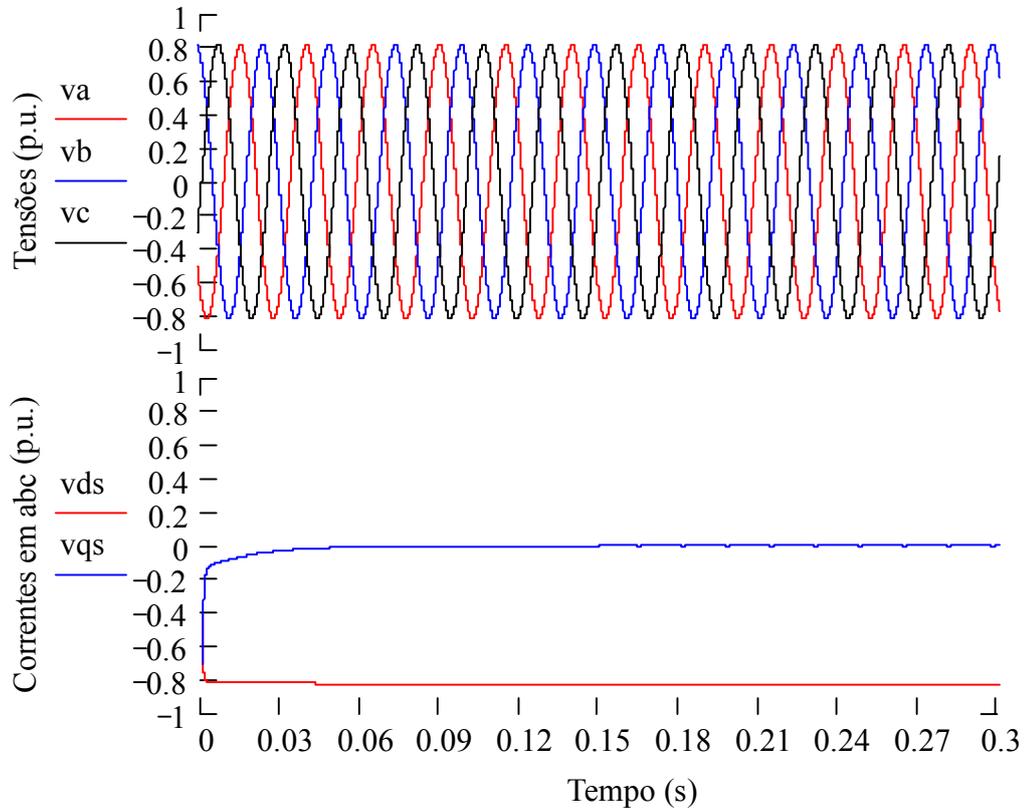


Figura 6-8 – Tensão na rede elétrica em abc e qd .

Pode-se notar a partir da Figura 6-8 que será necessário induzir uma tensão v_d negativa e uma tensão v_q nula para sincronizar o gerador com a rede elétrica. Para isso a corrente i_{qr} tem que ser positiva e i_{dr} igual a zero conforme deduzido em (6.5) e (6.6).

Para identificação da fase e frequência da tensão induzida foi utilizado o estimador não linear apresentado no Capítulo 4. A fase em graus e a frequência angular em rad/s da tensão da rede elétrica pode ser vista na Figura 6-9.

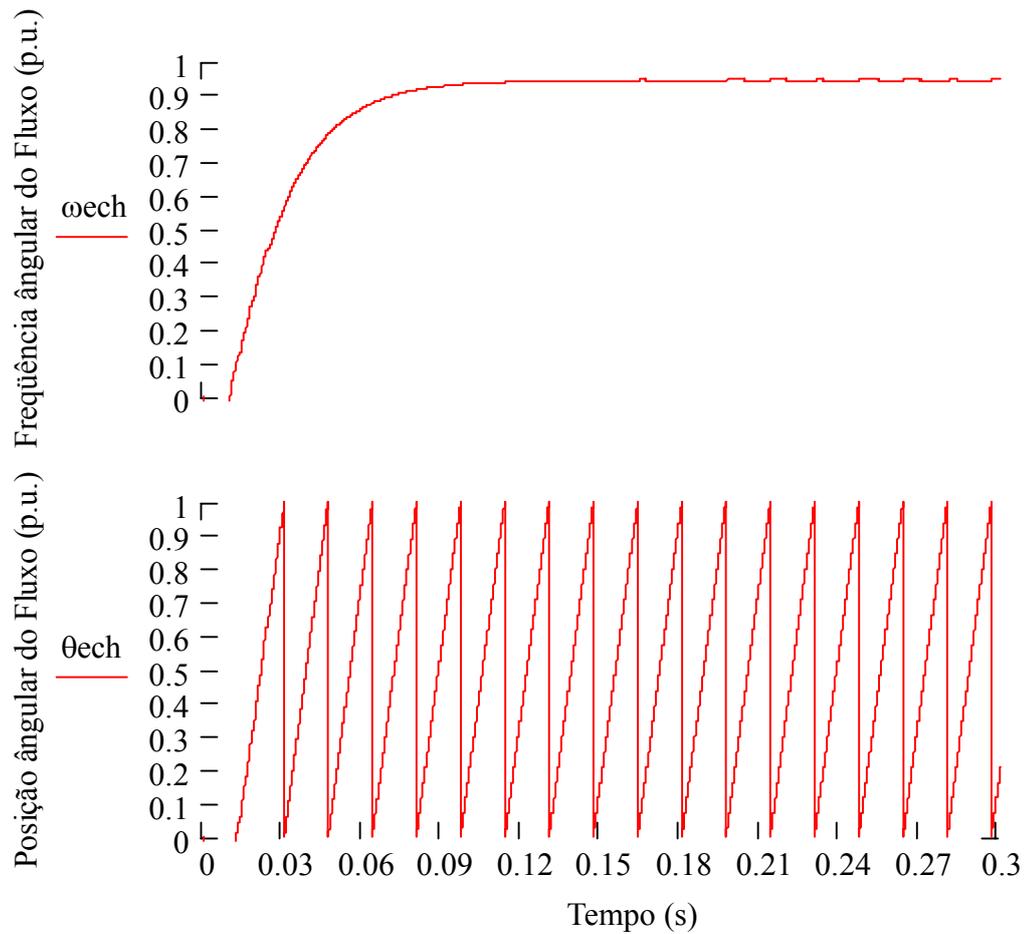


Figura 6-9 – Estimação da fase e da frequência angular.

Na Figura 6-10 pode ser vista a amplitude da corrente i_{qr} é controlada para manter as tensões induzidas no estator igual à amplitude da rede elétrica, e $i_{dr} = 0$ conforme (6.5) e (6.6).

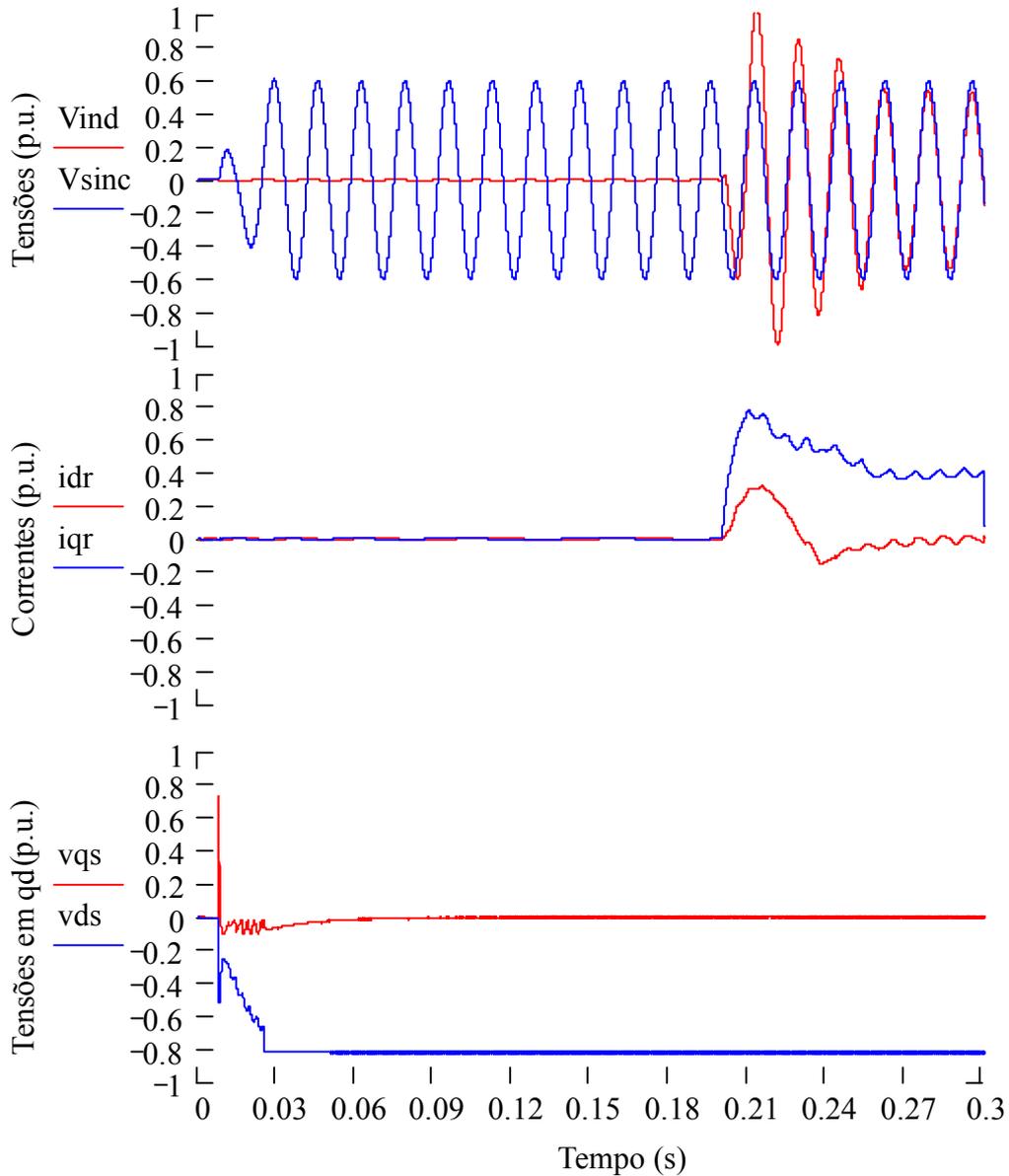


Figura 6-10 – Tensão induzida no estator, correntes i_{dr} e i_{qr} no referencial genérico.

Na Figura 6-11, pode ser visto a operação completa do sistema de geração com a MATRADA conectada a rede elétrica. Pode ser visto a tensão induzida e a tensão de referência na fase A, as correntes rotóricas da MATRADA em coordenadas síncronas e em abc e os fluxos estatóricos durante a operação conectada com a rede elétrica.

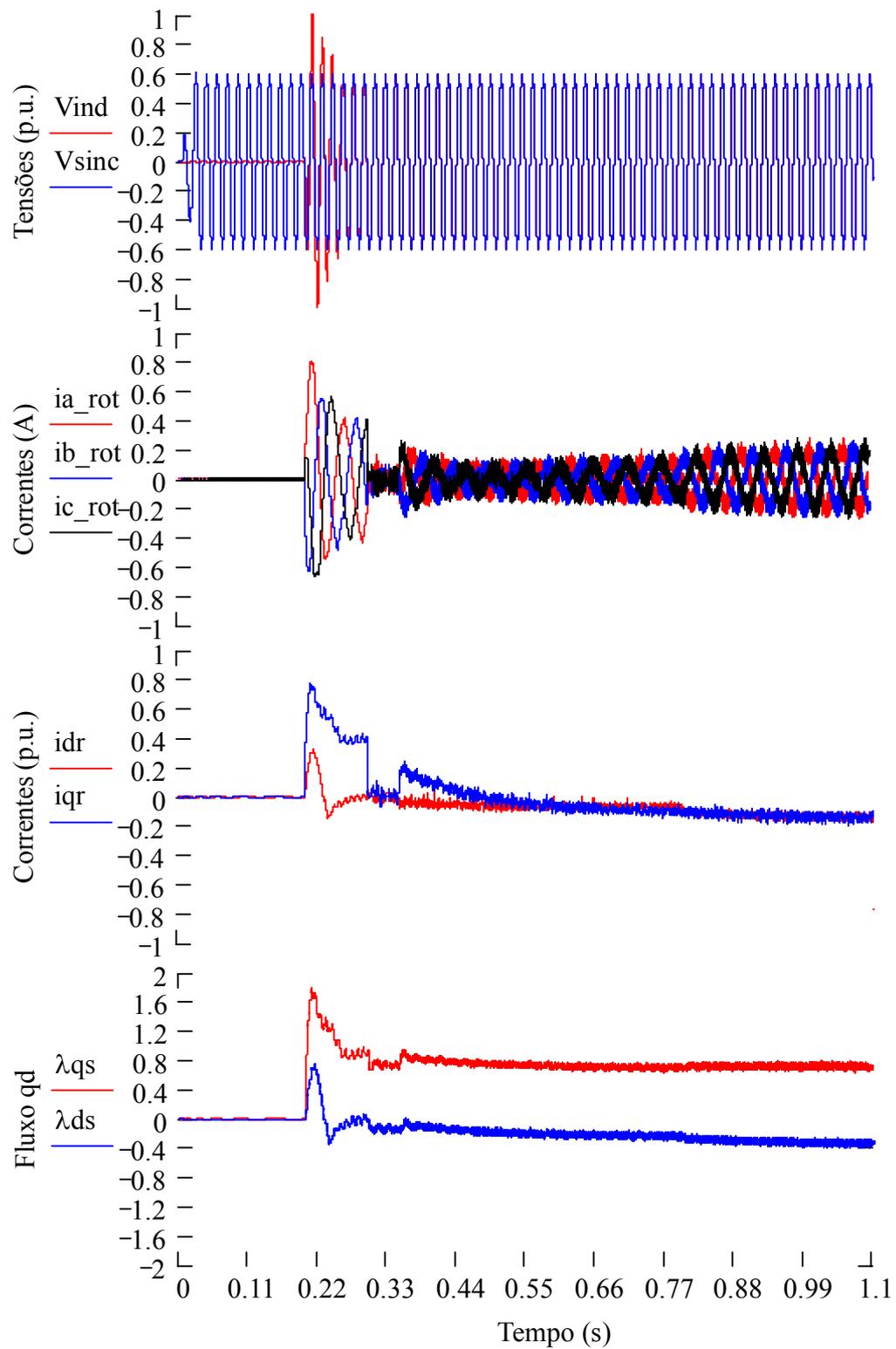


Figura 6-11 – Operação do sistema de geração com a MATRADA.

Note na Figura 6-11 que o transitório das correntes rotóricas durante a partida é grande, atingindo aproximadamente 0,8 p.u. Esse transitório pode ser evitado com uma referencia de partida em rampa.

Na Figura 6-12, pode ser visto as correntes estatóricas em coordenadas síncronas, o torque eletromagnético, a potência rotórica e as potências ativas e reativas do estator.

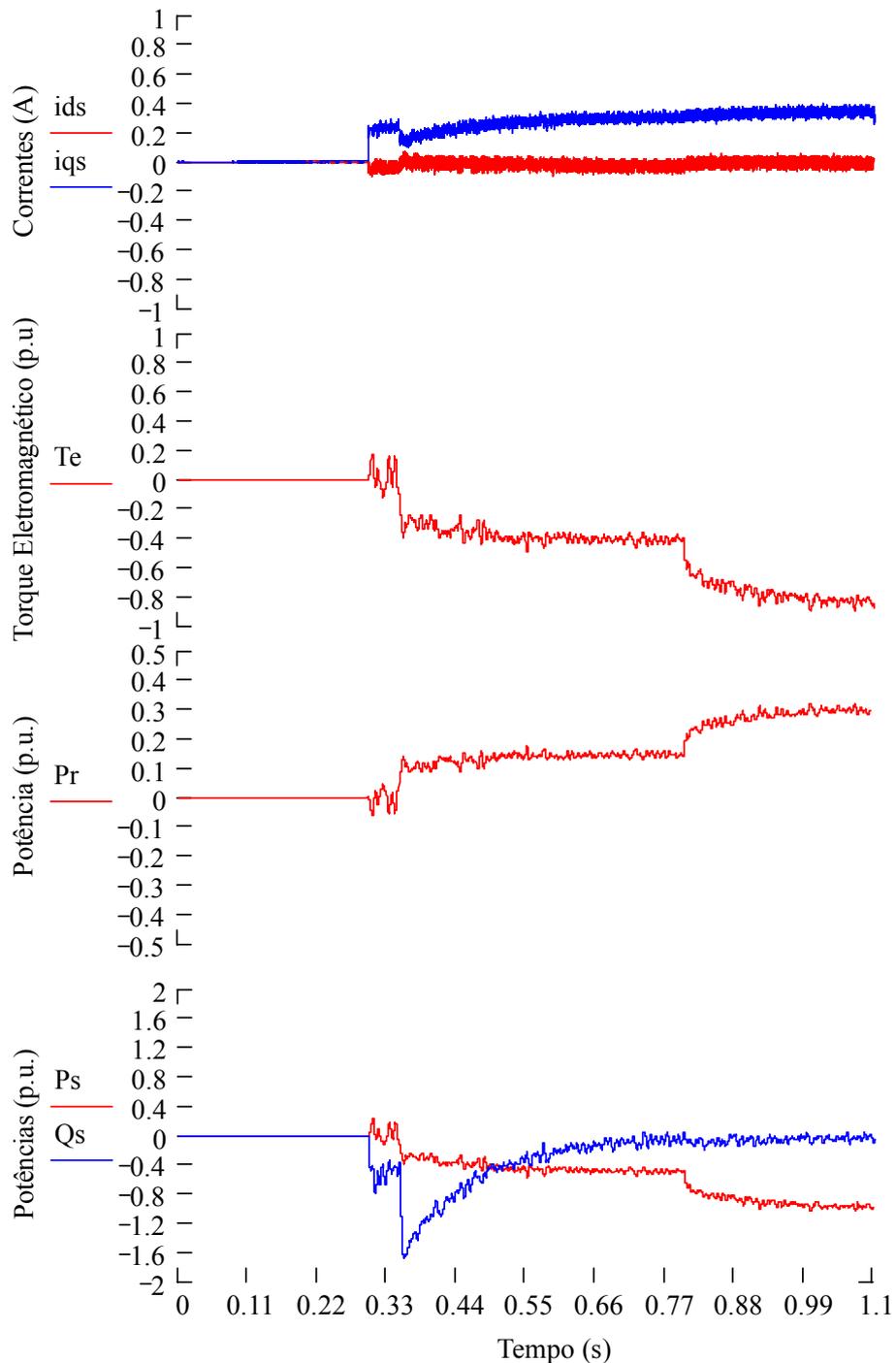


Figura 6-12 – Operação do sistema de geração com a MATRADA.

Os três modos de operação do sistema MATRADA são apresentados na próxima subseção.

6.3 Modos de Operação

Após o sistema de geração eólica ser conectado a rede elétrica, começa a gerar energia a partir de um dos três modos de operação: (i) Sub-síncrono, (ii) Síncrono e (iii) Sobre-síncrono.

6.3.1 Modo de Operação Sub-síncrono

No modo de operação sub-síncrono ou modo de motorização, a velocidade do rotor é menor que a velocidade síncrona da MATRADA. Nesse modo de operação, o conversor do lado da rede, opera como retificador controlado e o conversor do lado do rotor opera como um inversor. O fluxo de potência no rotor é maior que zero ($P_r > 0$), ou seja, o rotor consome energia da rede. Por outro lado, o fluxo de potência no estator é menor que zero ($P_s < 0$), ou seja, o estator entrega energia para rede. Portanto, no modo de operação sub-síncrono, a potência total gerada (P_g), entregue para a rede, será a potência fornecida pelo estator menos a potencia consumida pelo rotor, conforme mostra a Figura 6-13.

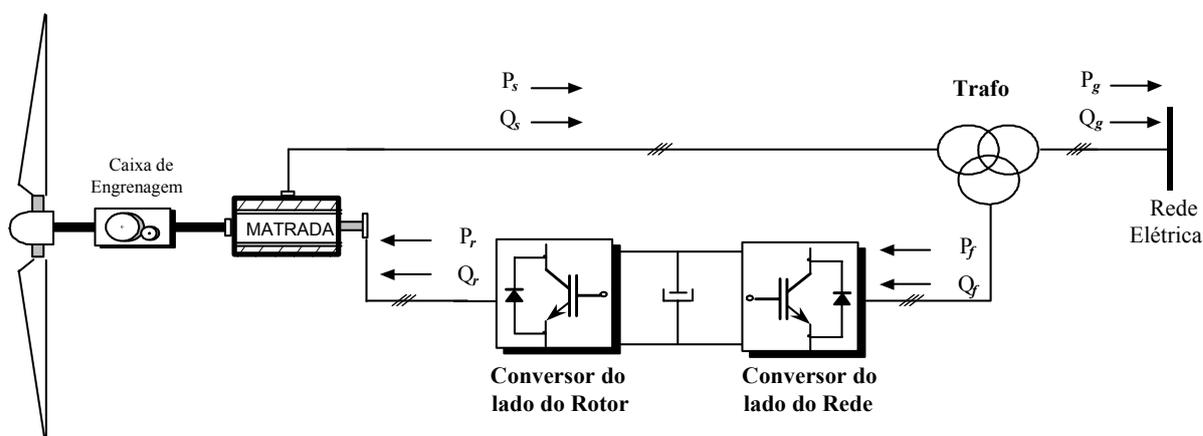


Figura 6-13 – Fluxos de potência ativa e reativa no modo de operação sub-síncrono.

A referência de potência adotada segue a definição das correntes no capítulo 4. Foi definido que corrente positiva entra na MATRADA. Note que pelas equações (3.41) à (3.44), para uma corrente i_{dr} negativa, o torque eletromagnético é negativo e conseqüentemente a potência ativa no rotor é maior que zero. Também resulta que a potência ativa no estator sai da máquina, ou seja, é negativa.

A Figura 6-14 ilustra a operação do sistema da Figura 6-13 no modo sub-síncrono, onde pode ser verificado que a potência no estator “Ps” é negativa e a potência no rotor “Pr” é positiva. Além disso, pode-se verificar que para 1 p.u. da potência no estator, tem-se no máximo 0,3 p.u. da potência no rotor para um escorregamento 30% abaixo da síncrona. A potência entregue para rede está representada por “Pg”.

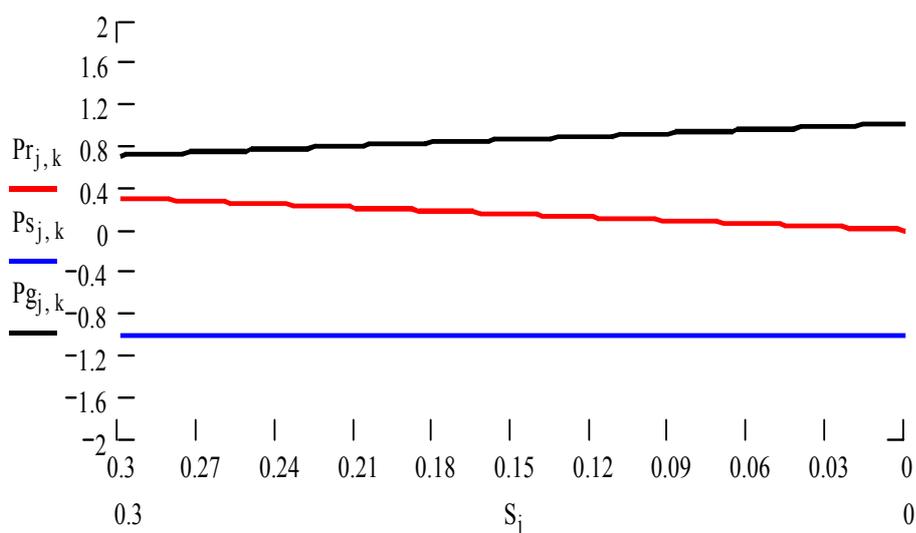


Figura 6-14 – Operação sub-síncrona. Onde S_j representa o escorregamento

A Figura 6-15 ilustra a operação do sistema durante a velocidade sub-síncrona. Pode ser visto a variação da velocidade da turbina (ω_r) de zero até 30% abaixo da velocidade síncrona. Pode ser visto o torque eletromagnético e as potências rotóricas e estatóricas.

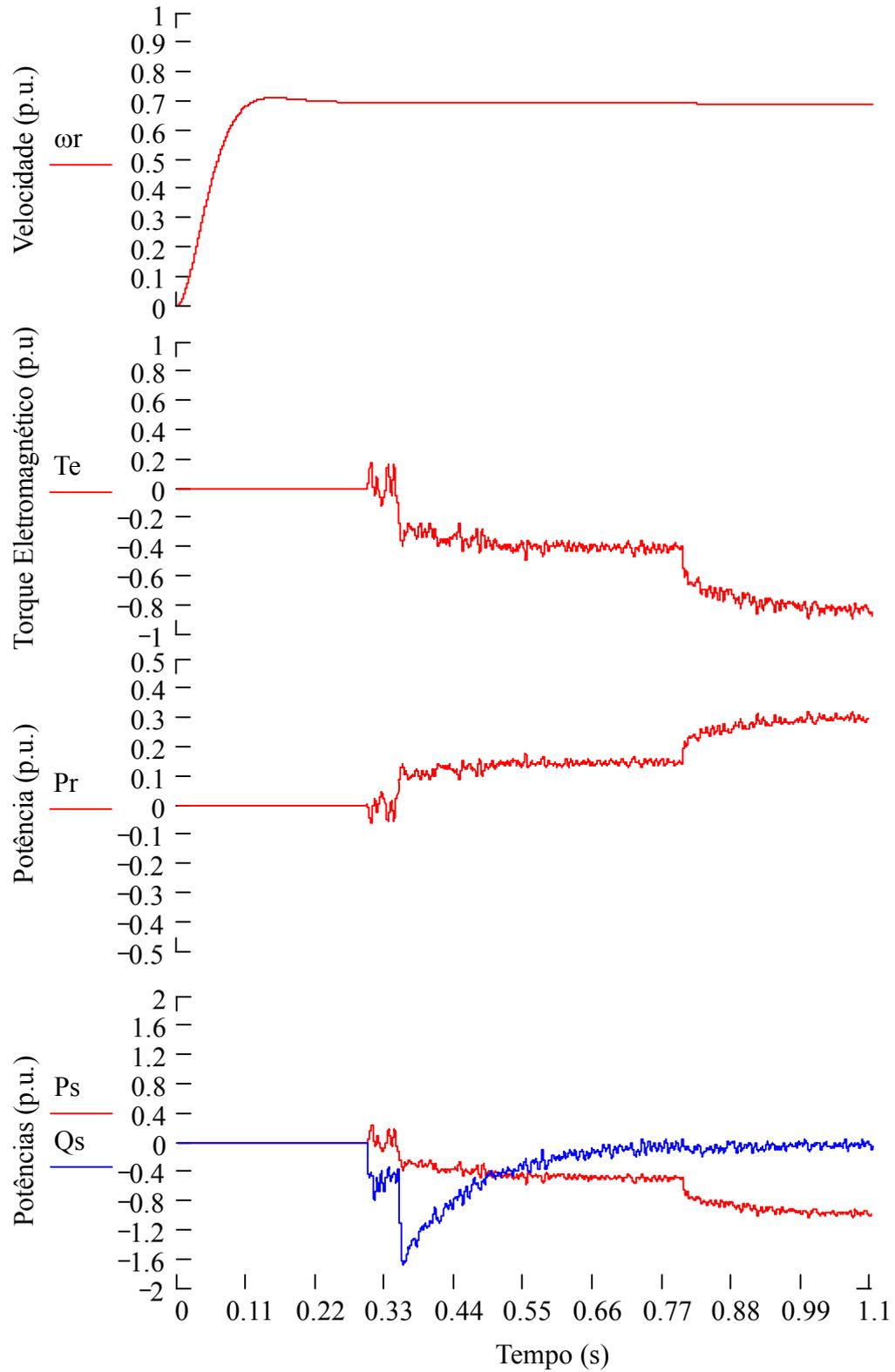


Figura 6-15 – Velocidade da Turbina, Torque Eletromagnético e Potências da MATRADA Durante a operação sub-síncrona..

Na próxima seção é analisado o modo de operação síncrono.

6.3.2 Modo de Operação Síncrono

No modo de operação síncrono, a velocidade do rotor é igual à velocidade síncrona do gerador. Nesse modo de operação, o rotor do gerador opera com tensão CC, e não existe uma troca de fluxo de potência significativa entre o circuito rotórico e a rede elétrica ($P_r \approx 0$).

Nesse caso a potência total entregue á rede será a potência entregue pelo estator $P_s \approx P_g$.

Conforme pode ser visto na Figura 6-16.

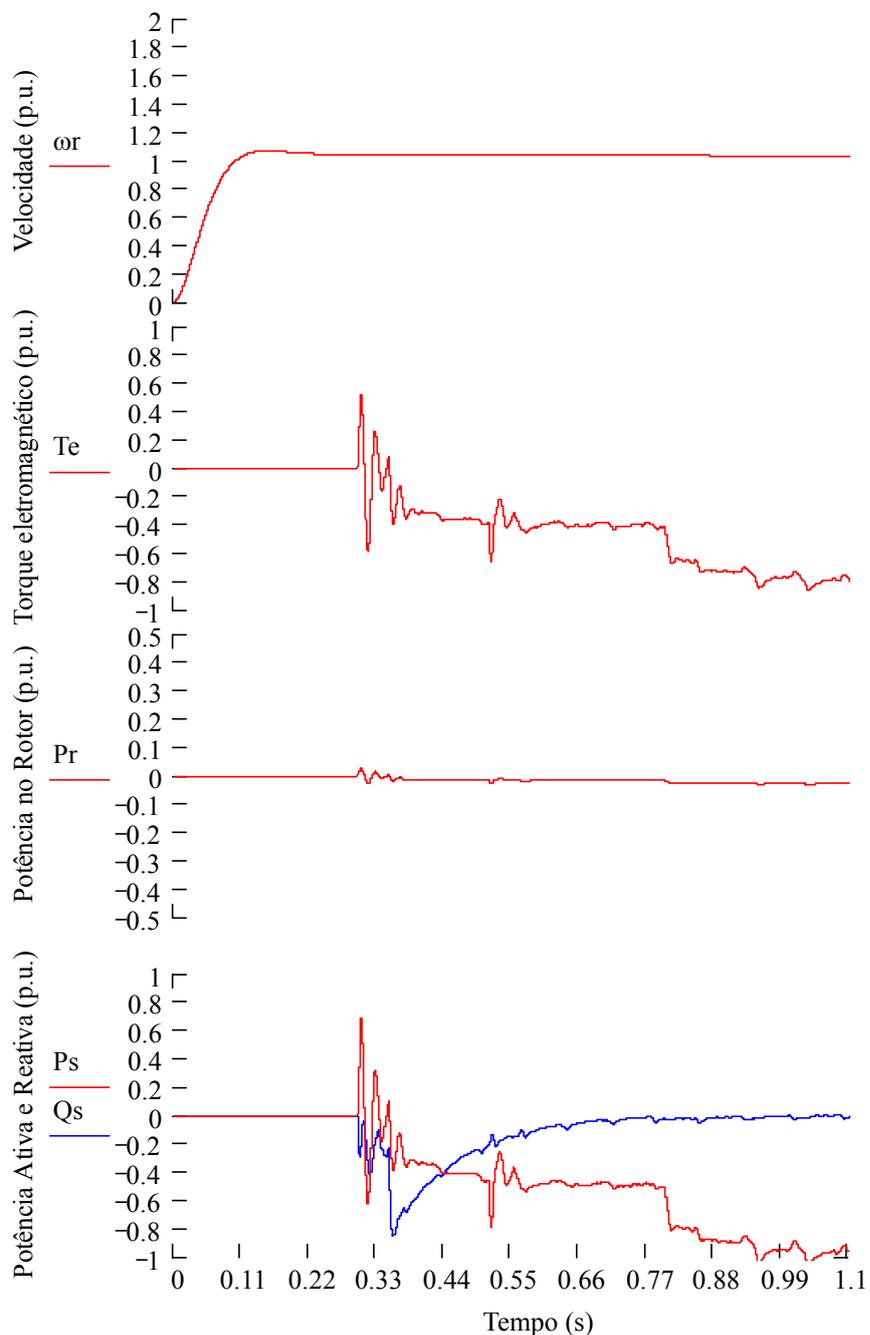


Figura 6-16 – Potências da MATRADA durante a operação síncrona.

Na próxima seção é apresentada uma análise do modo de operação sobre-síncrono

6.3.3 Modo de Operação Sobre-síncrono

No modo de operação sobre-síncrono, também chamado de modo de geração, a velocidade do rotor é maior que a velocidade síncrona, ou seja, o escorregamento é negativo. Nesse modo de operação, o conversor do lado do rotor opera como um retificador controlado e o conversor do lado da rede opera como um inversor, o fluxo de potência no rotor e no estator são menores que zero, isto é, $P_r < 0$ e $P_s < 0$. Nesse caso a potência total entregue á rede será a potência entregue pelo rotor mais a potência entregue pelo estator, conforme mostra a Figura 6-17 e Figura 6-18.

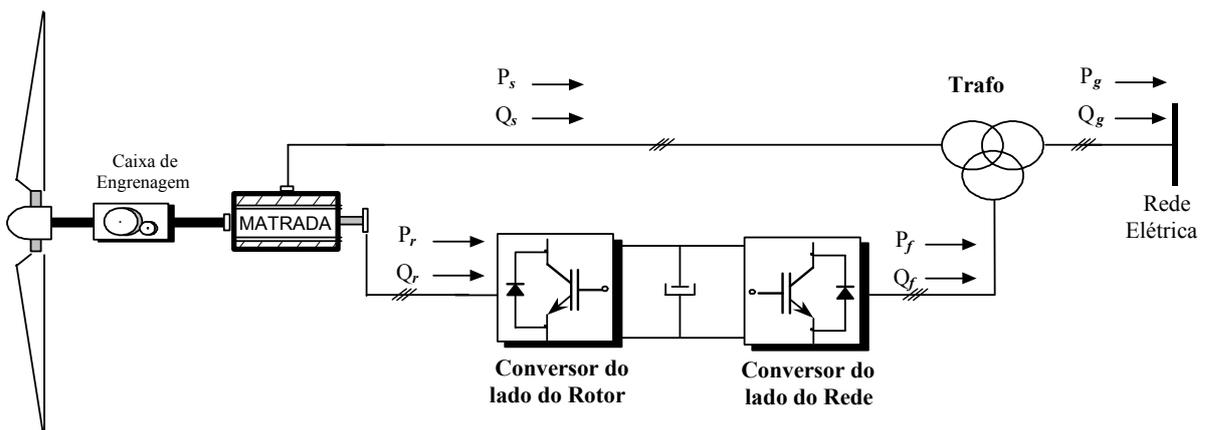


Figura 6-17 - Fluxos de potência ativa e reativa no modo de operação sobre-síncrono.

Na Figura 6-18 pode ser vista a operação sobre-síncrona do sistema de geração com a MATRADA.

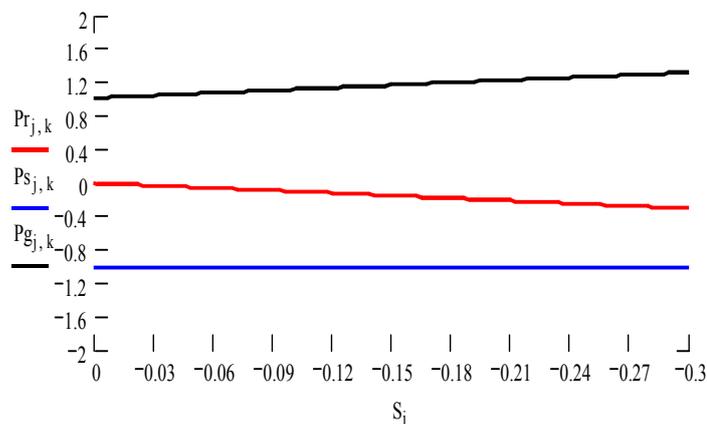


Figura 6-18 - Operação sobre-síncrona.

Na Figura 6-19 pode ser visto a variação da velocidade da turbina (ω_r) de zero até 30% acima da velocidade síncrona do gerador. Além disso, pode ser visto o torque eletromagnético e as potências no estator e no rotor da MATRADA.

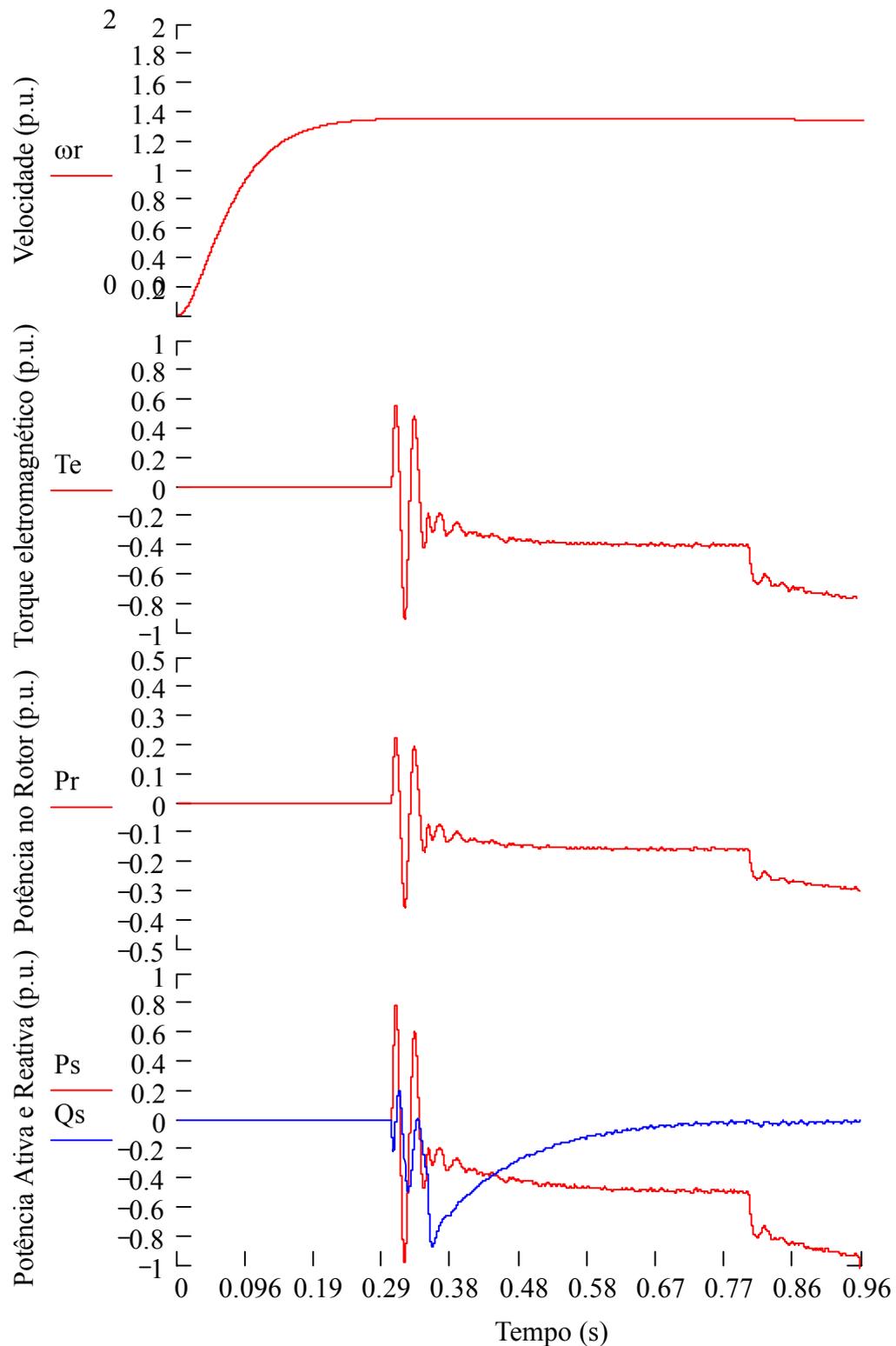


Figura 6-19 – Potências da MATRADA durante a operação Sobre-síncrona.

6.4 Sumário

Esse capítulo apresentou uma metodologia para partida e sincronização das tensões do estator da MATRADA com a rede elétrica que independe da velocidade do rotor da turbina. Apresentou os diferentes modos de operação do sistema de geração com a MATRADA conectada a rede elétrica. Um resumo dos modos de operação pode ser visto nas Figuras abaixo. Na Figura 6-20 pode ser visto a passagem do modo sub-síncrono para o sobre-síncrono.

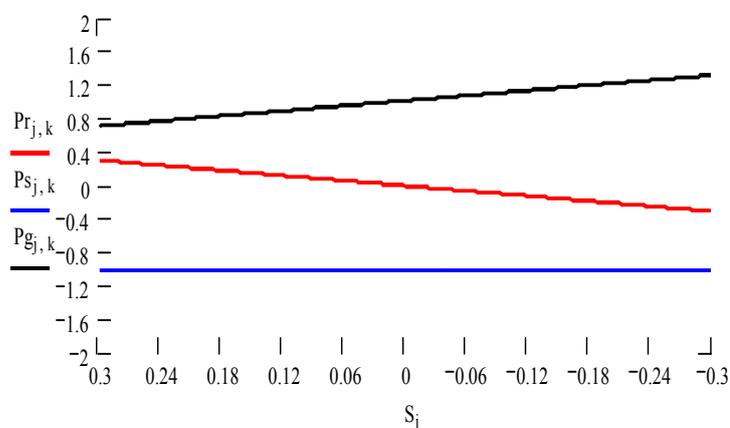


Figura 6-20 – Passagem do modo de operação sub-síncrono para sobre-síncrono.

Pode-se notar que a potência no estator é praticamente constante. A potência no rotor é controlada para manter a potência no estator no valor de referência. Por isso, a soma da potência no rotor e a potência gerada é constante. Na Figura 6-21 pode-se notar a variação da velocidade da turbina de zero até a 30% acima da velocidade síncrona do gerador. Pode-se observar as correntes rotóricas, a tensão induzida, o torque eletromagnético e as potências no rotor e estator da MATRADA. Pode-se notar o comportamento dessas variáveis durante a variação da velocidade da turbina.

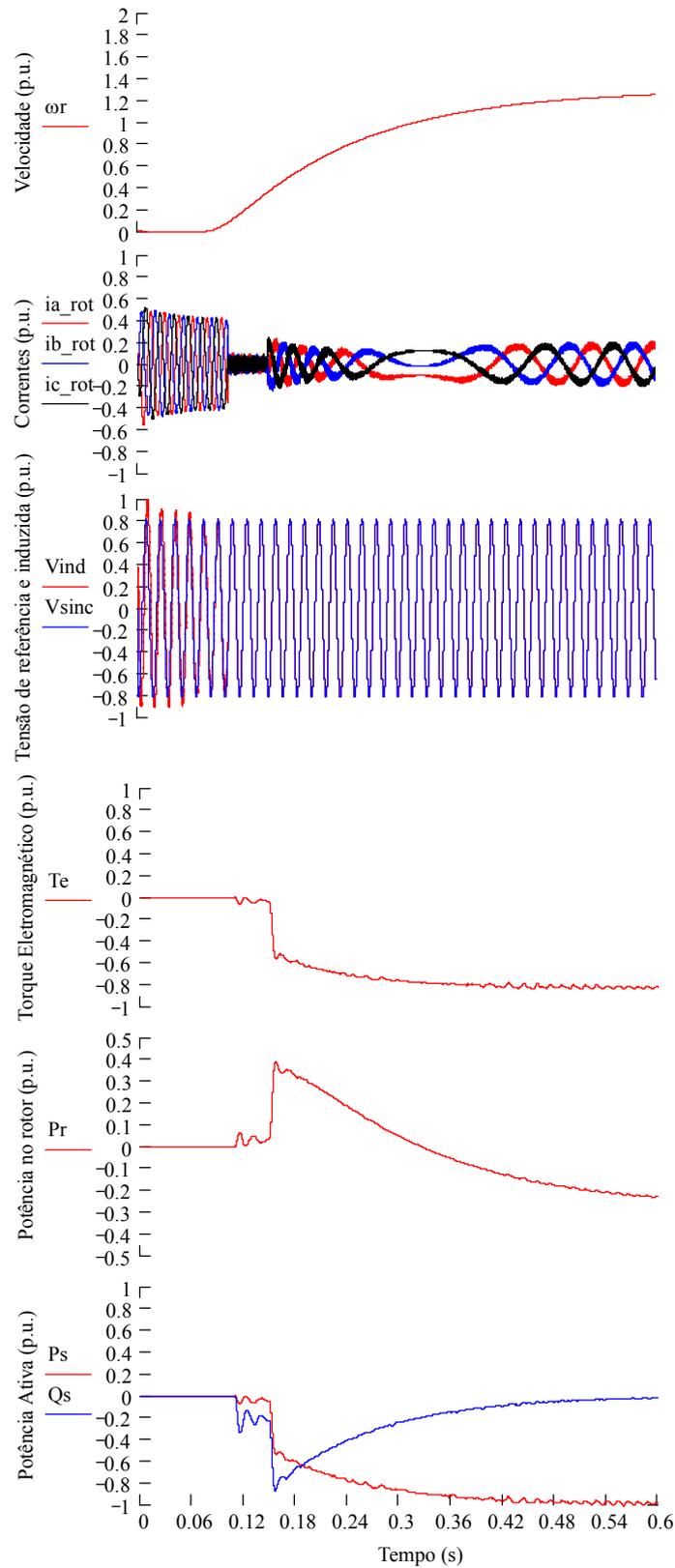


Figura 6-21 – Potências durante a passagem do modo de operação sub-síncrono para sobre-síncrono.

O próximo capítulo apresenta uma análise do conversor em paralelo que auxilia a operação da MATRADA conectada com a rede elétrica.

CAPÍTULO 7

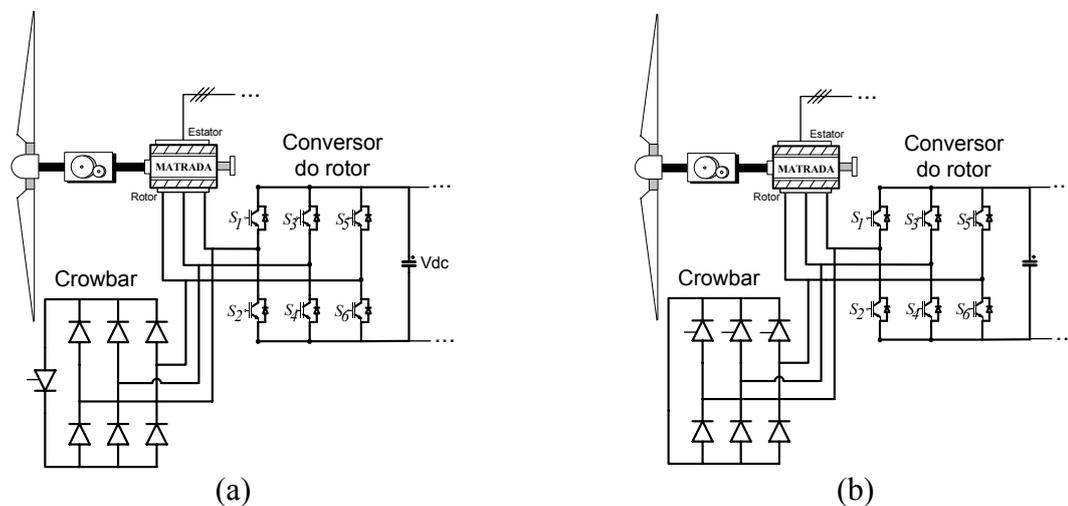
CONVERSOR EM PARALELO

Atualmente, um dos maiores desafios para os fabricantes de aerogeradores, é manter o sistema de geração eólico conectado à rede elétrica durante afundamentos de tensão no PC. Esse é um dos requisitos técnicos contidos no PROREDE e também em vigor em muitos países [1, 7, 26, 27, 49-72]. Essa exigência evita que uma grande quantidade de energia gerada desconecte-se do sistema elétrico em casos de afundamentos momentâneos, minimizando assim, um dos problemas relacionados ao uso intenso de sistemas de geração eólico conectados ao sistema de potência, que implica na perda de uma grande quantidade de potência ativa e por consequência variação da frequência da rede. Para configurações que utilizam a MATRADA, o desafio é proteger os conversores estáticos de potência do circuito rotórico durante curto-circuitos na rede elétrica. Com esse objetivo, é adicionado ao sistema de geração um outro conversor em paralelo com o conversor do lado do rotor, chamado circuito *crowbar*. Nas próximas seções serão apresentados: (i) a seleção do conversor em paralelo, o (ii) princípio de operação do conversor em paralelo e (iii) um procedimento desenvolvido para desligar o circuito *crowbar*. Nessas subseções será apresentada uma relação de circuitos *crowbar* amplamente estudados na literatura [7, 73] uma análise

comparativa das principais diferenças destes circuitos e simulações para ilustrar a importância da metodologia definida para entrada e saída de operação desse circuito.

7.1 Seleção do Conversor Paralelo – Circuito *Crowbar*

Existem diversas topologias e diferentes formas de operação possíveis para implementar um circuito *crowbar* [7, 71]. De maneira geral, o *crowbar* curto-circuita o rotor da MATRADA, que passa a operar durante o transitório como uma máquina de indução gaiola de esquilo ou com resistor no circuito rotórico. A Figura 7-1 mostra uma relação dos principais conversores em paralelo que operam como circuito *crowbar*. É apresentada uma relação das configurações mais antigas [74], onde a turbina eólica era desconectada da rede elétrica quando o *crowbar* era ligado, bem como configurações mais novas que permitem a entrada e saída do *crowbar* sem desconectar o gerador da rede elétrica [7, 11, 73].



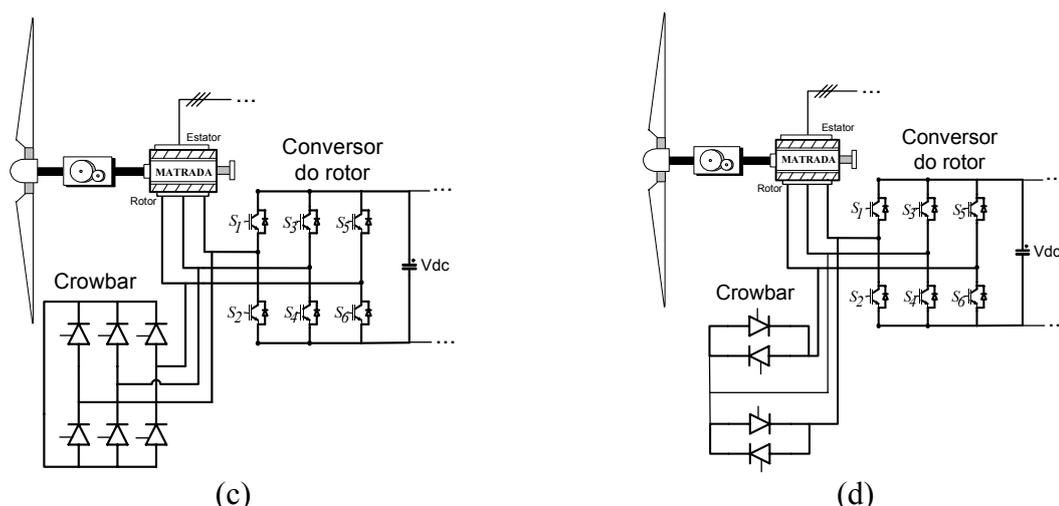


Figura 7-1 – Exemplos de circuitos *crowbar* (a) Ponte retificadora não controlada com um tiristor; (b) Ponte retificadora semi-controlada a tiristor; (c) ponte retificadora totalmente controlada a tiristor; (c) dois pares de tiristores conectados em antiparalelo entre as fases.

A Figura 7-1 (a) mostra um circuito *crowbar* composto por uma ponte retificadora trifásica não controlada e um tiristor que atua no disparo do *crowbar*. Esse circuito tem como vantagem o baixo custo e a facilidade de operação e como desvantagem a incapacidade de desligamento uma vez que a corrente do tiristor não cruza por zero. Sempre que o circuito *crowbar* da Figura 7-1 (a) entrar em operação, o gerador deve ser desconectado da rede elétrica. A Figura 7-1 (b) apresenta um circuito composto por uma ponte retificadora trifásica semi-controlada à tiristor. Esse circuito tem como vantagem a capacidade de desligamento pela extinção do sinal de gatilho e possuir cruzamento por zero das correntes do lado CA do *crowbar*, o baixo custo e a facilidade de operação. Os circuitos *crowbar* da Figura 7-1 (c) é composto por um conversor controlado à tiristor, esse circuito não tem vantagem adicional em relação ao circuito (b) para esse tipo de aplicação. Além disso, o número de dispositivos controlados que o conversor possui é maior e conseqüentemente essa diferença reflete diretamente em um aumento do custo e complexidade de operação do sistema. Por fim, o circuito da Figura 7-1 (d) apesar da capacidade de entrar em operação ser semelhante aos anteriores, o seu desligamento não pode ser auxiliado pelo conversor do rotor, por isso, esse circuito não é uma boa alternativa. Depois dessas primeiras observações, pode-se definir que a

topologia mais atrativa para o conversor em paralelo para essa aplicação é o da Figura 7-1 (b). As próximas seções destacam algumas características de funcionamento desse circuito.

7.2 Operação do Conversor em Paralelo

Durante um curto-circuito na rede elétrica, altos níveis de corrente surgem no estator da máquina Figura 7-2. Essas correntes são induzidas no rotor, o que pode gerar um surto de potência em direção ao conversor do rotor, Figura 7-2. Como essas altas correntes são seguidas de uma queda na tensão no PC, o conversor do lado da rede opera com limitação sobre a potência ativa que pode ser devolvida para rede elétrica. Limitação associada à máxima corrente do conversor e ao nível de queda de tensão no PC. Devido a essa limitação, as correntes rotóricas podem carregar o banco de capacitores do barramento CC que rapidamente podem ultrapassar os limites de tensão suportados pelos dispositivos semicondutores dos conversores de potência e do próprio capacitor. Por isso, o circuito *crowbar* atua quando a corrente rotórica ou a tensão no barramento CC ultrapassam os limites estabelecidos pelo projetista. Como as correntes rotóricas possuem transitórios mais rápidos que os transitórios de tensão do barramento CC, na maioria dos casos, o ligamento do *crowbar* fica restrito a sobre correntes no rotor.

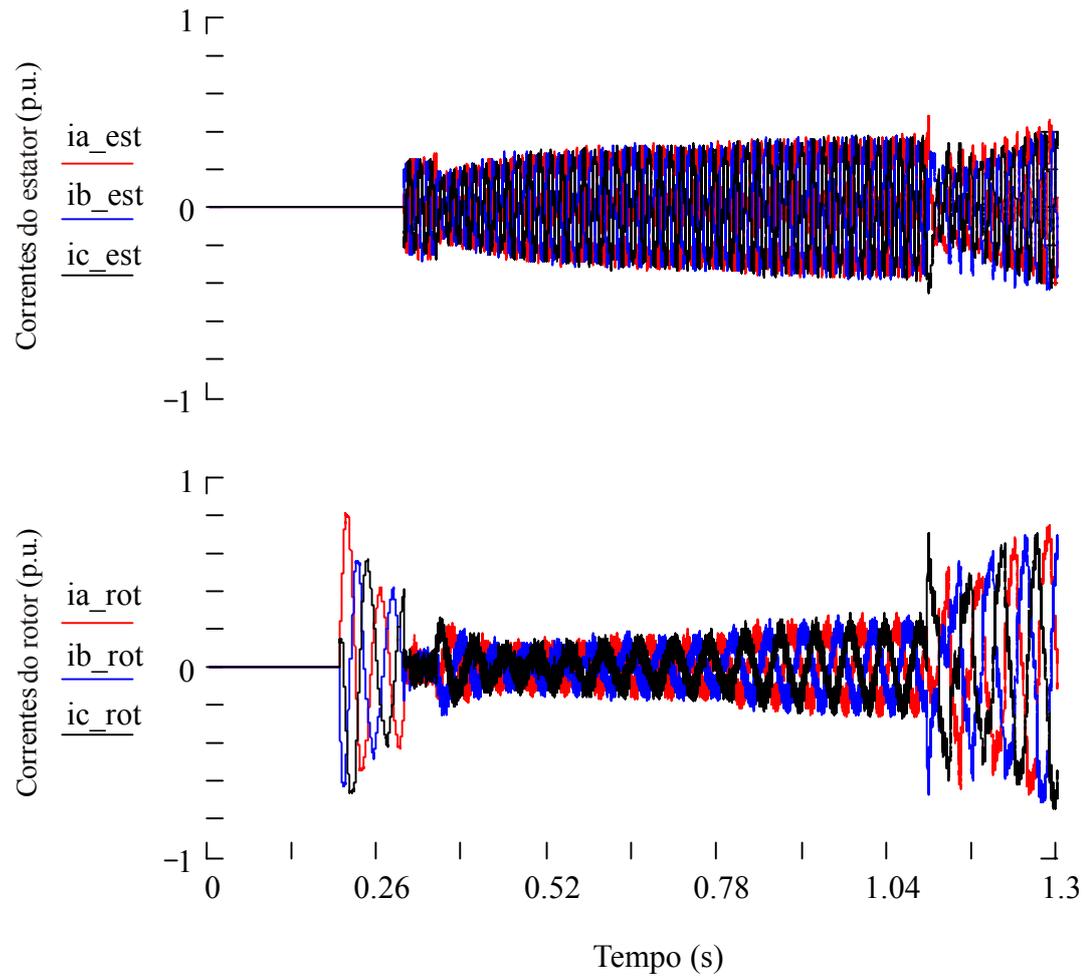


Figura 7-2 – Correntes no Estator e Rotor da MATRADA durante o curto-circuito na rede elétrica.

As correntes do rotor durante o curto-circuito podem gerar um surto de potência no circuito rotórico conforme pode ser observado na Figura 7 - 2.

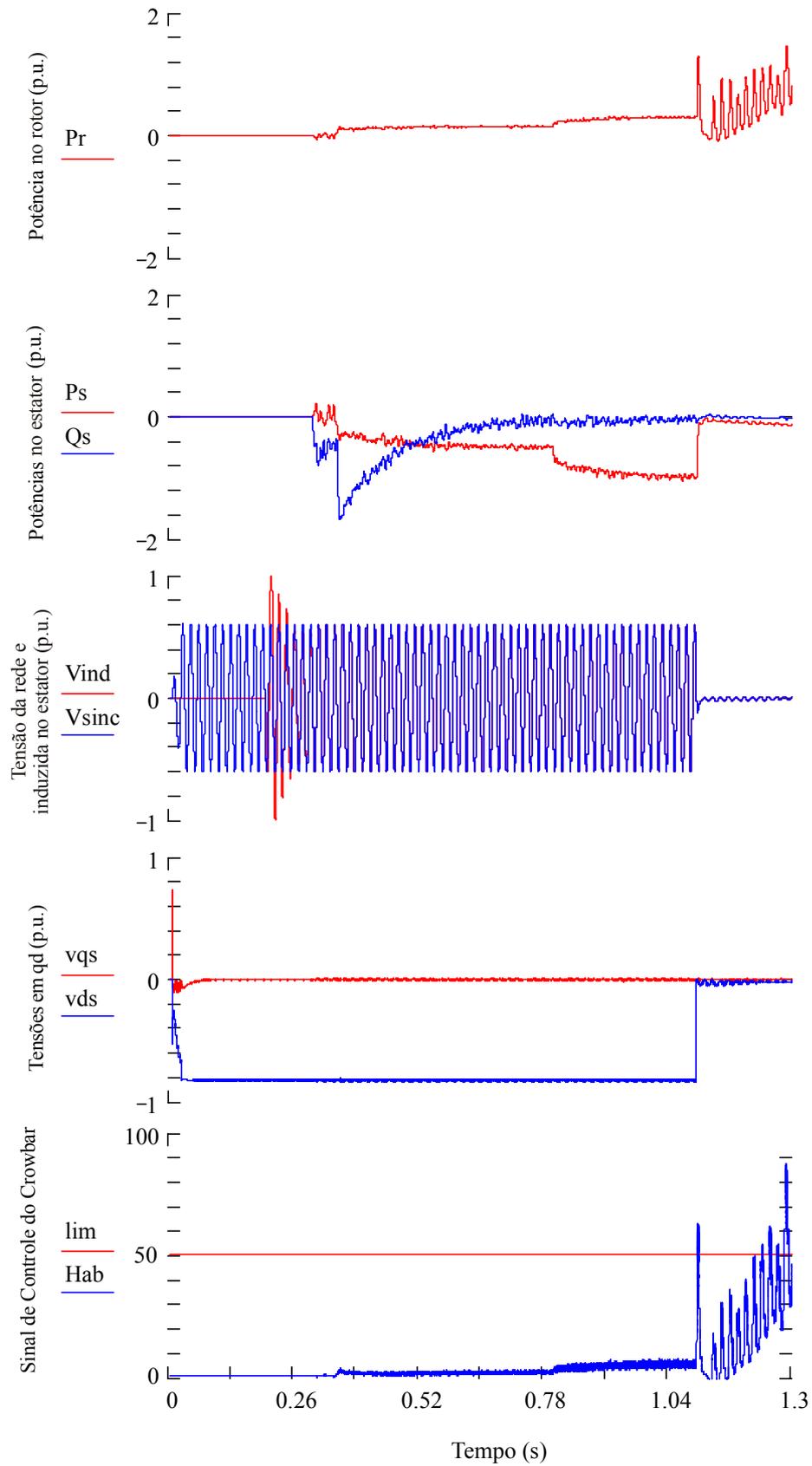


Figura 7-3 – (a) Potência Ativa no rotor, (b) potências no estator, (c) tensão induzida e de sincronismo, (d) tensão no PC em coordenadas síncronas, (e) limite de corrente no conversor ultrapassado.

Devido ao fato da orientação dos controladores vetoriais dependerem da posição do fluxo estático, durante o curto-circuito, o erro de estimação da posição do fluxo não deve aumentar significativamente. A Figura 7-4 mostra a variação na estimativa da frequência elétrica angular do fluxo estático, pode ser visto o impacto da queda de tensão na estimativa da posição do fluxo estático e o erro na estimativa da posição durante o curto-circuito.

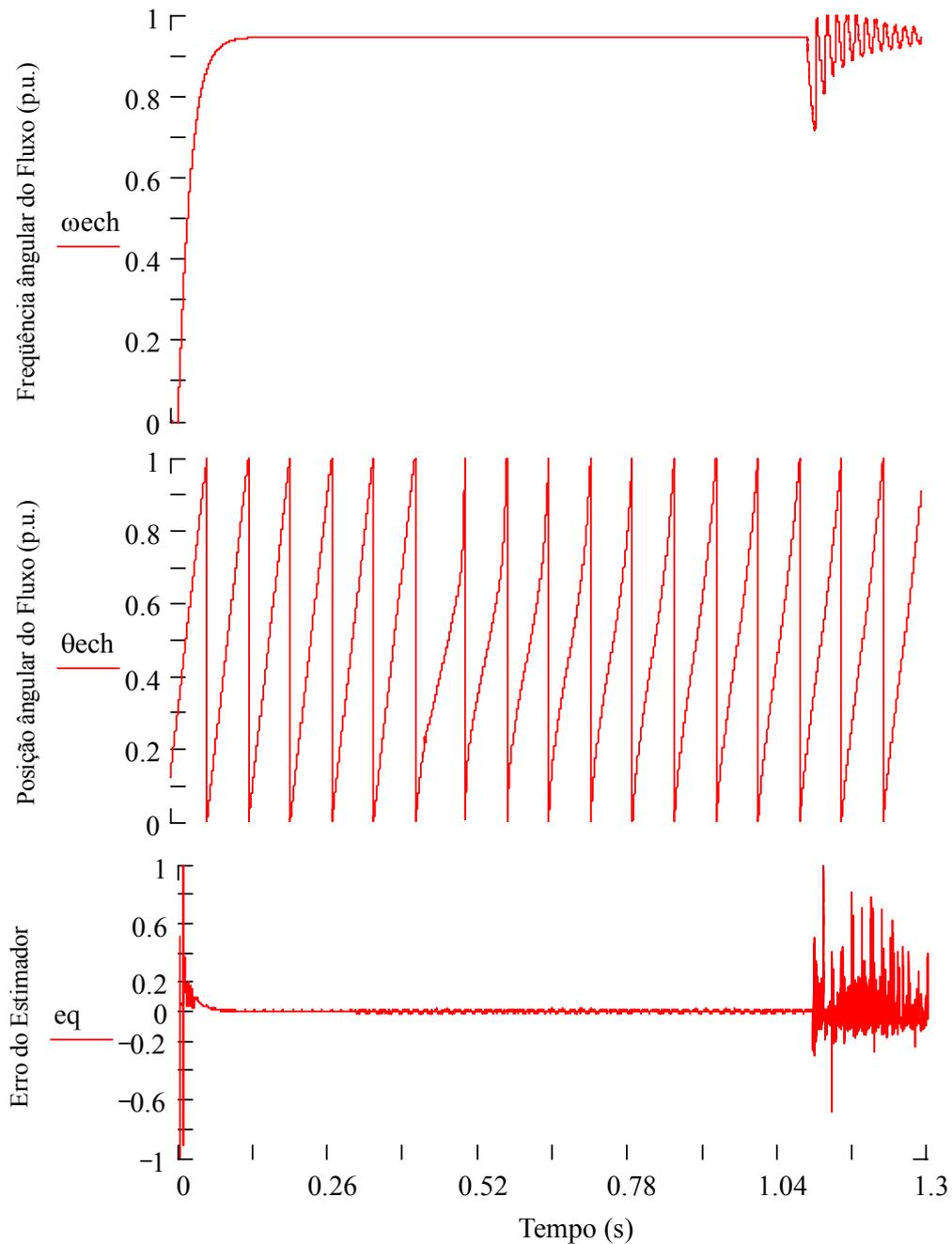


Figura 7-4 – (a) Frequência angular estimada. do fluxo estático, (b) posição estimada do fluxo estático, (c) erro de estimação

Para evitar todos esses fenômenos indesejáveis comentados anteriormente, a inclusão do circuito *crowbar* mostra-se indispensável.

Para a operação do circuito *crowbar*, dois modos de operação são analisados:

(i) Modo de Habilitação

- a. Habilitação por sobre corrente no conversor do rotor ou sobre tensão no barramento CC

(ii) Modo de Desligamento

- a. Extinção do gatilho do *crowbar* e espera do cruzamento da corrente do tiristor por zero.
- b. Extinção do gatilho do *crowbar* e habilitação do conversor do rotor

A habilitação do conversor em paralelo é simples. O sistema de controle já possui a informação do módulo das correntes rotóricas da MATRADA e a medida da tensão do barramento. A partir da definição de uma corrente máxima suportada pelo conversor e de uma tensão máxima no barramento CC, o *crowbar* deve ser habilitado sempre que o módulo desses valores ultrapassar o limite definido pelo projetista.

O desligamento do circuito *crowbar* não é tão simples como a habilitação. A condição para desligar o *crowbar* é que o afundamento de tensão seja limpo e que os níveis de corrente rotórica e tensão do barramento CC estejam dentro das condições normais de operação. Pode-se desligar o circuito de duas maneiras: (ii.a) ou (ii.b). O método de extinção do gatilho e espera do cruzamento da corrente do tiristor por zero (ii.a) não funciona se a velocidade da turbina for igual à velocidade síncrona. Isso porque as correntes rotóricas são contínuas e qualquer uma das topologias apresentadas não vão sair de operação, Figura 7-5. Mesmo em velocidades próximas a da síncrona, as correntes no rotor são de baixa frequência e, como consequência, o tempo de abertura será muito grande ($T_q > 200\text{ms}$) Figura 7-6. Por outro lado, quando se usa o método de extinção do gatilho do *crowbar* e habilitação do conversor do

rotor (ii.b), o tempo para o desligamento é muito pequeno ($T_q < 5$ ms) Figura 7-7 e Figura 7-8, isso devido ao conversor aplicar uma tensão PWM no rotor da máquina o que leva a corrente no *crowbar* cruzar rapidamente por zero. Embora a alternativa (ii.b) seja mais eficaz do que a (ii.a), se não for adotado um procedimento de habilitação do conversor do rotor adequado, pode-se danificar o conversor quando esse entrar em operação com o rotor curto-circuitado Figura 7-9 e Figura 7-10.

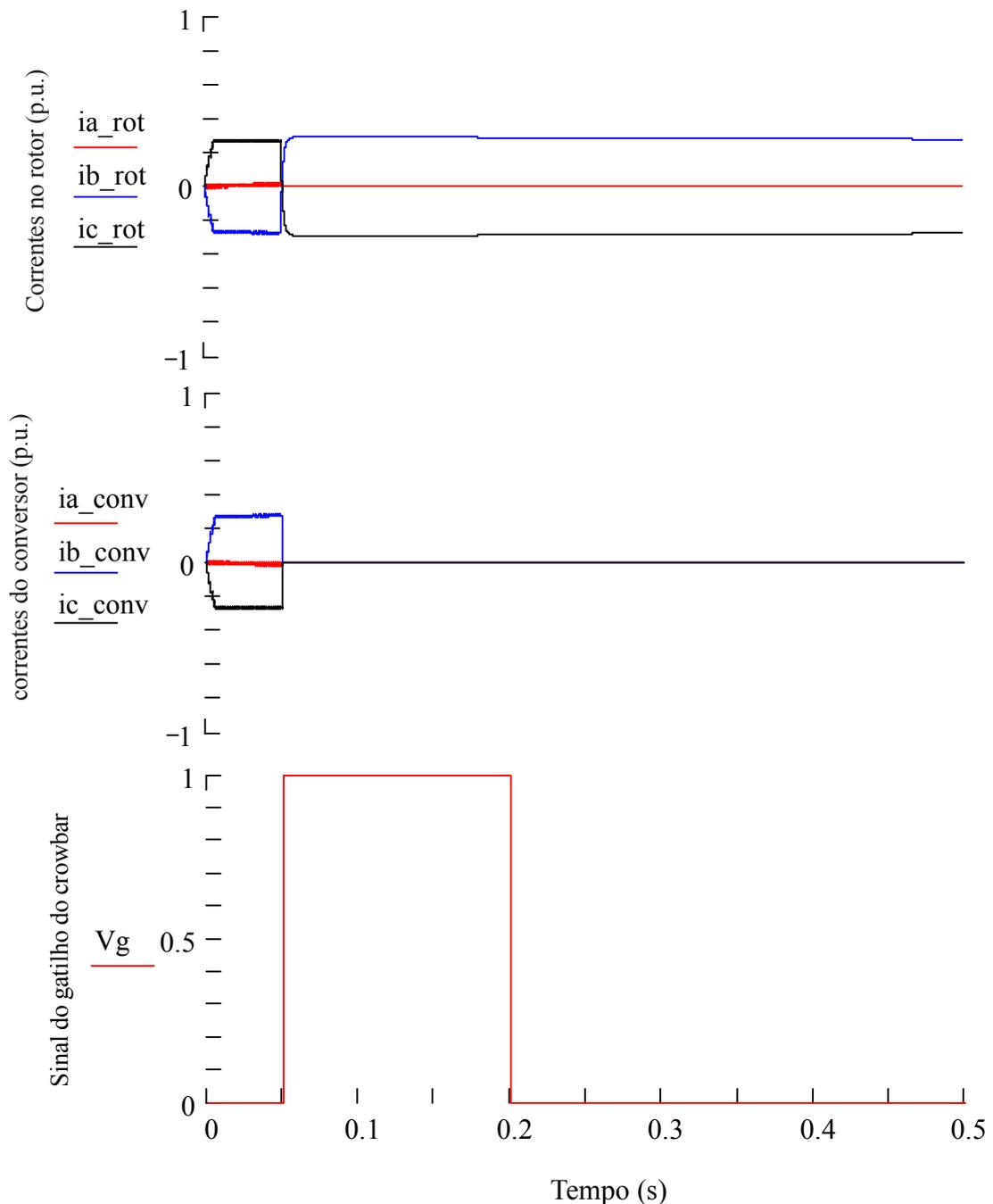


Figura 7-5 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e cruzamento da corrente por zero velocidade síncrona.

Considerando uma velocidade rotórica 20% abaixo da velocidade síncrona, pode-se ver que o tempo de abertura ainda é grande, próximo aos 150 ms.

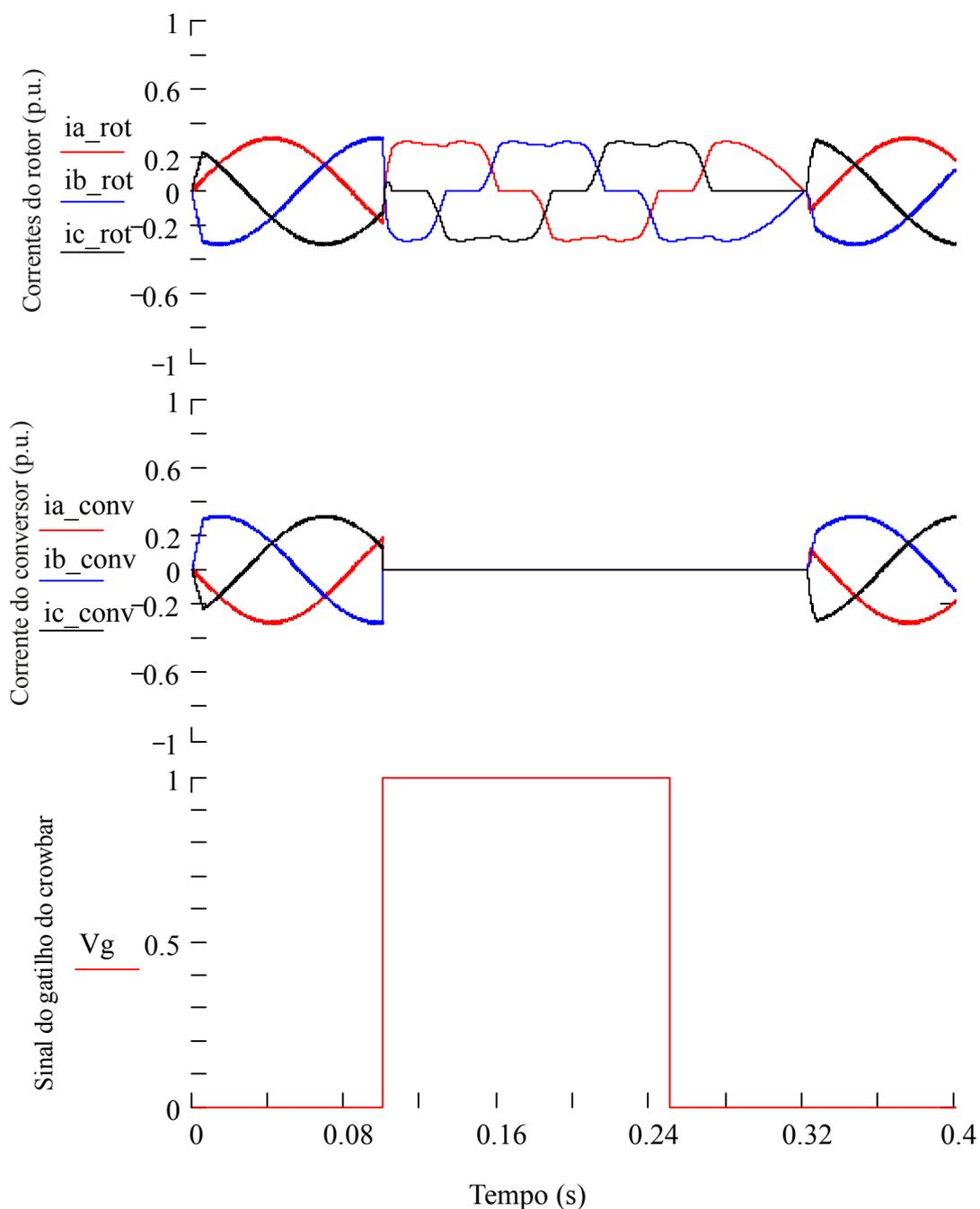


Figura 7-6 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e cruzamento da corrente por zero 20% abaixo da velocidade.

Com a estratégia de desligamento do *crowbar* desenvolvida, pode ser visto que o circuito sai rapidamente de operação conforme Figura 7-7 e Figura 7-8.

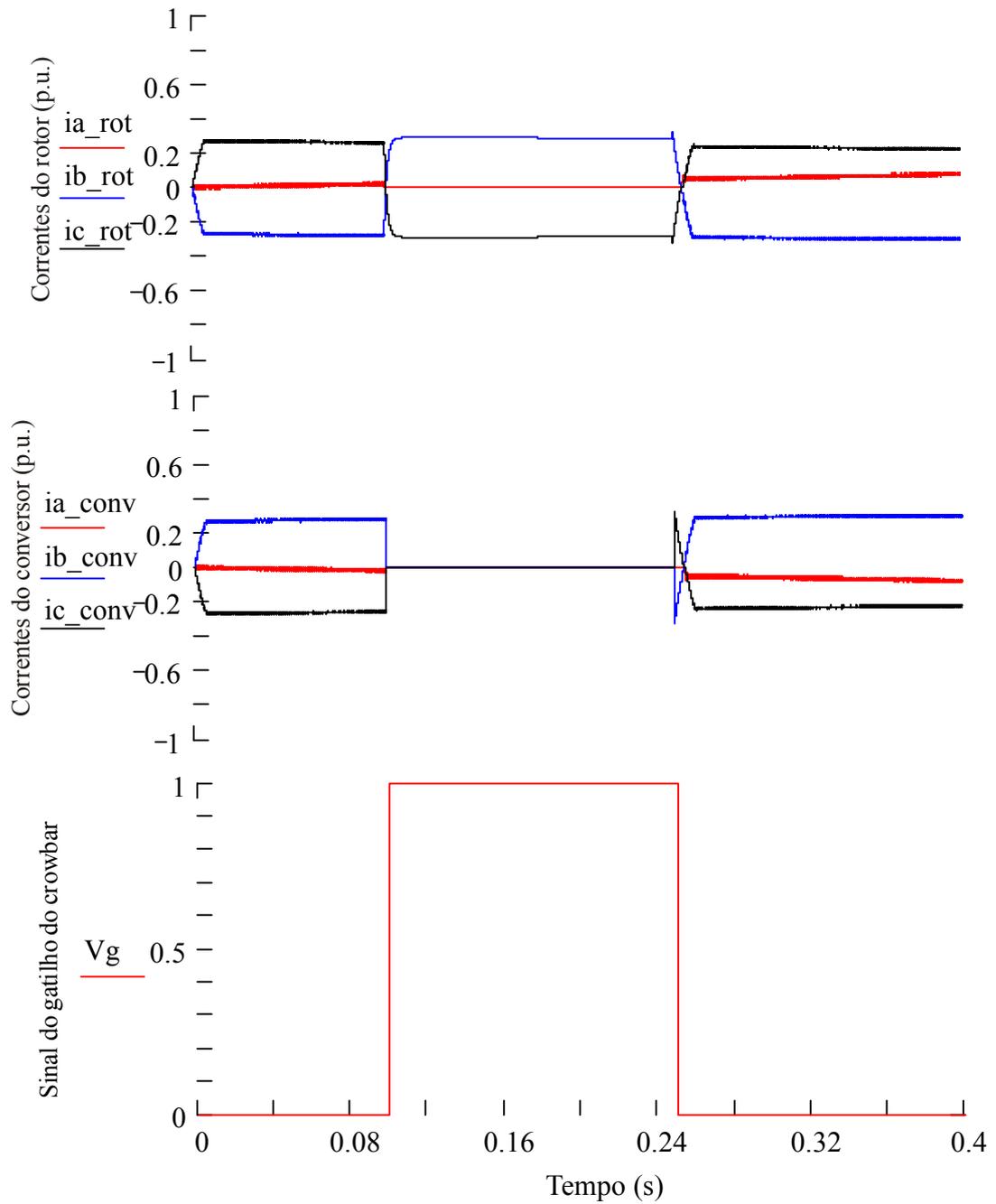


Figura 7-7 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e habilitação do conversor do rotor velocidade síncrona.

Para um escorregamento de 20% tem-se

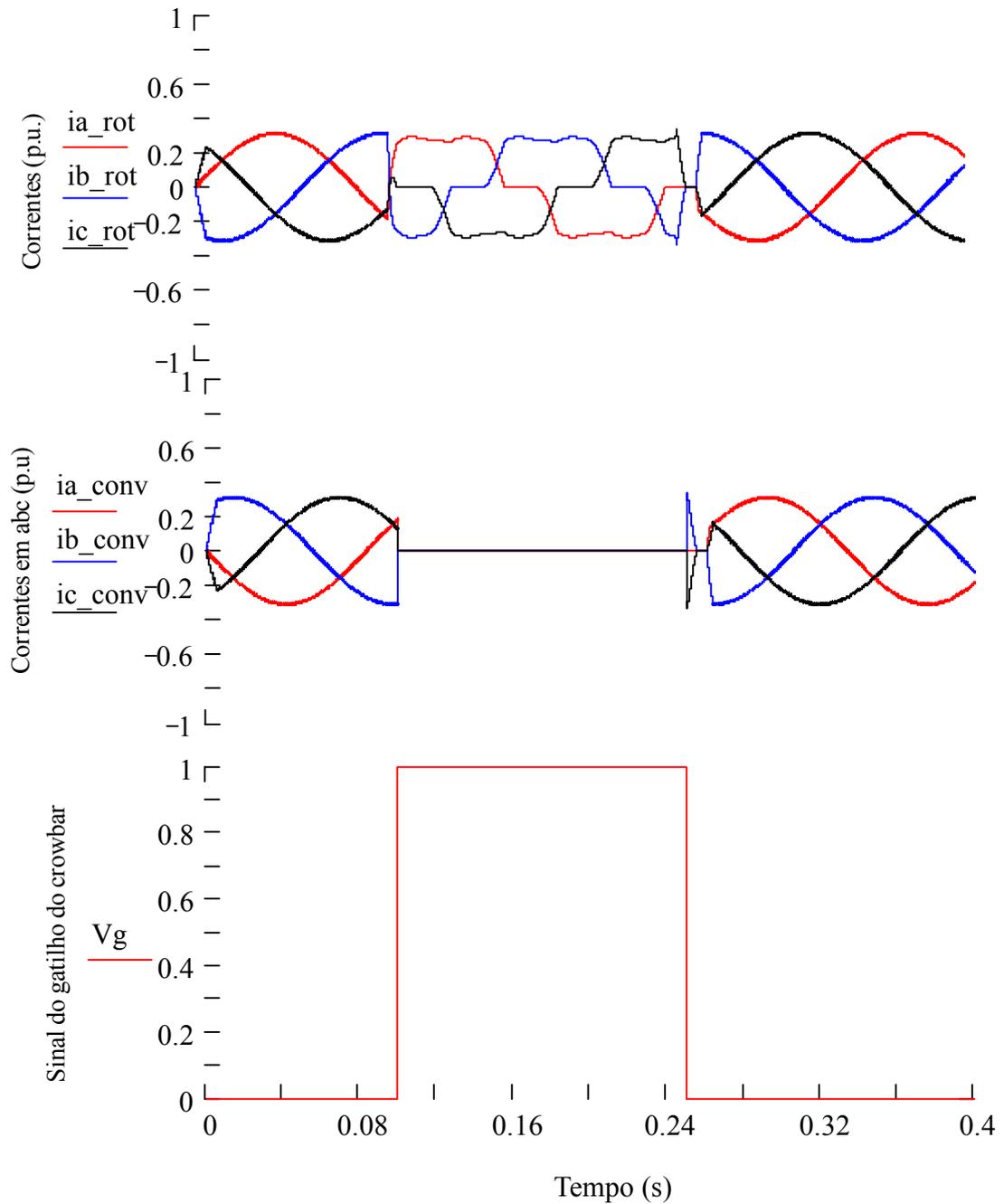


Figura 7-8 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e habilitação do conversor do rotor velocidade 20% abaixo da síncrona.

Se a habilitação do conversor não seguir a metodologia desenvolvida pode-se danificar o conversor do rotor conforme as Figura 7-9 e Figura 7-10.

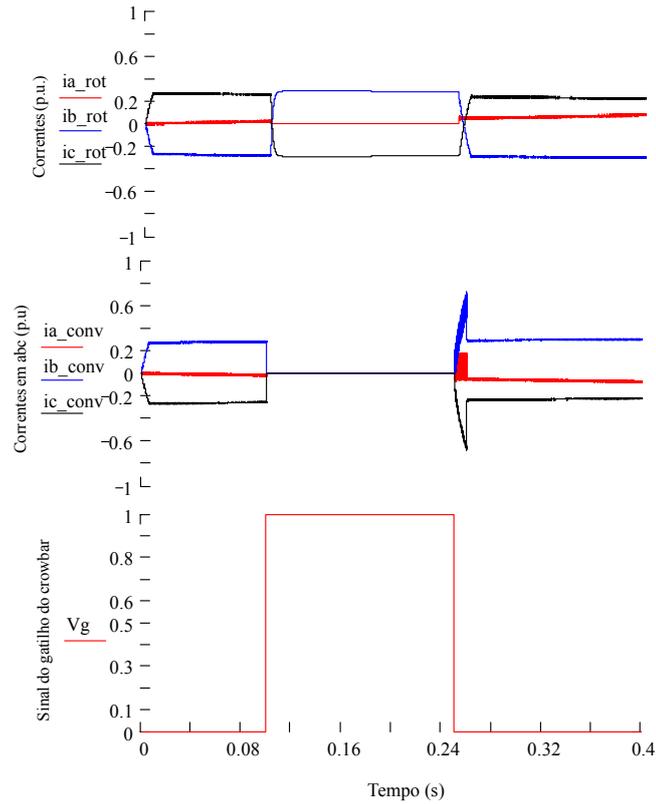


Figura 7-9 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e habilitação do conversor do rotor velocidade síncrona sem metodologia para desligamento.

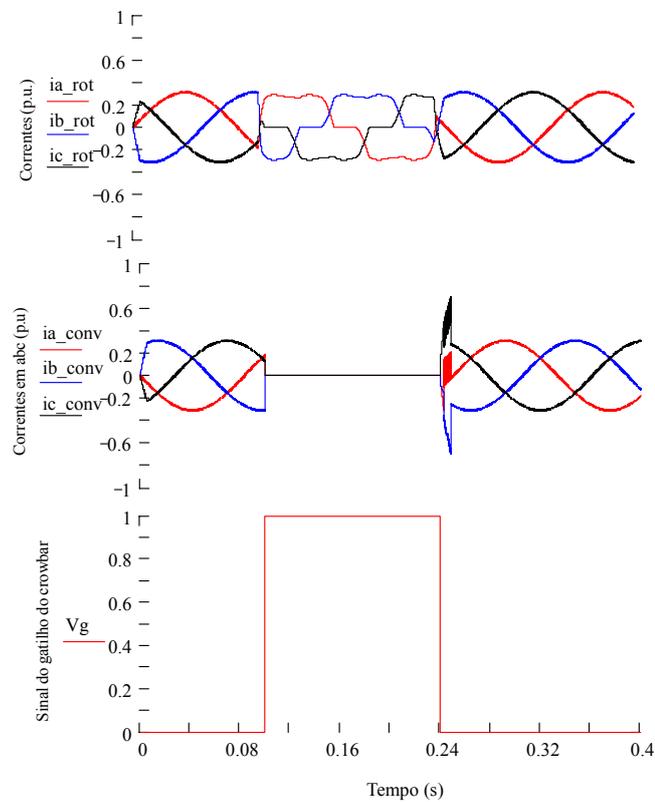


Figura 7-10 – Extinção do gatilho do *Crowbar* e habilitação do conversor do rotor velocidade 20% abaixo da síncrona sem metodologia para desligamento.

O procedimento desenvolvido nessa dissertação para a saída do conversor em paralelo é apresentado na próxima subseção.

7.3 Procedimento desenvolvido para desligar o conversor em paralelo

Para reduzir o esforço do conversor do rotor, é adicionada uma resistência ao circuito *crowbar*. Essa alternativa altera a curva torque x velocidade da máquina durante o curto-circuito devido o aumento da resistência rotórica, além disso, a resistência limita as correntes que circulam no rotor da máquina durante o curto-circuito.

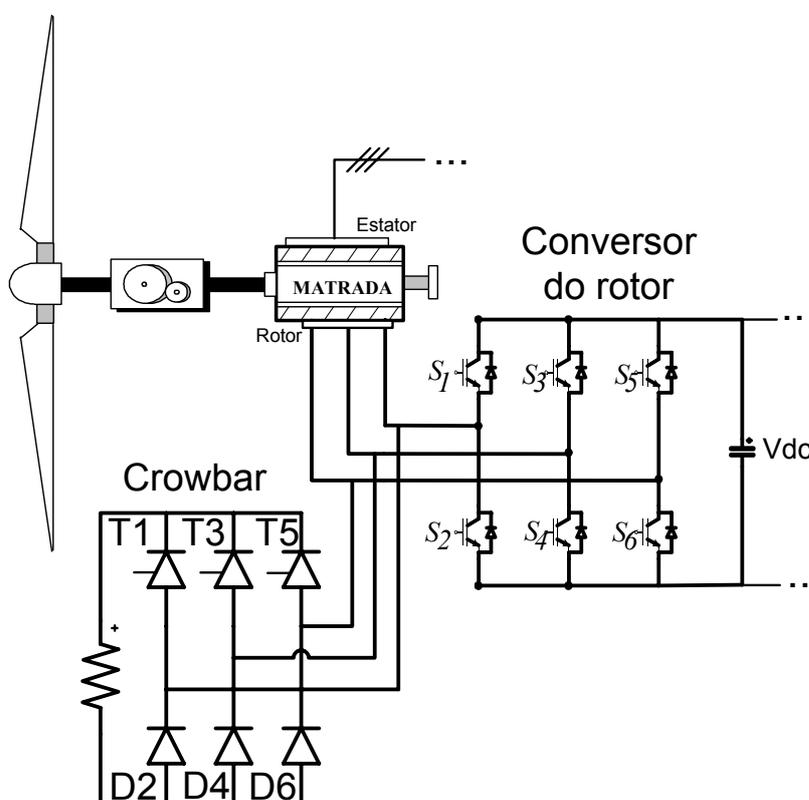


Figura 7-11 – Ponte retificadora semi-controlada a tiristor com resistor.

Conforme mencionado anteriormente, o conversor do rotor pode ser danificado se for habilitado sem um procedimento adequado. Para isso, foi definida uma seqüência de comutação para cada estado de condução do *crowbar*. Isso é possível, devido às medidas das correntes rotóricas disponibilizarem a informação do estado de cada semicondutor do circuito *crowbar*. Sendo assim, foi montada a tabela verdade durante a operação do circuito *crowbar*.

da Figura 7-11 onde T1, T3 e T5 representam os estados de condução dos tiristores e D2, D4 e D6 representam os estados de condução dos diodos. As correntes rotóricas estão representadas por i_a , i_b e i_c , os estados dos semicondutores do conversor do rotor estão representados por S1, S2, S3, S4, S5, S6. Por fim, a saída da tabela verdade é representada por Y. Considere 1 para fechado e 0 aberto.

Tabela 7-1. Tabela verdade do circuito *crowbar* da Figura 7-11.

ia	ib	ic	T1	D2	T3	D4	T5	D6	S1	S2	S3	S4	S5	S6	Y
-	+	-	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1
-	+	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	0	0	2
-	+	+	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	1	0	3
-	0	+	1	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	4
-	-	+	1	0	1	0	0	1	0	1	0	1	1	0	5
0	-	+	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	6
+	-	+	0	1	1	0	0	1	1	0	0	1	1	0	7
+	-	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	0	0	8
+	-	-	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	0	1	9
+	0	-	0	1	0	0	1	0	1	0	0	0	0	1	10
+	+	-	0	1	0	1	1	0	1	0	1	0	0	1	11
0	+	-	0	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	12

Note que na tabela verdade estão representados apenas 12 das 27 possibilidades de condução de corrente. Somente as que satisfazem a lei das correntes de *Kirchhoff*.

Para exemplificar a versatilidade da tabela verdade, observe na Figura 7-12 (a) as correntes do rotor, (b) as correntes do conversor, (c) as correntes dos tiristores e (d) as correntes dos diodos do circuito *crowbar*. Na Figura 7-13 pode ser visto durante toda a operação do circuito *crowbar* os possíveis estados para forçar uma tensão reversa para agilizar o desligamento do *crowbar*.

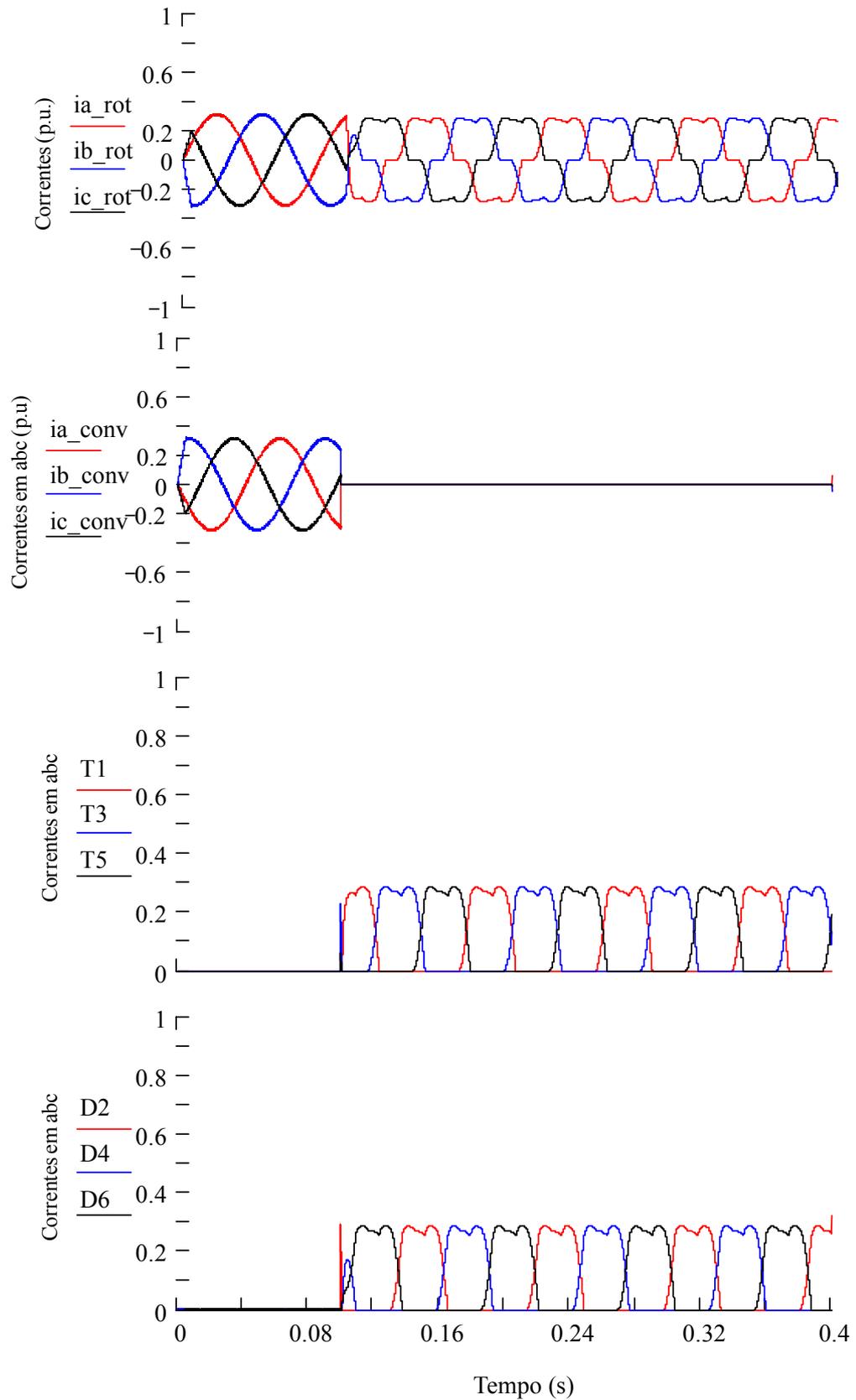


Figura 7-12 – (a) Correntes rotóricas (12 Hz) durante operação do *crowbar*, (b) correntes do conversor, (c) correntes nos tiristores, (d) correntes nos diodos.

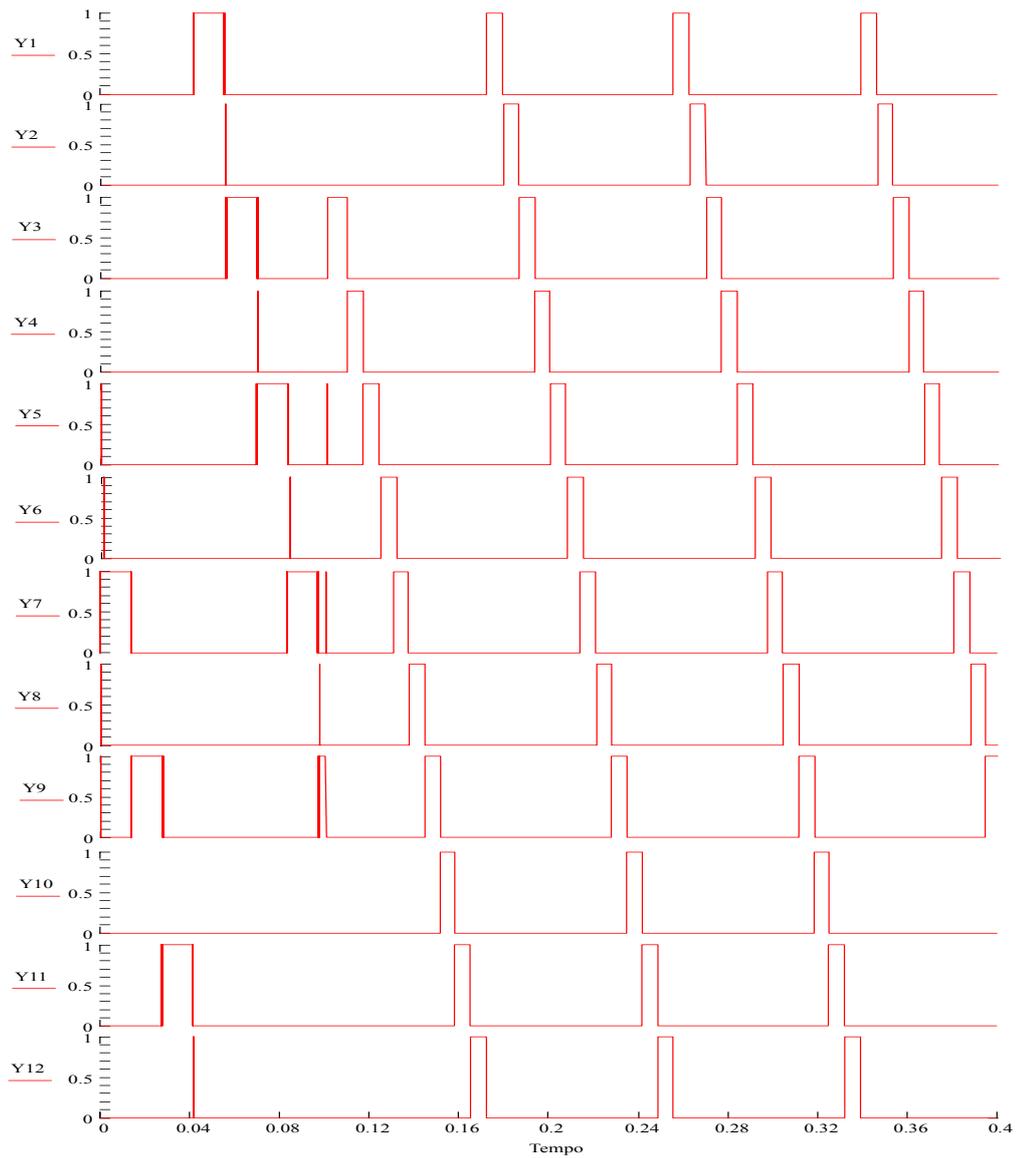


Figura 7-13 – Estado de saída da Tabela 7-1

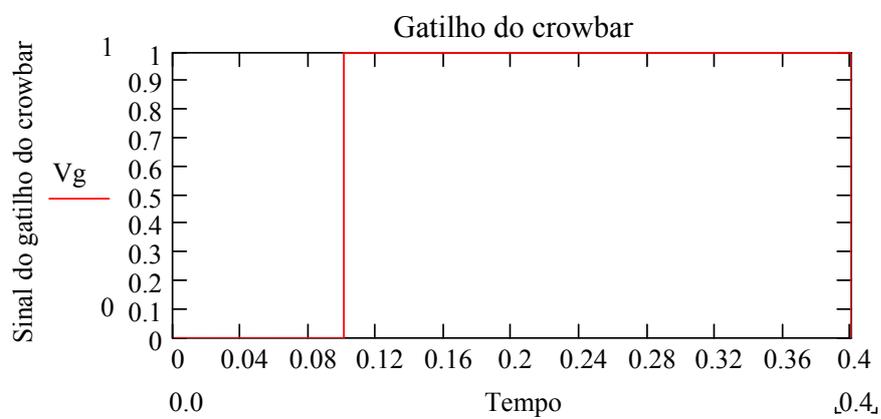


Figura 7-14 – Gatilho do *crowbar*

Resultados semelhantes para um escorregamento de 20% estão representados nas Figura 7-15 à Figura 7-16.

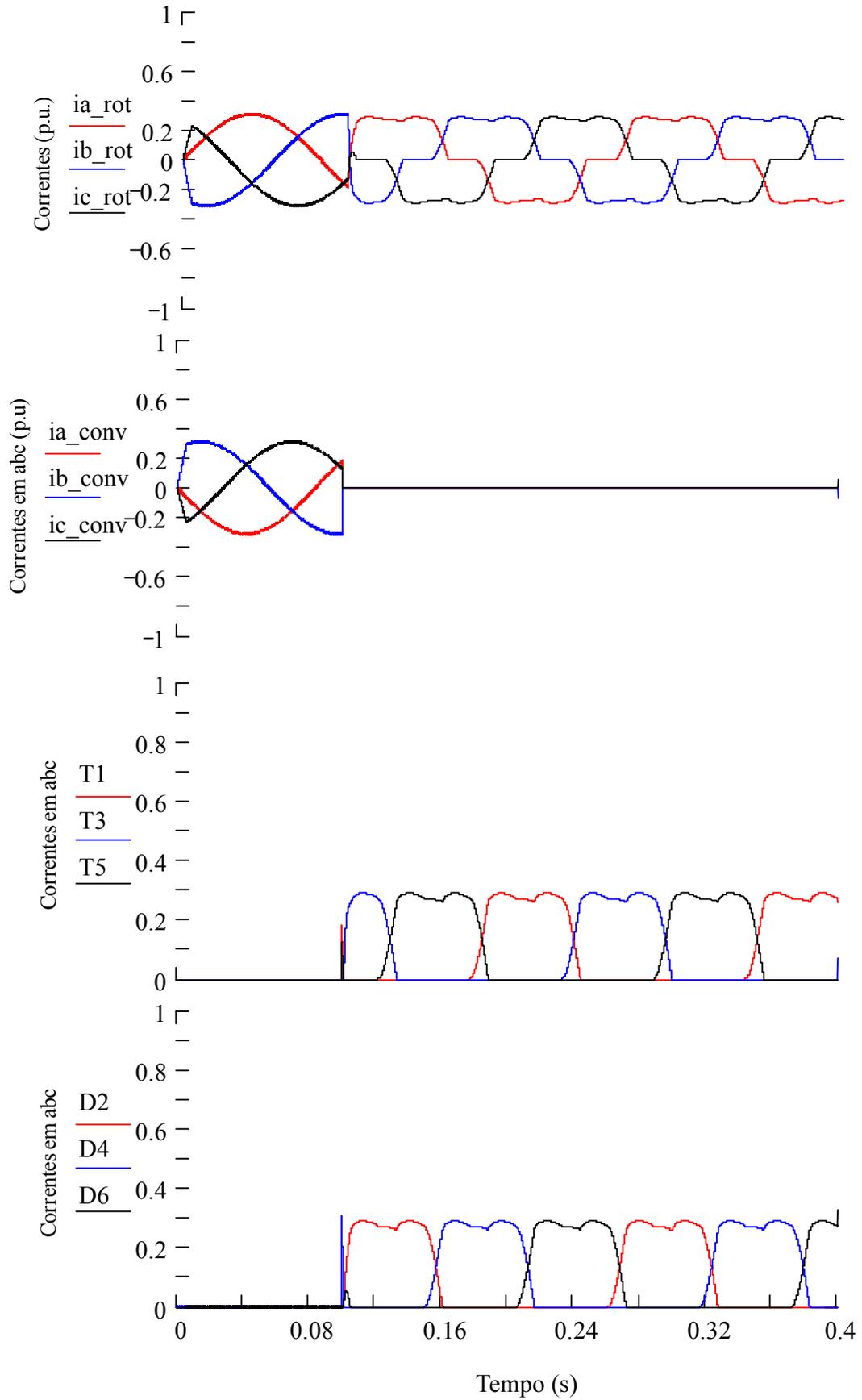


Figura 7-15 – Correntes rotóricas durante operação do *crowbar* da Figura 7-, corrente rotórica 6 Hz

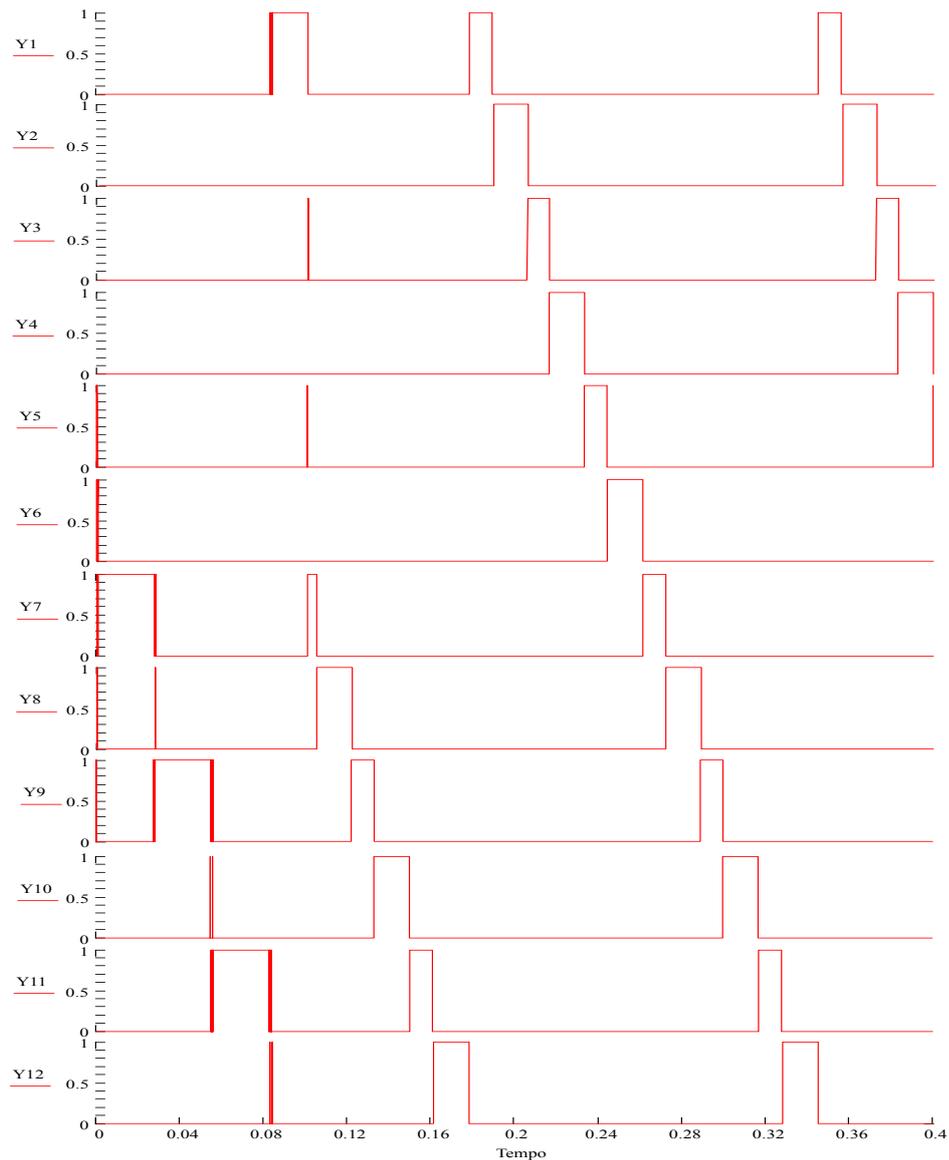


Figura 7-16 – Estado de saída da Tabela 7-

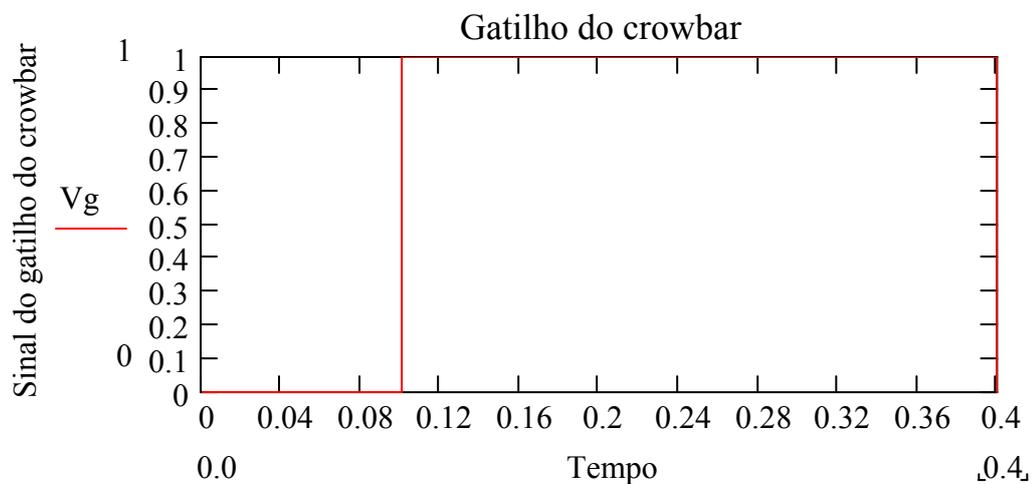


Figura 7-17 – Gatilho do *crowbar*

Com base na Tabela 7-1, pode-se verificar que em qualquer instante o conversor do rotor pode ser habilitado para forçar o desligamento do *crowbar* adequadamente. Conforme

mostrado na Figura 7-8 (a), no instante 0,295 ms as correntes no rotor são $i_a > 0$, $i_b < 0$ e $i_c < 0$, (b) as correntes dos tiristores do *crowbar* são $T1=0$, $T3=1$ e $T5=1$, (c) as correntes dos diodos do *crowbar* são iguais a $D2=1$, $D4=0$ e $D6=0$. Analisando apenas a medida das correntes rotóricas, verifica-se que a saída da Tabela 7-1 dada por Y9, conforme pode ser visto na Figura 7-19. Sendo assim, os estados do conversor do rotor serão respectivamente $S1=1$, $S3=0$ e $S5=0$, conforme mostrado na Tabela 7-1.

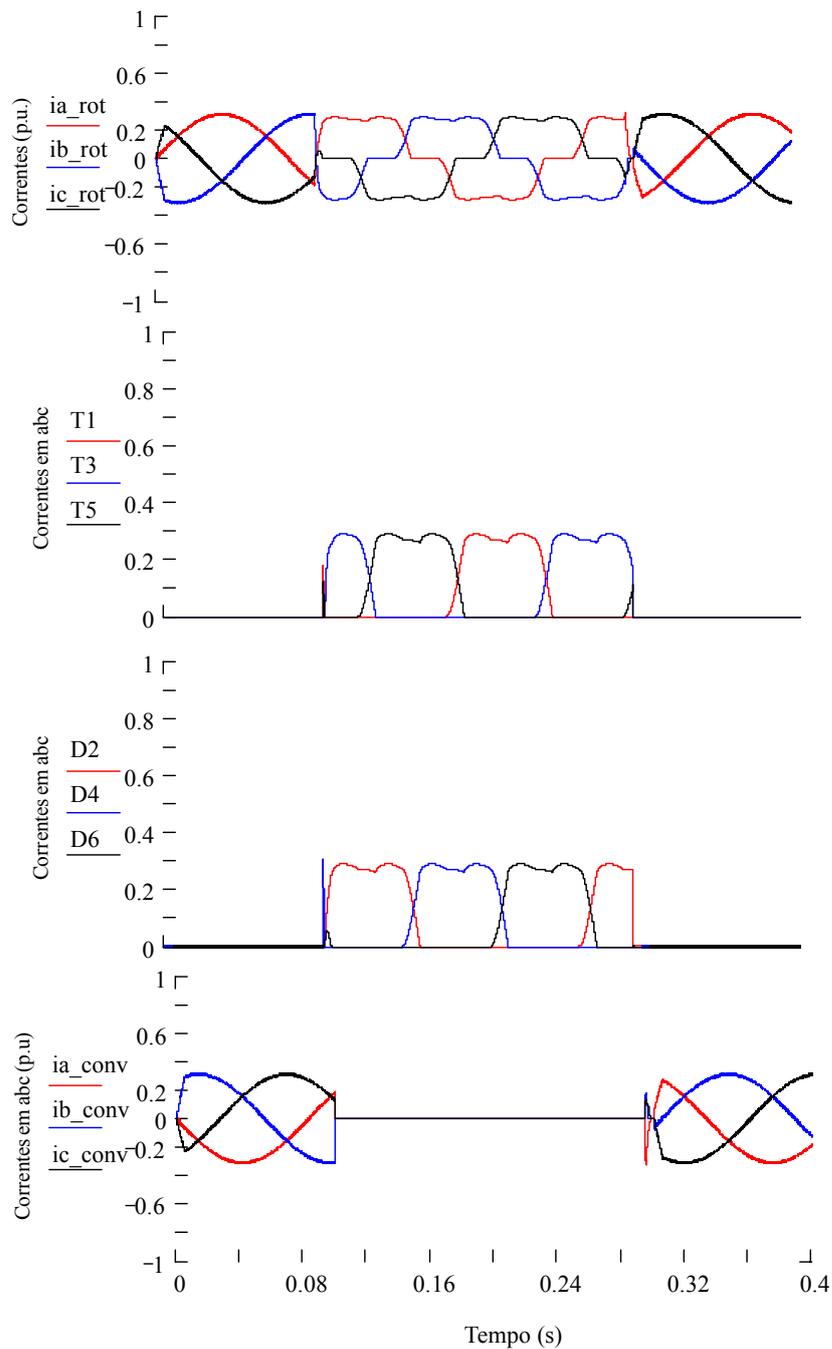


Figura 7-18 – Corrente no rotor durante operação do *crowbar* da Figura 7-, $f=6$ Hz

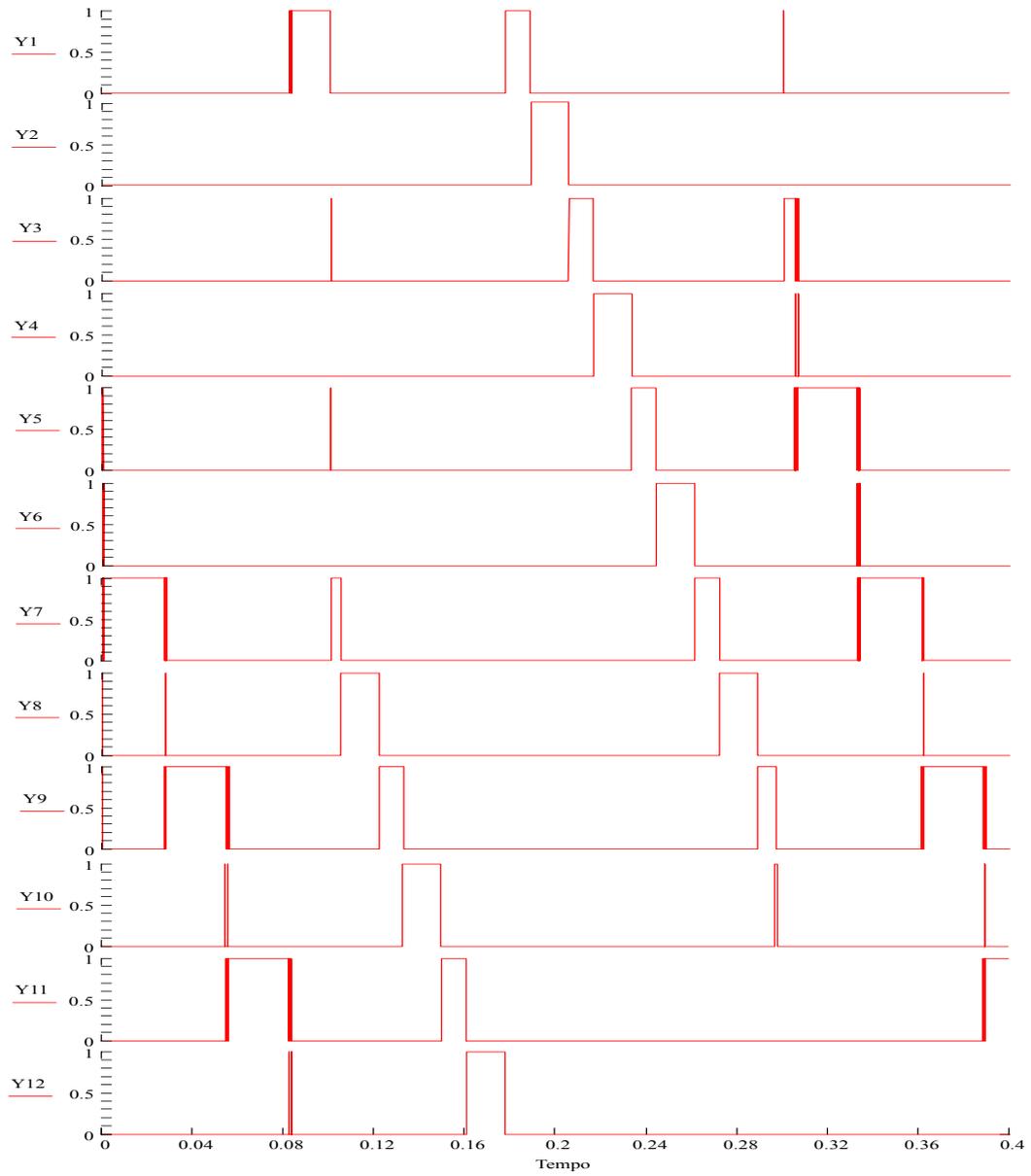


Figura 7-19 – Saída Y da Tabela 7-1

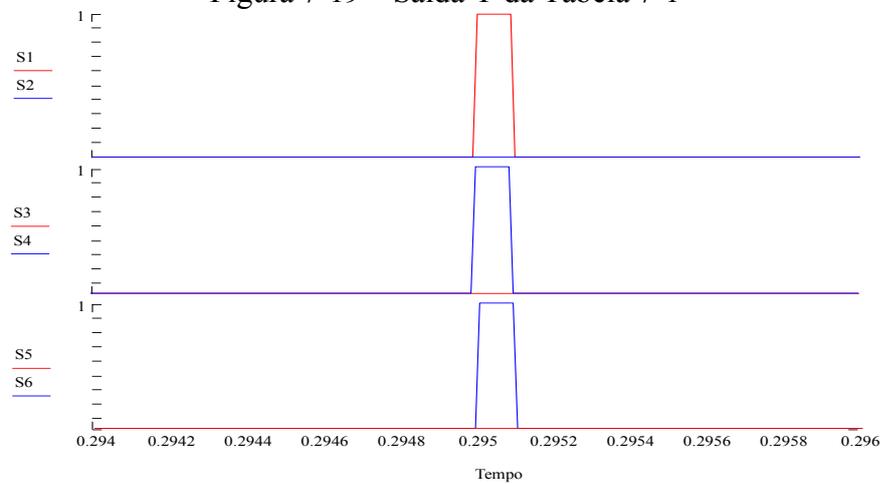


Figura 7-20 – estado das chaves do conversor do rotor

7.4 Sumário

Esse capítulo apresentou uma revisão sobre os diversos tipos de conversores em paralelo estudados na literatura e a partir dessa revisão uma topologia foi escolhida e otimizada para melhorar o desempenho do sistema de geração com MATRADA conectada a rede elétrica durante quedas de tensão no PC. Além disso, uma metodologia de desligamento do conversor em paralelo foi desenvolvida.

CAPÍTULO 8

DESENVOLVIMENTO DE UMA PLATAFORMA EXPERIMENTAL

O avanço dos sistemas de controle aplicados às máquinas elétricas, exige acionamentos cada vez mais eficientes. Com isso, as técnicas de controle discreto geralmente requerem um meio computacional para sua execução. Nessa direção, esse capítulo descreve um protótipo projetado para controle de um sistema de geração eólica conectado com a rede elétrica. Este protótipo foi desenvolvido para implementar técnicas de controle digital em tempo real. O mesmo é constituído basicamente por dois blocos principais. (i) Módulo de controle da MATRADA e (ii) Módulo de simulação da Turbina. Cada módulo de controle possui um Processador Digital de Sinais (DSP), conversores estáticos de potência, proteções, circuitos de *interface* para adequação dos sinais do DSP e sensores para medidas de sinais elétricos, como tensões e correntes CA/CC. A plataforma também possui sensores mecânicos que possibilitam a medida de posição, velocidade e torque no eixo de acoplamento do motor-gerador. Para a conexão desse sistema com a rede elétrica, foi projetado um transformador trifásico com três enrolamentos. O software de gerenciamento e controle foi desenvolvido em linguagem de programação C e Assembly. Os resultados experimentais apresentados neste trabalho comprovam a versatilidade e eficácia do esquema proposto quando aplicado no

controle em malha fechada de máquinas assíncrona trifásica duplamente alimentada conectada a rede elétrica.

A plataforma foi desenvolvida com uma MATRADA de 5kW acoplada a um motor de indução gaiola de esquilo acionada por um inversor. Projetada para ser utilizada em experimentação no laboratório e para reproduzir as condições de operação de conexão com a rede elétrica. Uma descrição detalhada é apresentada na próxima seção.

8.1 Descrição da Plataforma Experimental

O diagrama de blocos da bancada de ensaios pode ser visto na Figura 8-1. O sistema é composto basicamente por seis elementos: (i) Módulo de controle da MATRADA; (ii) Módulo de controle do Motor de Indução (MI); (iii) Conjunto Motor-Gerador; (iv) Transformador; (v) Fonte de energia ininterrupta (UPS) e (vi) *Software* de programação. Todos os elementos estão representados no *Layout* na Figura 8-1.

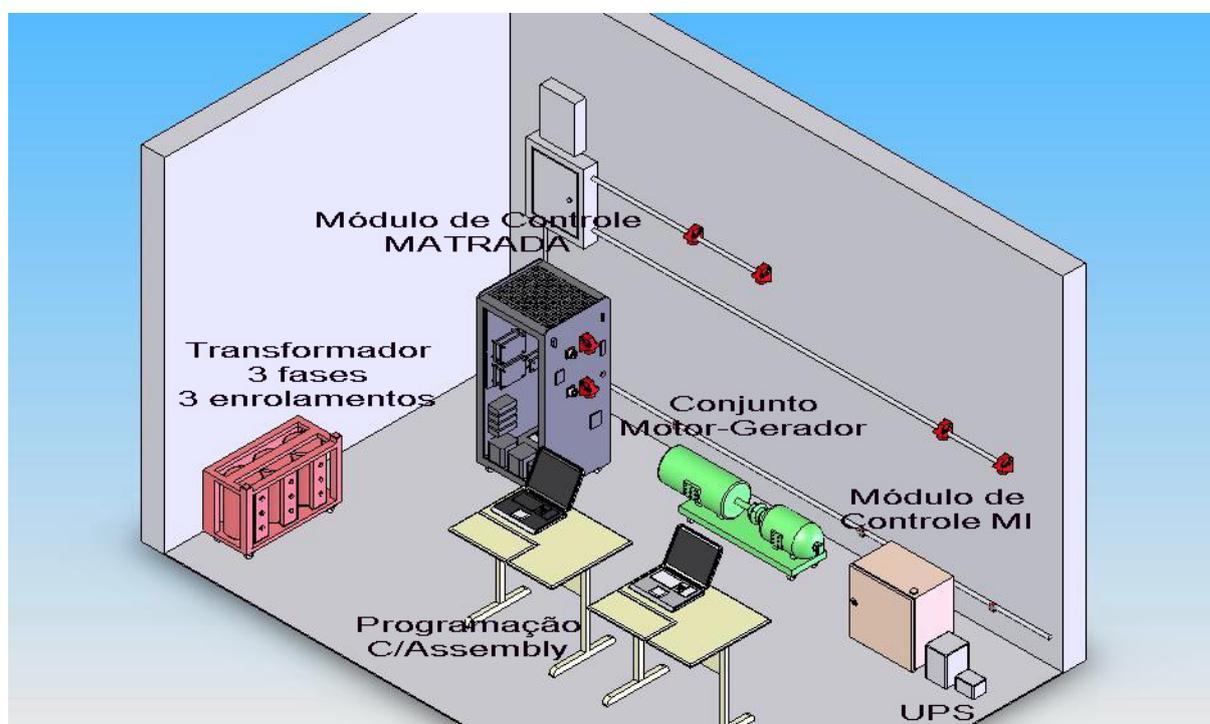


Figura 8-1 – *Layout* projetado para a Plataforma de ensaios. Principais componentes.

Uma foto da Plataforma desenvolvida em laboratório pode ser vista na Figura 8-2.