

Modelação do SRED, Conjunto Máquina assíncrona - Conversores

1 Introdução

Para se conhecerem as características do SRED torna-se necessário recorrer a um modelo que permita estimar o seu comportamento em determinadas situações.

O maior ou menor número de situações, em que as conclusões retiradas das simulações feitas sobre o modelo são válidas, é obviamente, dependente da fineza com que o respectivo modelo é construído.

O modelo do SRED deve incluir a máquina assíncrona, os rectificadores, o filtro DC, e o conversor DC/AC conforme é exposto na Figura 5.1:

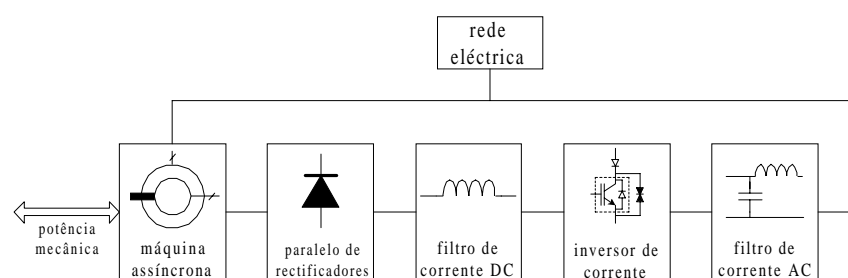


Figura 5.1 - Modelação do SRED.

Como a dinâmica do sistema Turbina - Máquina assíncrona é lenta face às constantes de tempo dos componentes eléctricos e electrónicos, não existe necessidade de elevar a complexidade do modelo de modo a contemplar os regimes transitórios eléctricos da máquina assíncrona.

Desta forma, junta-se uma adaptação do modelo clássico por fase da máquina assíncrona a um modelo simples dos conversores electrónicos, de modo a serem retiradas conclusões sobre o comportamento do SRED em regime permanente.

Assim, no modelo dos conversores electrónicos desprezam-se todos os harmónicos e considera-se que do lado alternado, a corrente está em fase com a tensão.

A construção do modelo é feita referenciando todos os componentes ao estátor da máquina assíncrona. Desta forma, é necessário obter a forma com o estátor vê os restantes componentes do sistema.

2 Modelo da máquina assíncrona

O modelo em T por fase (Figura 5.2) apenas é válido em regime permanente e assume que os enrolamentos do estátor e do rotor estão ligados em estrela.

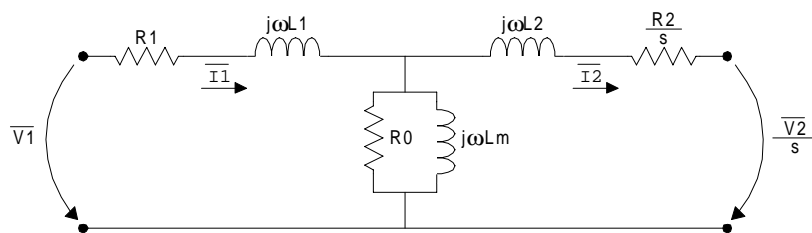


Figura 5.2 - Modelo para representação da máquina assíncrona.

O modelo da Figura 5.2 representa todas as grandezas da máquina referidas ao seu estátor:

- $\overline{V1}$ - Tensão simples de alimentação do estátor. (Complexo Steinmetz)
- $\overline{V2}$ - Tensão aos terminais dos enrolamentos rotóricos. (Complexo Steinmetz)
- $\overline{I1}$, $\overline{I2}$ - Correntes nos enrolamentos do estátor e do rotor. (Complexo Steinmetz)
- $L1$, $L2$ - Indutâncias de fugas do estátor e do rotor.
- Lm - Indutância de magnetização da máquina.
- $R0$ - Resistência para representar as perdas não joule (histerese, Foulcaut, etc).
- $R1$, $R2$ - Resistências dos enrolamentos estatóricos e rotóricos.
- s - Deslizamento da máquina. $s = \frac{n_s - n}{n_s}$.
- n - Velocidade de rotação da máquina.
- n_s - Velocidade de sincronismo da máquina. $n_s = np \cdot \omega$.
- np - número de pares de pólos da máquina.
- ω - Frequência angular da tensão de alimentação.

Ao considerarmos este modelo, estamos a desprezar os efeitos da distribuição espacial dos vários componentes: circuitos magnéticos e enrolamentos eléctricos. No entanto, tal facto não introduz grandes discrepâncias nos resultados. Pode afirmar-se que a maior dificuldade e o que produz mais erros nas conclusões quantitativas, é a determinação dos valores exactos dos parâmetros do modelo.

A máquina em questão possui dois enrolamentos rotóricos e um rectificador a díodos para cada enrolamento. Se desprezarmos os efeitos dos harmónicos (do lado AC) provocados pela rectificação da corrente, os dois enrolamentos podem ser vistos como um único enrolamento montado em estrela.

Desta forma a indutância $L2$ e a resistência $R2$ são os valores vistos pelo estátor do equivalente em estrela dos dois enrolamentos rotóricos.

O fabricante da máquina forneceu os seguintes valores para o modelo da máquina:

Máquina: BF3 400 LA78 250KW 400V 50Hz

$f = 50\text{Hz}$, $\omega = 2\pi \cdot 50 \text{ rad/s}$,

$n_p=2$, $n_s = 750 \text{ rpm}$,

$V_1 = \frac{400}{\sqrt{3}} \text{ V}$,

$R_1 = 0.003\Omega$, $R_2 = 0.003\Omega$

$j\omega L_1 = 0.03\Omega$, $j\omega L_2 = 0.056\Omega$

$j\omega L_m = 0.75\Omega$, $R_0 = 32\Omega$

Estes dados foram obtidos a partir de um programa de cálculo utilizado pelo fabricante para prever o comportamento das máquinas. Naturalmente os resultados não são experimentalmente exactos, pelo que será necessário proceder aos ensaios convencionais (rótór travado e máquina em vazio) para a obtenção de valores mais exactos.

A exactidão dos valores não é muito crítica porque apenas se pretendem tirar conclusões qualitativas deste estudo, uma vez que o efeito da inexactidão dos resultados é reduzido com a sintonização dos controladores e eliminado com o uso de controladores realimentados.

3 Modelo do inversor e do filtro AC

O efeito de carga que o inversor provoca no barramento DC, é modelado com as seguintes aproximações:

- Desprezam-se os efeitos da variação na tensão V_{dc} devido à circulação de corrente nas resistências parasitas e no filtro AC.
- Considera-se a rede ideal: tensão e frequência constantes e independentes da potência absorvida ou fornecida.

- Considera-se o inversor de corrente ideal:
 - As comutações dão-se em tempo nulo.
 - Não existe sobreposição de condução.
 - Não existem tempos mínimos de condução e/ou corte.
- Despreza-se o efeito do ripple da tensão Vdc inerente ao funcionamento do inversor.

Com estas simplificações, o conjunto inversor - filtro é visto do lado DC como uma simples fonte de tensão contínua.

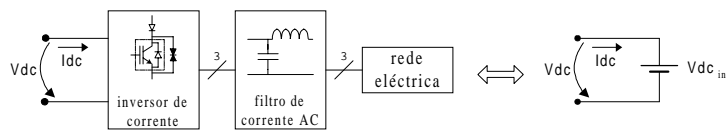


Figura 5.3 - Modelação do inversor do lado contínuo.

Do capítulo 4 tira-se que:

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_c \cdot im \cdot \cos(\theta) \quad (5.1)$$

onde V_c é a tensão composta da rede, im o índice de modulação e θ o esfasamento entre a corrente injectada na rede e a respectiva tensão.

Uma modelação mais completa e fiável pode ser obtida se contarmos com o efeito da subida da tensão Vdc com a corrente injectada Idc.

A variação de Vdc devido a Idc deve-se à impedância do filtro AC e à impedância de ligação à rede (principalmente a reactância de fugas do transformador).

Isto pode ser modelado através de uma resistência em serie com $V_{dc_{inv}}$. Esta resistência soma-se ao valor da resistência do filtro DC (R_f).

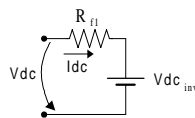


Figura 5.4 - Modelo mais completo do inversor do lado contínuo.

4 Modelo dos rectificadores e do filtro DC

O modelo do rectificador deve caracterizar as transformações da corrente e tensão do lado contínuo em relação ao lado alternado que está ligado ao rotor da máquina.

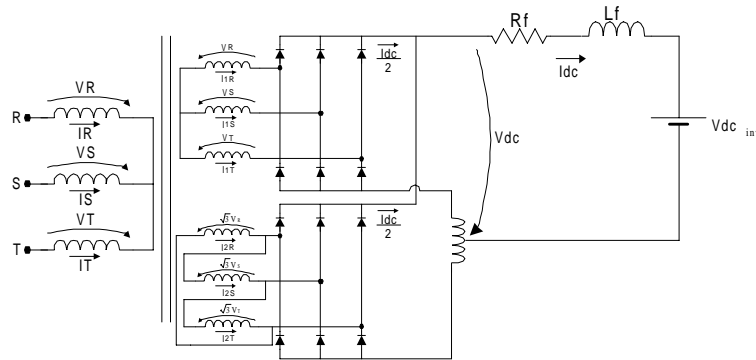


Figura 5.5 - Esquema do conjunto do paralelo dos rectificadores com o filtro DC.

Assumem-se algumas simplificações para construir o modelo do conjunto:

- A tensão e corrente do lado contínuo são perfeitamente constantes.
- A corrente que cada rectificador fornece é exactamente igual a metade da corrente DC total.
- As comutações dos díodos são ideais.
- As resistências distribuídas pelas ligações, díodos, indutâncias, etc, são representadas pelo equivalente na resistência R_f .
- Do lado AC desprezam-se os harmónicos, e considera-se que a componente fundamental da corrente está em fase com a tensão.

Em regime permanente a tensão V_{dc} é dada pela expressão:

$$V_{dc} = R_f \cdot I_{dc} + V_{dc_{inv}} \quad (5.2)$$

No capítulo 3 demonstrou-se que:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s \quad (5.3)$$

$$I_{dc} = \frac{\pi}{\sqrt{6}} I_e \quad (5.4)$$

onde V_s é a tensão simples e I_e é a corrente no enrolamento do lado alternado.

A seguir deduz-se o que cada fase do lado alternado vê nos rectificadores.

Das expressões (5.2) e (5.3) tira-se que:

$$V_{dc} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_s = R_f \cdot I_{dc} + V_{dc_{inv}}$$

$$V_s = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} R_f \cdot I_{dc} + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{dc_{inv}} \quad (5.5)$$

e da expressão (5.4) conclui-se que:

$$V_s = \frac{\pi^2}{18} R_f \cdot I_e + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{dc_{inv}} \quad (5.6)$$

Desta forma, do lado AC, o rectificador é visto como uma resistência em série com uma fonte de tensão. Como o número de espiras do enrolamento do estátor é igual ao número de espiras do enrolamento equivalente dos dois enrolamentos rotóricos, não é necessário efectuar mais transformações.

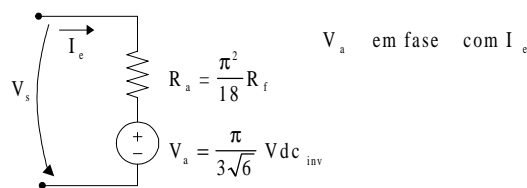


Figura 5.6 - Equivalente visto pelo lado AC dos rectificadores.

5 Modelo do SRED

O modelo do SRED é obtido juntando os modelos da máquina assíncrona e dos rectificadores conforme é indicado na Figura 5.7.

A tensão obtida aos terminais do rotor ($\sqrt{2}$) é composta pelo equivalente dos rectificadores:

$$V_2 = \frac{\pi^2}{18} R_f \cdot I_2 + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{dc_{inv}} \quad (5.7)$$

peço que a tensão referida ao estátor vale:

$$\frac{V_2}{s} = \frac{\pi^2 R_f}{18 s} \cdot I_2 + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} \frac{V_{dc_{inv}}}{s} \quad (5.8)$$

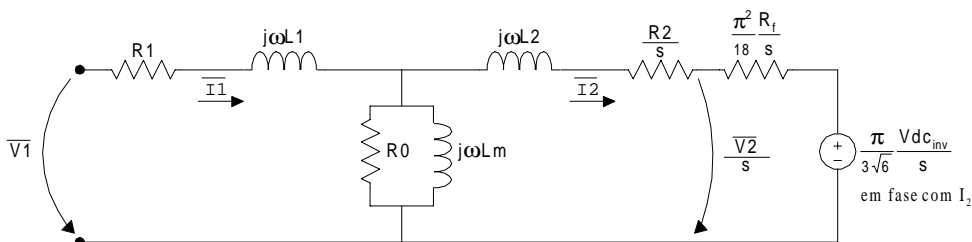


Figura 5.7 - Modelo do SRED.

5.1 Diagrama das potências em jogo no modelo

Na Figura 5.8 estão representadas as várias parcelas da potência em jogo do SRED representadas no modelo utilizado neste trabalho.

Utiliza-se a convenção motor, pelo que o sinal das potências mecânica (P_{mec}) e do estátor (P_1) são positivas no caso de funcionamento como motor, e negativas no funcionamento como gerador. Naturalmente as potências de perdas (P_{p1} e P_{p2}) e potência entregue à rede pelos conversores (P_{conv}) são sempre positivas.

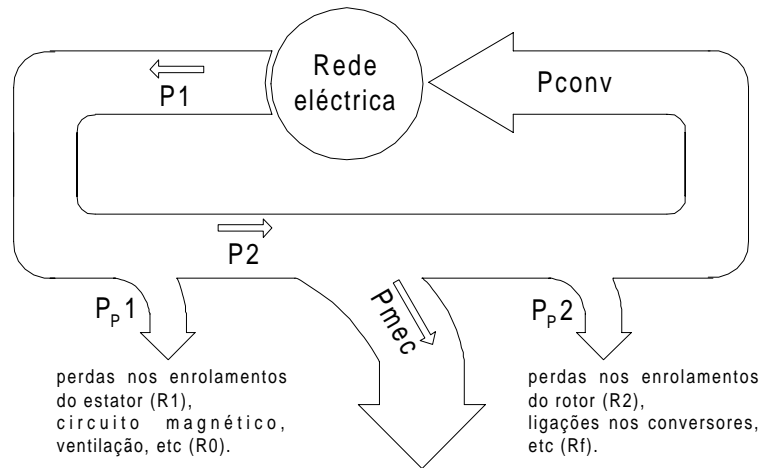


Figura 5.8 - Diagrama das potências em jogo no modelo do SRED.

5.2 Potência transferida do estátor para o rotor (P_2)

A potência que atravessa o circuito magnético da máquina é dada pelas seguintes expressões (convenção motor):

$$P_2 = 3 \frac{1}{s} \left[\left(R_2 + \frac{\pi^2}{18} R_f \right) I_2^2 + \frac{\pi}{3\sqrt{6}} V_{DC} I_2 \right] \quad (5.9)$$

$$P_2 = \frac{1}{s} \left[\left(\frac{18}{\pi^2} R_2 + R_f \right) I_{DC}^2 + V_{DC} I_{DC} \right] \quad (5.10)$$

A potência P_2 reparte-se por 3 parcelas:

- perdas nos enrolamentos do rotor e nos conversores:

$$P_{p2} = \left(\frac{18}{\pi^2} R_2 + R_f \right) I_{DC}^2 \quad (5.11)$$

- potência mecânica:

$$P_{mec} = \frac{1-s}{s} \left[\left(\frac{18}{\pi^2} R_2 + R_f \right) I_{DC}^2 + V_{DC} I_{DC} \right] \quad (5.12)$$

- potência entregue à rede pelos conversores:

$$P_{conv} = V_{DC} I_{DC} \quad (5.13)$$

5.3 Binário electromagnético

O binário é dado pela potência mecânica (P_{mec}) e pela velocidade de rotação da máquina (n):

$$T = \frac{P_{mec}}{n} = \frac{1}{n} \frac{1-s}{s} \left[\left(\frac{18}{\pi^2} R_2 + R_f \right) I_{DC}^2 + V_{DC} I_{DC} \right] \quad (5.14)$$

$$T = \frac{np}{\omega} \frac{1}{s} \left[\left(\frac{18}{\pi^2} R_2 + R_f \right) I_{DC}^2 + V_{DC} I_{DC} \right] \quad (5.15)$$

onde np é o número de pares de pólos da máquina e ω é a frequência angular da rede eléctrica.

Se a máquina não estiver a rodar perto da velocidade de sincronismo (onde V_{dc} é muito baixo), e as resistências do rotor e dos conversores forem baixas (as máquinas de grande potência geralmente têm um R_2 muito baixo), o binário é aproximado por:

$$T = \frac{np}{\omega} \frac{1}{s} V_{DC} I_{DC} \quad (5.16)$$

Se tomarmos em conta que a tensão V_{DC} gerada pelo inversor não pode ser muito diferente da tensão gerada pelo rectificador de forma a que o sistema seja estável e a corrente I_{dc} não suba demasiado (ou se anule):

$$V_{DC_{rect}} = \left| s \right| \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ESTATOR} \quad (5.17)$$

o binário assume a simples expressão:

$$T = \frac{np}{\omega} \frac{3\sqrt{6}}{\pi} V_{ESTATOR} I_{DC} \text{ sinal}(s) \quad (5.18)$$

Por outras palavras, o binário depende principalmente da corrente que circula no barramento DC.

6 Características do SRED com imposição da tensão no barramento DC

Se o inversor de corrente funcionar com um determinado índice de modulação e uma determinada fase, a tensão no barramento DC (V_{dc}) fica definida.

A partir do modelo da Figura 5.7 e considerando que o inversor de corrente impõe a tensão V_{dc} obtêm-se as características do SRED em malha aberta (sem controladores).

6.1 Análise do sistema a partir do modelo

Para se obterem os valores das várias grandezas do modelo em função de V_{dc} , foi desenvolvido um programa de cálculo em Matlab.

Em primeiro lugar é necessário tornar o modelo num circuito mais simples e maleável. Para tal, é necessário obter o equivalente Thevenin da componente do estátor e de magnetização conforme é indicado na Figura 5.9.

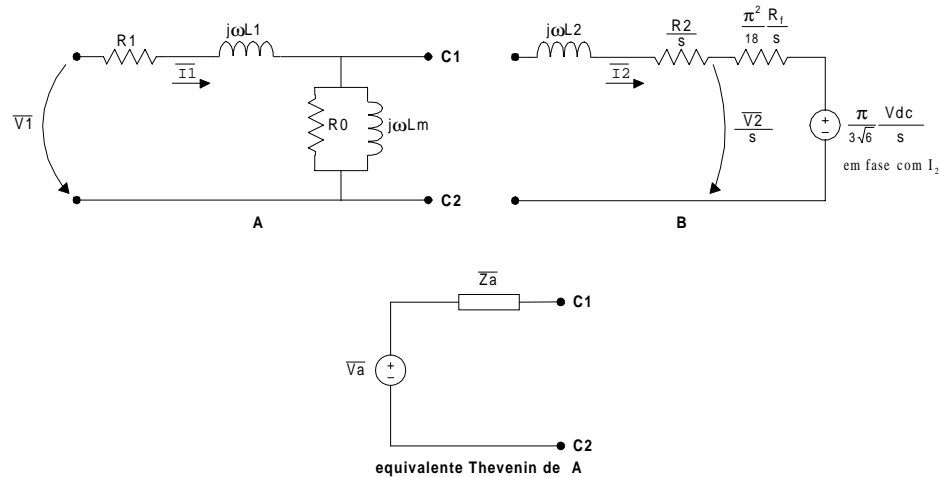


Figura 5.9 - Separação do modelo em dois circuitos e equivalente *Thevenin* do circuito A.

Os valores do equivalente Thevenin são dados por:

$$\bar{V}_a = \frac{(R_0 // j\omega L_m)}{(R_1 + j\omega L_1) + (R_0 // j\omega L_m)} \bar{V}_1 \quad (5.19)$$

$$\bar{Z}_a = R_0 // j\omega L_m // (R_1 + j\omega L_1) \quad (5.20)$$

Juntando o equivalente do circuito A ao resto do modelo, obtêm-se um circuito do qual já é possível extrair o módulo da corrente \bar{I}_2 .

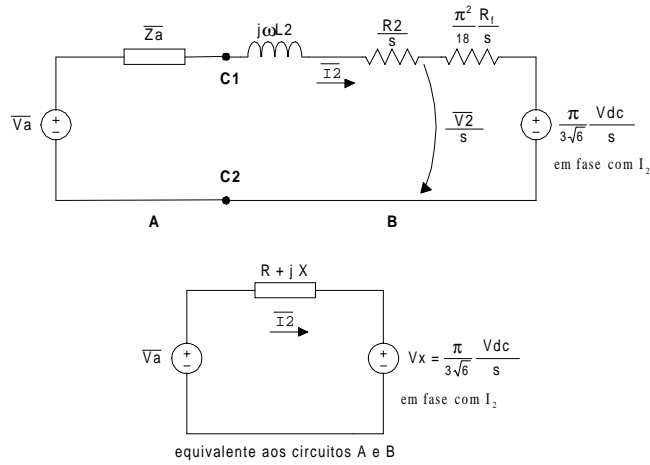


Figura 5.10 - Esquema eléctrico mais simples do modelo do SRED.

Os valores R , X e V_x são dados por:

$$R = \frac{R_2}{s} + \frac{\pi^2}{18} \frac{R_f}{s} + \text{Real}(\overline{Z_a}) \quad (5.21)$$

$$X = \omega L_2 + \text{Imag}(\overline{Z_a}) \quad (5.22)$$

$$\overline{V_x} = \frac{\pi}{3\sqrt{6}} \frac{V_{dc}}{s} e^{j \text{angle}(\overline{I_2})} \quad (5.23)$$

Deve reparar-se que o cálculo de $\overline{I_2}$ não é imediato, uma vez que a fase de $\overline{V_x}$ é igual à fase de $\overline{I_2}$ que não se conhece.

Desta forma, é necessário calcular primeiro o módulo de $\overline{I_2}$ (I_2), calculando a sua fase posteriormente.

O módulo de $\overline{V_a}$ é dado pela seguinte expressão:

$$V_a = \sqrt{(I_2 \cdot R + V_x)^2 + (I_2 \cdot X)^2} \quad (5.24)$$

cuja solução positiva em relação a I_2 é:

$$I_2 = \frac{-R \cdot V_x^2 + \sqrt{R^2 \cdot V_a^2 + X^2 \cdot (V_a^2 - V_x^2)}}{R^2 + X^2} \quad (5.25)$$

A expressão anterior apenas é válida se o módulo de $\overline{V_a}$ for superior ao módulo de $\overline{V_x}$. Se esta condição não se verificar, significa que a tensão no barramento DC gerada pelo inversor é superior à tensão gerada pelos rectificadores do rotor. Isto levaria a uma inversão da corrente no barramento DC, o que não é permitido nem pelos rectificadores nem pelo inversor. Assim se $|\overline{V_x}| > |\overline{V_a}|$ a corrente $\overline{I_2}$ vale zero.

A fase de $\overline{I_2}$ (obviamente apenas se $|\overline{I_2}| \neq 0$) é calculada através da mudança do referencial de fases para $\overline{I_2}$.

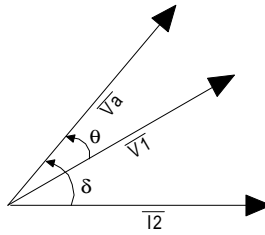


Figura 5.11 - Fasores com a origem em $\overline{I_2}$

Desta forma o valor de $\overline{V_a}$ é dado por:

$$\overline{V_a} = (R \cdot \overline{I_2} + V_x) + j(X \cdot \overline{I_2}) \quad (5.26)$$

cuja fase indica o esfasamento entre $\overline{V_a}$ e $\overline{I_2}$ e é dada por:

$$\text{ang}(\overline{V_a}) = \delta = \text{arctg}\left(\frac{X \cdot \overline{I_2}}{R \cdot \overline{I_2} + V_x}\right) \quad (5.27)$$

Mudando novamente o referencial de fase para $\overline{V_1}$ obtemos o valor de $\overline{I_2}$:

$$\begin{aligned} \overline{V_1} &= V_1 \\ \overline{V_a} &= V_a \cdot e^{j\theta} \\ \overline{I_2} &= \overline{I_2} \cdot e^{j(\theta-\delta)} \end{aligned} \quad (5.28)$$

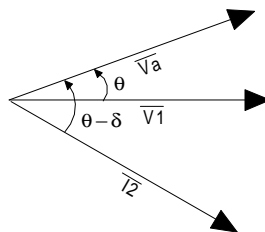


Figura 5.12 - Fasores com a origem na tensão da rede $\overline{V_1}$

A partir do conhecimento do valor de $\overline{I_2}$, os restantes valores do modelo (correntes de magnetização, corrente do estator, potências, etc) são de cálculo evidente.

6.2 Características de funcionamento com imposição da tensão no barramento DC

As características de funcionamento do SRED sem controladores obtidas por simulação do sistema estão indicadas nas figuras seguintes.

Foram usados os parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante, e atribuiu-se a R_f $10m\Omega$.

Para gerar os gráficos foram utilizados 5 níveis de tensão gerada pelo inversor: 0, 100, 200, 300 e 400V identificadas nos gráficos por 0, 1, 2, 3, e 4 respectivamente.

A máquina está alimentada com uma tensão na rede de 380V.

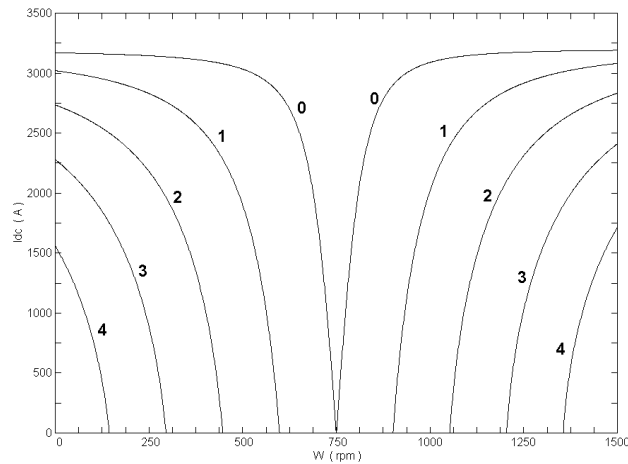


Figura 5.13 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de Vdc.

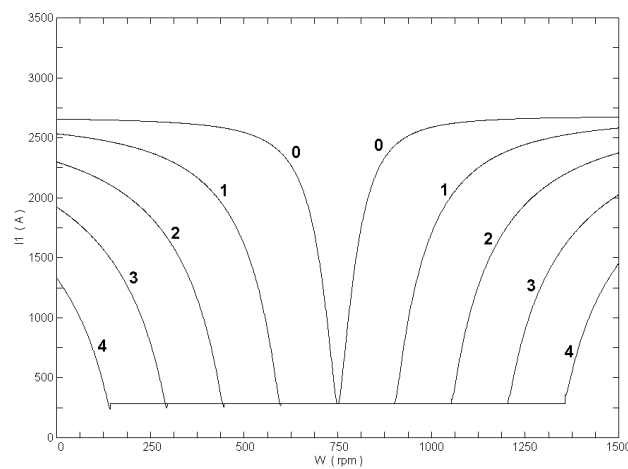


Figura 5.14 - Andamento da corrente no estator em função da velocidade para vários valores de Vdc.

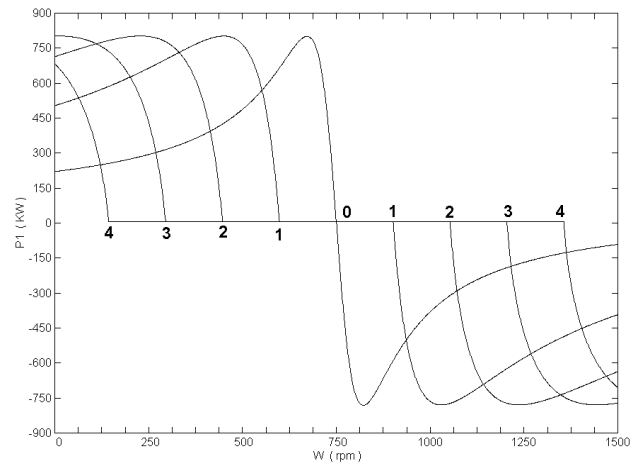


Figura 5.15 - Andamento da potência absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

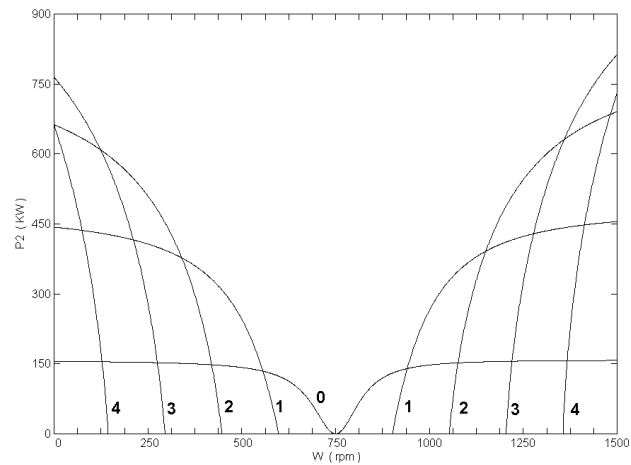


Figura 5.16 - Andamento da potência transferida do estator para o rotor em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

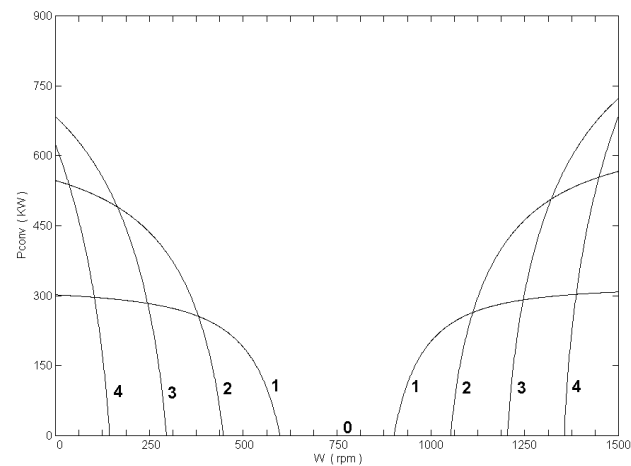


Figura 5.17 - Andamento da potência entregue à rede pelos conversores em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

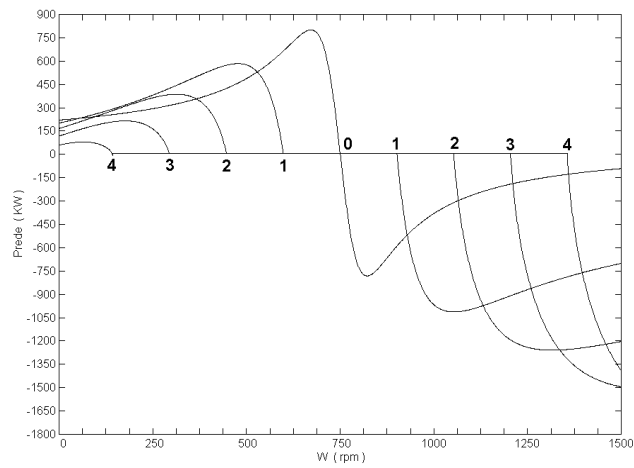


Figura 5.18 - Andamento da potência total retirada à rede em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

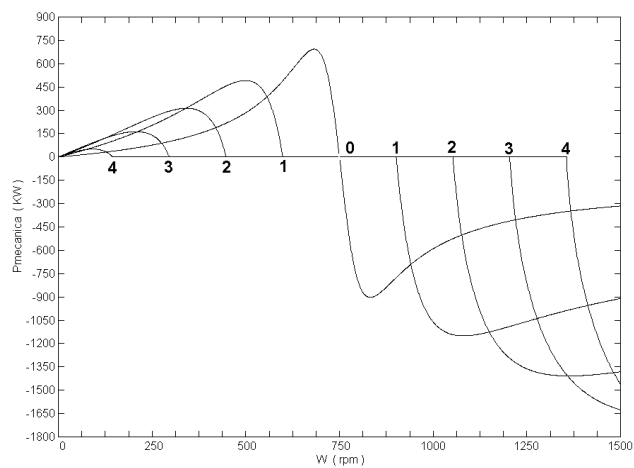


Figura 5.19 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

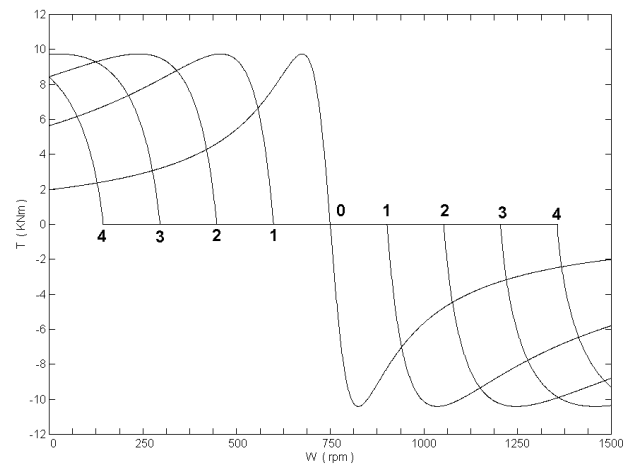


Figura 5.20 - Andamento do binário electromagnético em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

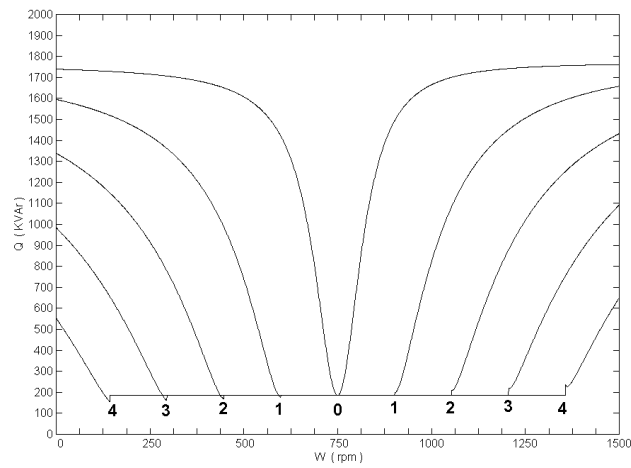


Figura 5.21 - Andamento do potência reactiva absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

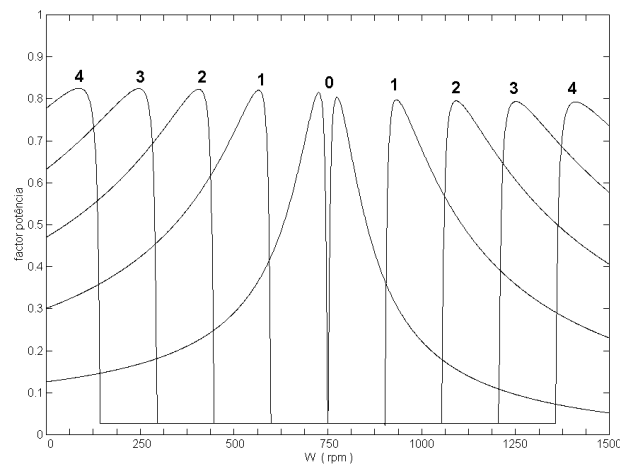


Figura 5.22 - Andamento do factor de potência do estator em função da velocidade para vários valores de V_{dc} .

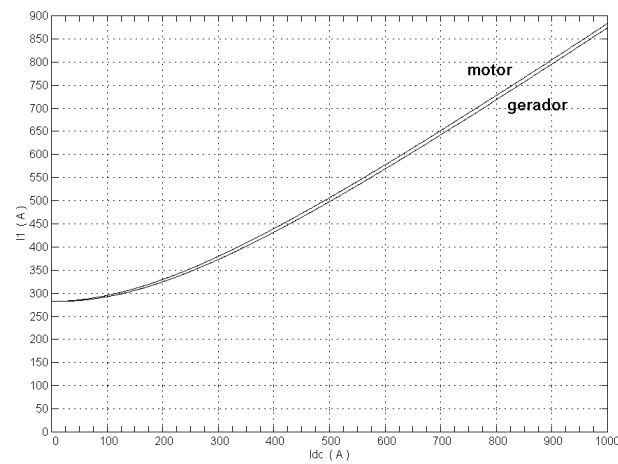


Figura 5.23 - Andamento da corrente do estator em função da corrente no barramento DC.

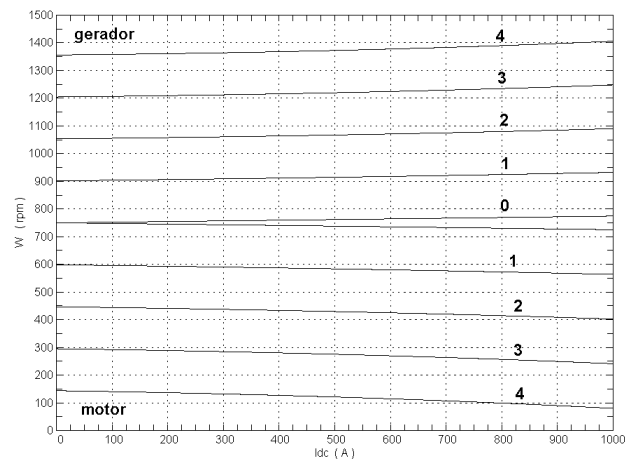


Figura 5.24 - Andamento da velocidade em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc} .

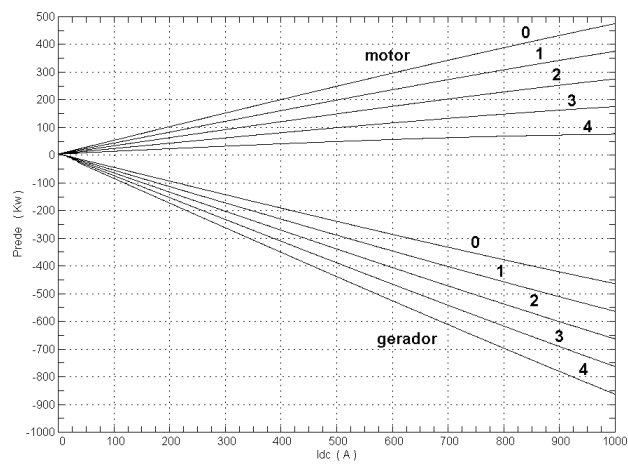


Figura 5.25 - Andamento da potência total retirada à rede em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc} .

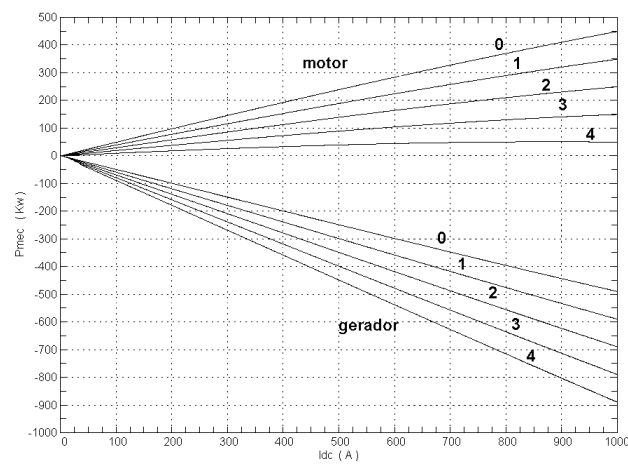


Figura 5.26 - Andamento da potência mecânica em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc} .

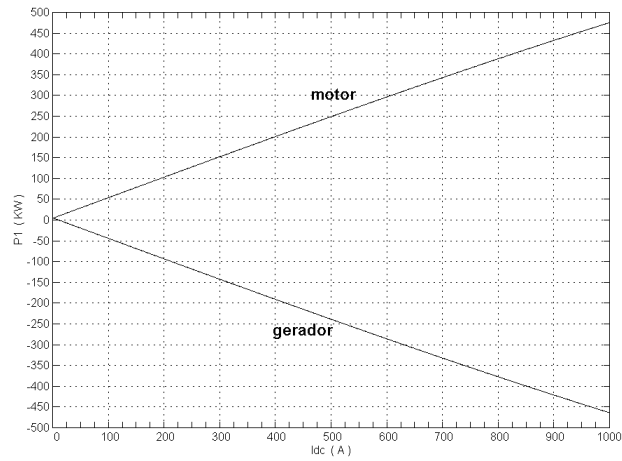


Figura 5.27 - Andamento da potência absorvida pelo estátor em função da corrente no barramento DC para vários valores de V_{dc} .

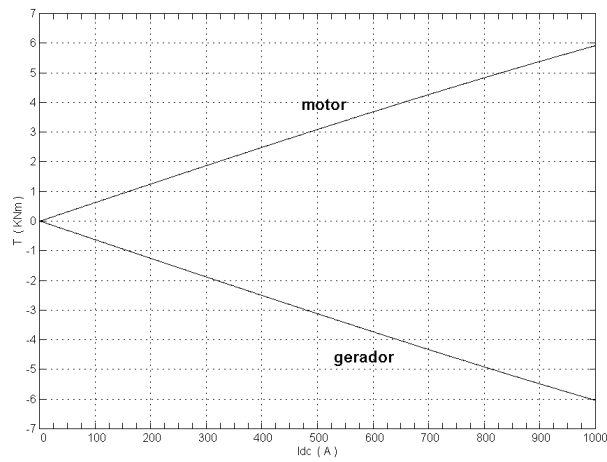


Figura 5.28 - Andamento do binário em função da corrente no barramento DC.

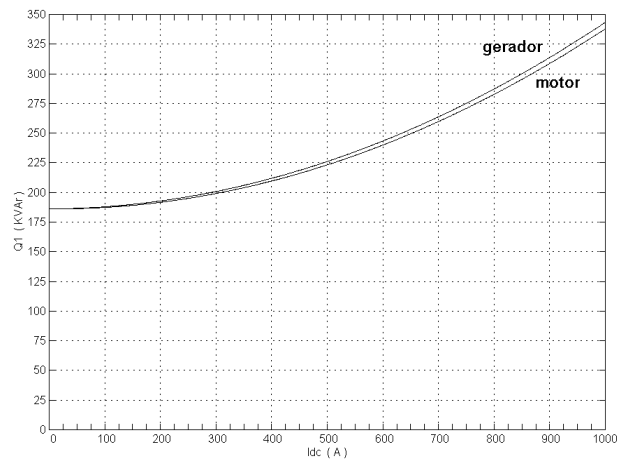


Figura 5.29 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estátor em função da corrente no barramento DC.

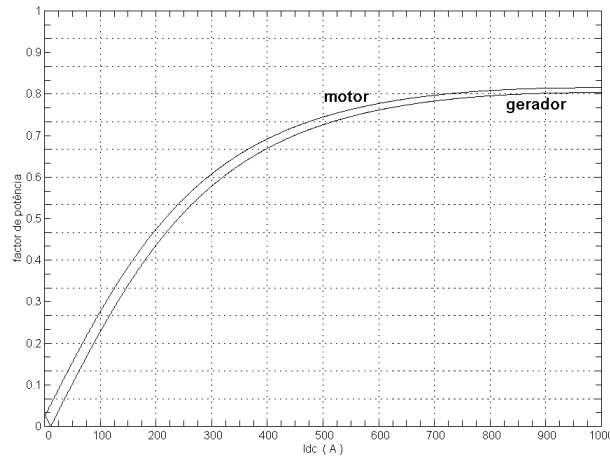


Figura 5.30 - Andamento do factor de potência do estátor em função da corrente no barramento DC para vários valores de Vdc.

6.2.1 Conclusões

De uma forma geral, as características da máquina com controlo de Vdc, são curvas iguais à curva da máquina assíncrona com o rotor em curto circuito (sem SRED) transladadas em deslizamento. O valor de translação em deslizamento vale $K \cdot V_{dc}$ na situação motor e $-K \cdot V_{dc}$ na situação gerador.

Para máquinas de grande potência onde a resistência rotórica é baixa, a velocidade de rotação é dada pela expressão:

$$\begin{aligned} W_{\text{motor}} &= W_{\text{sinc}} (1 - K \cdot V_{dc}) \\ W_{\text{gerador}} &= W_{\text{sinc}} (1 + K \cdot V_{dc}) \end{aligned} \quad (5.29)$$

consoante o modo motor ou gerador.

A regulação da velocidade com a potência debitada (efeito de carga) é tanto menor quanto menor for a resistência rotórica e a resistência equivalente dos filtros.

Para valores admissíveis de Idc (0..500A), as potências: mecânica, absorvida pelo estátor e total, e o binário variam quase linearmente com Idc.

A potência reactiva consumida pelo estátor é dada pela soma de uma constante (magnetização da máquina) e por uma componente que varia quase de forma quadrática com Idc (nas indutâncias de fugas). O consumo de reactiva por parte do estátor é ligeiramente superior no caso gerador do que no caso motor.

O SRED é uma boa forma de se controlar a velocidade de rotação da máquina assíncrona quer no funcionamento como motor quer como gerador.

Como o binário varia quase linearmente com a corrente Idc, o seu controlo torna-se relativamente simples.

7 Características do SRED com imposição da corrente no barramento DC

É muito fácil implementar um controlador que imponha a corrente que circula no barramento DC através da actuação na tensão gerada pelo inversor. Naturalmente esta actuação é feita com base no índice de modulação e/ou na fase do inversor de corrente.

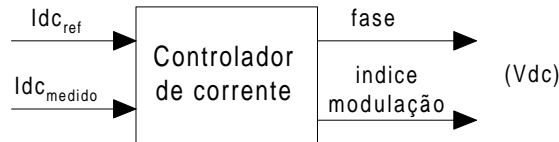


Figura 5.31 - Controlador de corrente no barramento DC.

O controlo da corrente do barramento I_{dc} , permite manter as grandezas do conjunto máquina assíncrona - conversores dentro dos limites de segurança.

A tensão V_{dc} que o inversor consegue gerar está limitada entre $0V$ e $V_{dc_{max}}$.

A limitação inferior a $0V$ prende-se com o funcionamento dos rectificadores. Se a tensão for negativa, dá-se um *free-wheeling* nos díodos dos rectificadores, levando a corrente I_{dc} a subir sem que a corrente I_2 no rotor a acompanhe (A relação $I_{dc} = K |I_2|$ deixa de ser válida). Naturalmente, neste caso, a tensão que os terminais do rotor vêm nos rectificadores é sempre $0V$.

A limitação superior a $V_{dc_{max}}$ é imposta pela tensão da rede e pelos limites do índice de modulação e da fase do inversor de corrente:

$$V_{dc} = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot V_c \cdot i_m \cdot \cos(\theta) \quad (5.30)$$

A tensão da rede é de $380V$ pelo que nas melhores condições ($\theta=0^\circ$ e $i_m=1$) a tensão V_{dc} atinge $465V$.

Deve ser notado que a tensão da rede é igual para a ligação do inversor e para a alimentação do estator. Desta forma se a tensão da rede variar, o efeito da limitação de V_{dc} permanece exactamente igual. No caso de uma subida de tensão da rede, $V_{dc_{max}}$ é aumentado, aumentando também a tensão gerada pelo rotor, pelo que a diferença permanece praticamente igual.

7.1 Análise do sistema a partir do modelo

Para manter a corrente no barramento DC no valor $I_{dc_{ref}}$ o controlador comanda a tensão gerada pelo inversor (V_{dc}).

Desta forma, para se traçarem as curvas características do SRED com imposição da corrente I_{dc} , é necessário obter para cada ponto de funcionamento, a tensão V_{dc} que impõe a respectiva corrente $I_{dc_{ref}}$.

Depois de se obter a tensão V_{dc} requerida, usa-se o programa de cálculo descrito na secção 6.1 para se obterem as várias grandezas do modelo.

Para determinar V_{dc} , o modelo é simplificado da mesma forma que na secção 6.1 obtendo-se o modelo simplificado da Figura 5.10 que aqui se repete na Figura 5.32.

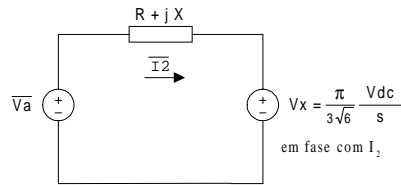


Figura 5.32 - Modelo simplificado do SRED.

Do modelo dos rectificadores tira-se:

$$I_2 = \frac{\sqrt{6}}{\pi} I_{dc} \quad (5.31)$$

O módulo de \bar{V}_a é dado pela expressão:

$$V_a = \sqrt{(I_2 \cdot R + V_x)^2 + (I_2 \cdot X)^2} \quad (5.32)$$

cujas soluções em relação a V_x são:

$$V_x = -I_2 R \pm \sqrt{V_a^2 - (I_2 X)^2} \quad (5.33)$$

pelo que as soluções de V_{dc} são:

$$\begin{aligned} V_{dc_1} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} s \left(-I_2 R + \sqrt{V_a^2 - (I_2 X)^2} \right) \\ V_{dc_2} &= \frac{3\sqrt{6}}{\pi} s \left(-I_2 R - \sqrt{V_a^2 - (I_2 X)^2} \right) \end{aligned} \quad (5.34)$$

Atendendo a que V_{dc} não pode ser inferior a zero a solução final é dada pelo maior valor entre 0, V_{dc_1} e V_{dc_2} .

Se a tensão V_{dc} estiver limitada superiormente por motivos de funcionamento do inversor, obviamente o valor V_{dc} é dado por:

$$V_{dc} = \min \left[V_{dc_{\max}} ; \max \left(0 ; V_{dc_1} ; V_{dc_2} \right) \right] \quad (5.35)$$

7.2 Características de funcionamento sem limitação de Vdc

Adoptou-se os parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante e atribui-se a R_f $40\text{m}\Omega$. Aumentou-se o valor de R_f usado na secção 6.2 de $10\text{ m}\Omega$ para $40\text{m}\Omega$ para se visualizar melhor o comportamento do SRED nas velocidades perto da de sincronismo.

Para gerar os gráficos foram usados 5 níveis de corrente de referência: 100, 200, 300, 400 e 500.

A máquina está alimentada com uma tensão na rede de 380V.

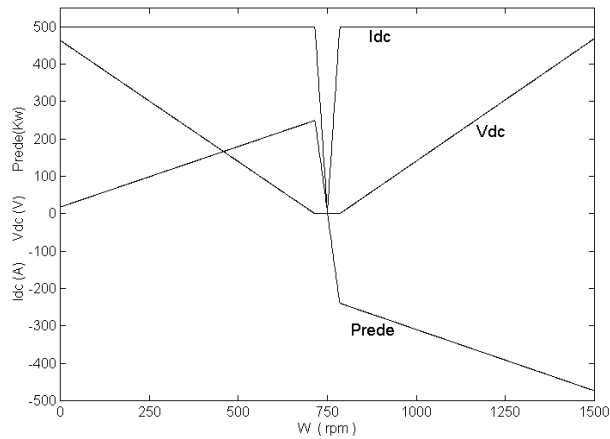


Figura 5.33 - Andamento de varias grandezas em função da velocidade para $I_{dc_{ref}}=500\text{A}$.

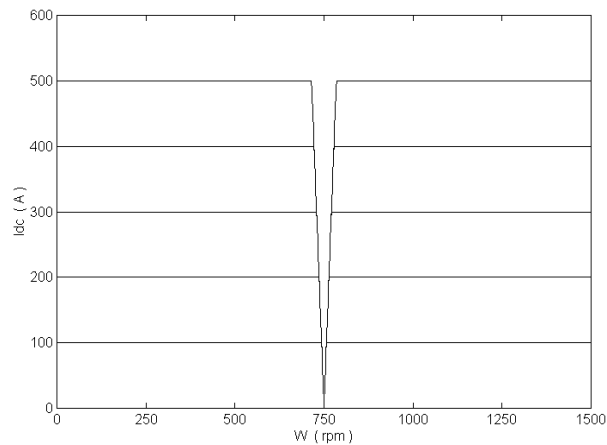


Figura 5.34 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

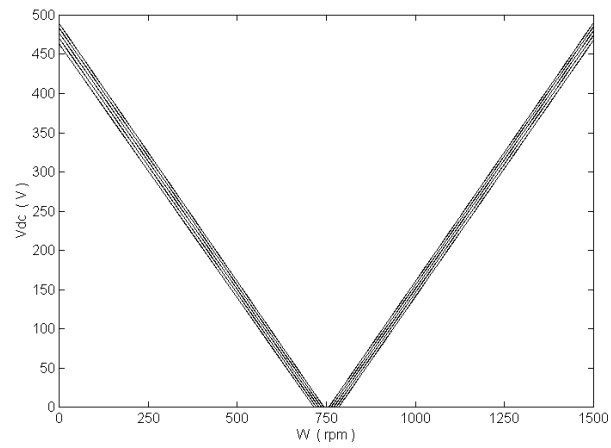


Figura 5.35 - Andamento da tensão no barramento DC em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

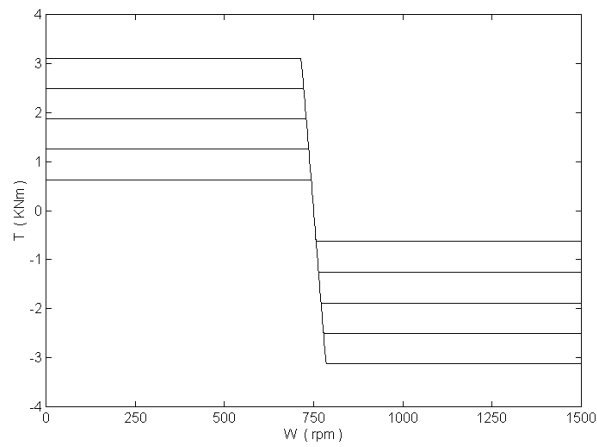


Figura 5.36 - Andamento do binário em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

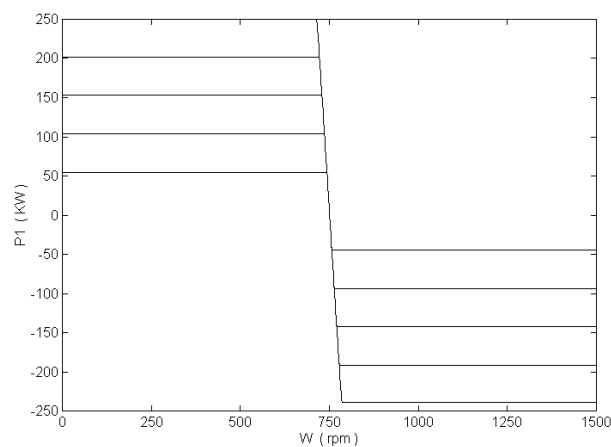


Figura 5.37 - Andamento da potência absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

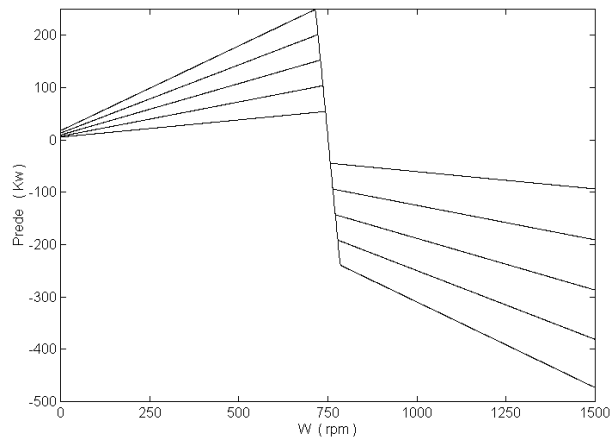


Figura 5.38 - Andamento da potência total absorvida à rede em função da velocidade para vários valores de I_{dc_ref} .

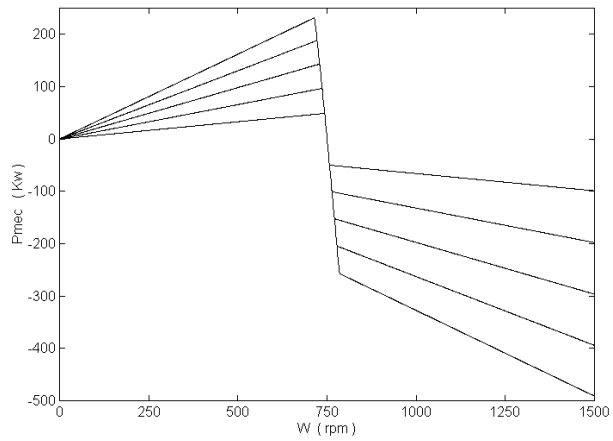


Figura 5.39 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de I_{dc_ref} .

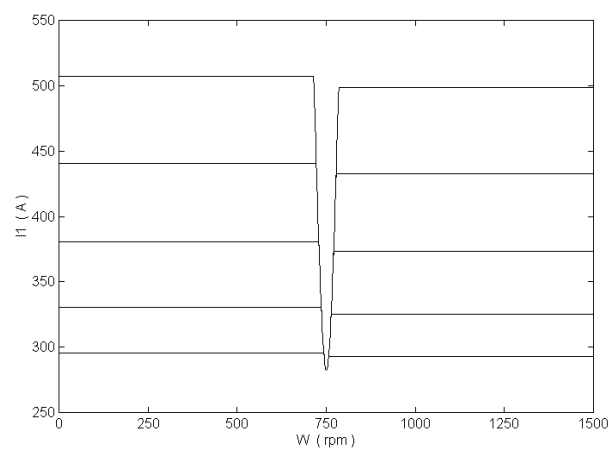


Figura 5.40 - Andamento da corrente absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de I_{dc_ref} .

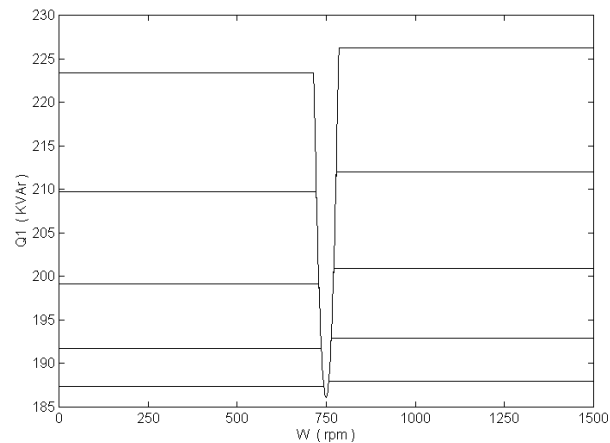


Figura 5.41 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de $I_{dc,ref}$.

7.2.1 Conclusões

Com o controlo da corrente I_{dc} , o SRED adquire características lineares.

O binário é independente da velocidade de rotação e as potências proporcionais a I_{dc} e à velocidade de rotação.

A única excepção é perto do sincronismo, onde a máquina adquire as características de uma máquina de rotor em curto circuito. Isto deve-se à impossibilidade de manter a corrente no seu valor de referência, uma vez que a tensão induzida no rotor não é suficiente para que a corrente se mantenha, mesmo que o inversor coloque em V_{dc} uma tensão nula.

A transição das características lineares, para a característica de rotor em curto circuito, dá-se quando a tensão V_{dc} atinge o valor zero.

Para manter as características lineares na zona de sincronismo, era necessário que o conjunto rectificador-inversor permitisse que a tensão V_{dc} no barramento DC fosse negativa.

7.3 Características de funcionamento com limitação de V_{dc}

Foram usados os parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante e atribui-se a R_f $40m\Omega$.

Para gerar os gráficos foram usados 5 níveis de corrente de referência: 100, 200, 300, 400 e 500.

A máquina está alimentada com uma tensão na rede de 380V.

Admite-se que a tensão máxima que o inversor pode gerar é de 460V.

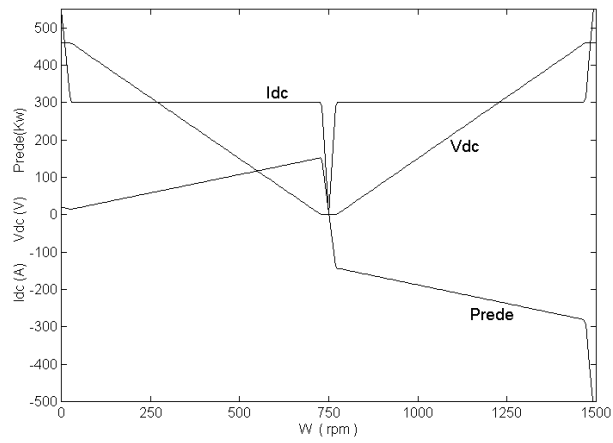


Figura 5.42 - Andamento de varias grandezas em função da velocidade para $Idc_{ref}=300A$.

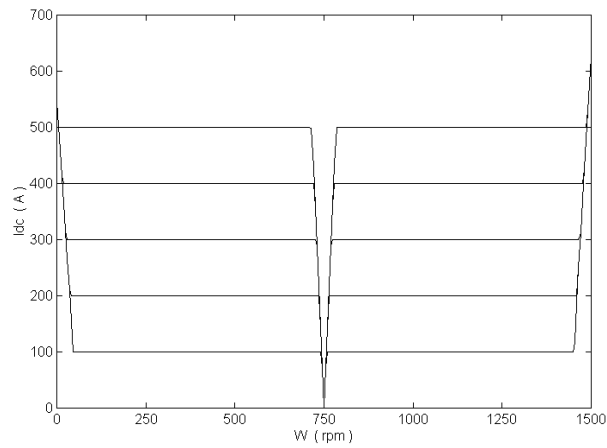


Figura 5.43 - Andamento da corrente no barramento DC em função da velocidade para vários valores de Idc_{ref} .

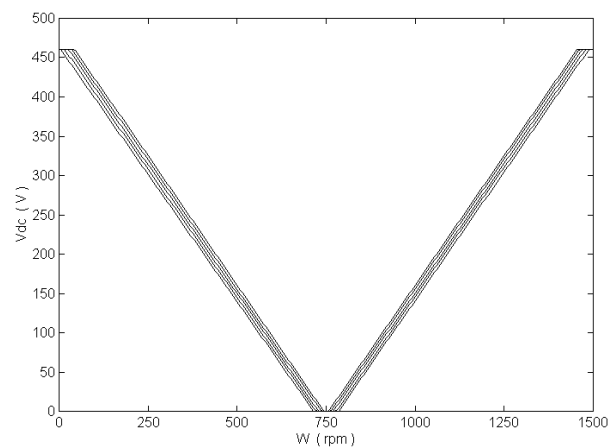


Figura 5.44 - Andamento da tensão no barramento DC em função da velocidade para vários valores de Idc_{ref} .

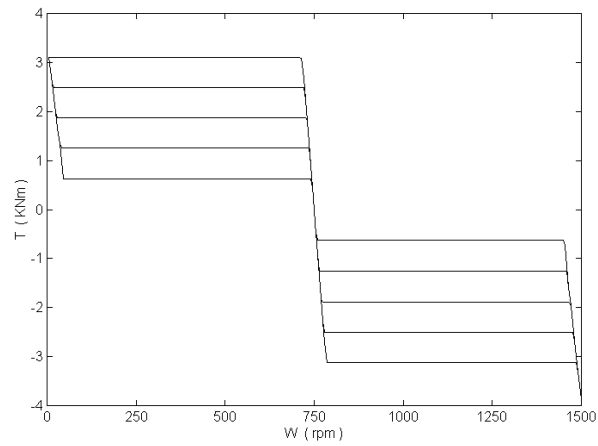


Figura 5.45 - Andamento do binário em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

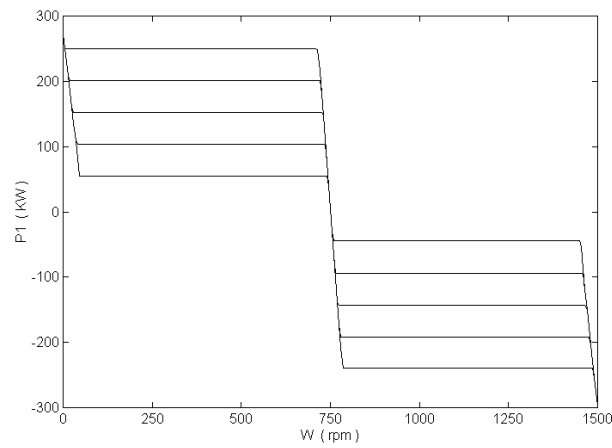


Figura 5.46 - Andamento da potência absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

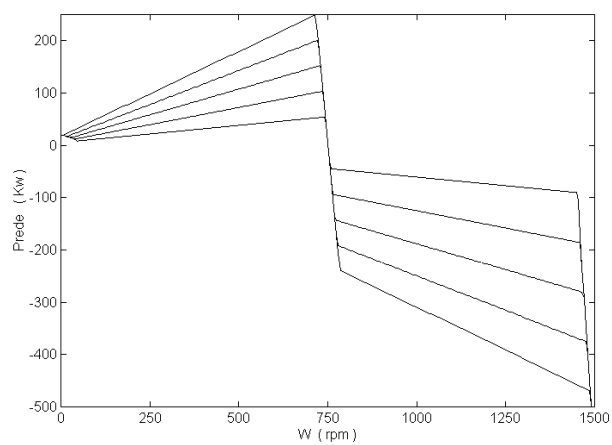


Figura 5.47 - Andamento da potência total absorvida à rede em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

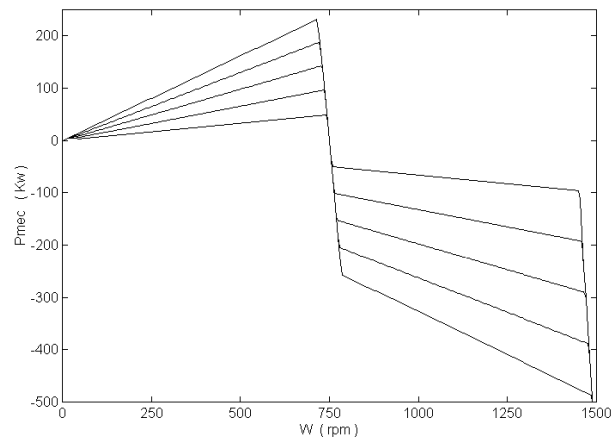


Figura 5.48 - Andamento da potência mecânica em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

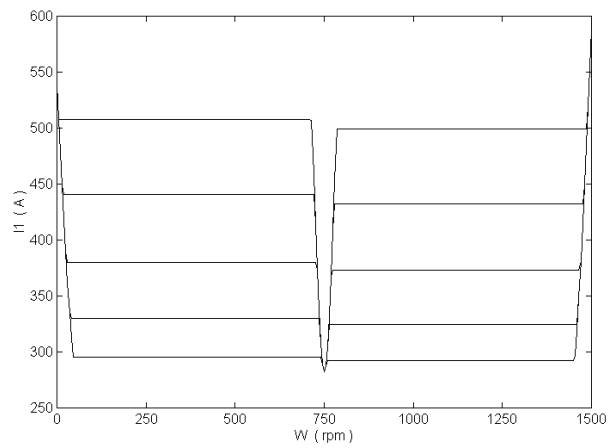


Figura 5.49 - Andamento da corrente absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

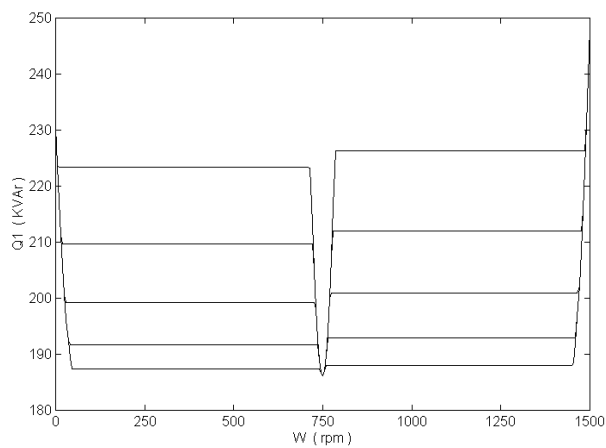


Figura 5.50 - Andamento da potência reactiva absorvida pelo estator em função da velocidade para vários valores de $I_{dc_{ref}}$.

7.3.1 Conclusões

Se a tensão V_{dc} gerada pelo inversor estiver limitada superiormente, o SRED adquire características não lineares a velocidades perto do zero e perto de 2 vezes a de sincronismo.

Isto acontece porque a essas velocidades a tensão gerada pelo rotor é demasiado alta, levando a corrente a subir sem controlo através de V_{dc} (V_{dc} é mantido no seu valor máximo).

Assim, conclui-se que a falta de controlo sobre I_{dc} nestas zonas pode levar a que I_{dc} ultrapasse os limites de segurança.

8 Arranque da máquina assíncrona

Se o arranque for efectuado através dos conversores e sem o auxílio de resistências de arranque, é necessário que a máxima tensão gerada pelo inversor seja suficiente para limitar a corrente de arranque.

Como se viu na secção 7.3.1 quando a tensão V_{dc} está limitada superiormente, as grandezas do SRED deixam de estar controladas durante o arranque.

Na Figura 5.51 representa-se a corrente de arranque do SRED utilizado, onde $V_{dc_{max}}$ vale 460V, em função da resistência equivalente dos filtros AC e DC e impedância de ligação à rede.

Naturalmente o valor de I_{dc} depende fortemente dos parâmetros da máquina assíncrona, pelo que o arranque da máquina durante os primeiros ensaios deve ser feito com uma resistência auxiliar em serie no barramento DC, de forma a que se possa estimar a corrente que é originada sem o uso da respectiva resistência.

Se a corrente for demasiado grande é necessário recorrer a uma resistência de arranque que depois será retirada de serviço por contactores ou por electrónica.

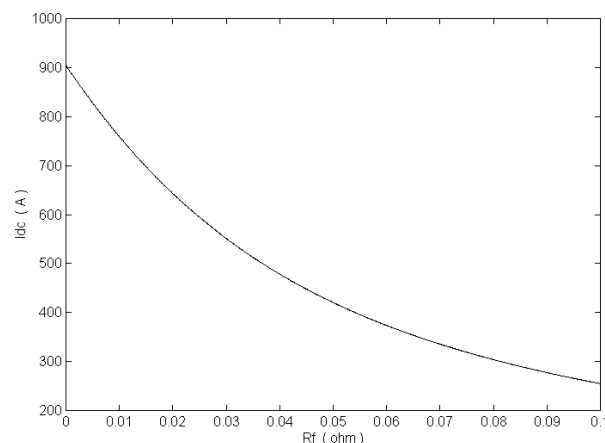


Figura 5.51 - Corrente no barramento DC no arranque da máquina em função da resistência equivalente dos filtros AC e DC e impedância de ligação à rede (Valores estimados com base nos parâmetros da máquina fornecidos pelo fabricante).

9 Gama de funcionamento como gerador

Uma das razões que levou à escolha do SRED para gerador do sistema de recuperação de energia das ondas marítimas foi a necessidade do uso de um gerador que permitisse fornecer uma determinada potência sem imposições de velocidade (com velocidade variável) de modo a otimizar o recurso energético.

Para um correcto funcionamento do SRED a corrente I_{dc} deve ser limitada a:

$$100A < I_{dc} < 500A .$$

A limitação inferior prende-se com o nível do conteúdo harmónico introduzido pelo estátor na rede devido ao funcionamento dos rectificadores.

O facto do inversor não poder gerar uma tensão superior a 460V leva a uma limitação nas velocidades perto de 2 vezes a de sincronismo.

Os gráficos das próximas figuras foram traçados com os parâmetros do modelo fornecidos pelo fabricante e com uma resistência equivalente do filtro de 40mΩ.

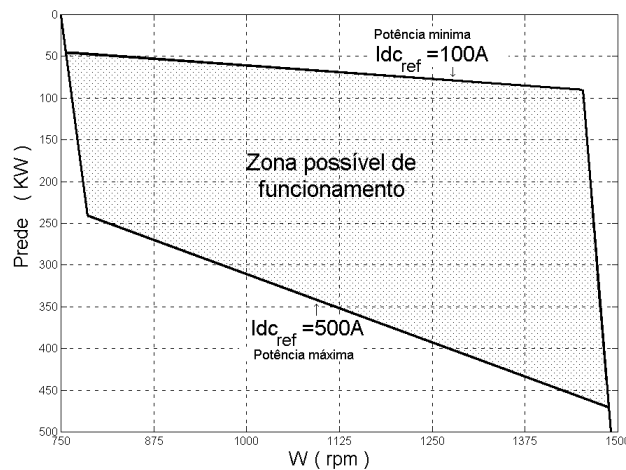


Figura 5.52 - Limites da potência que o SRED pode fornecer à rede em função da velocidade.

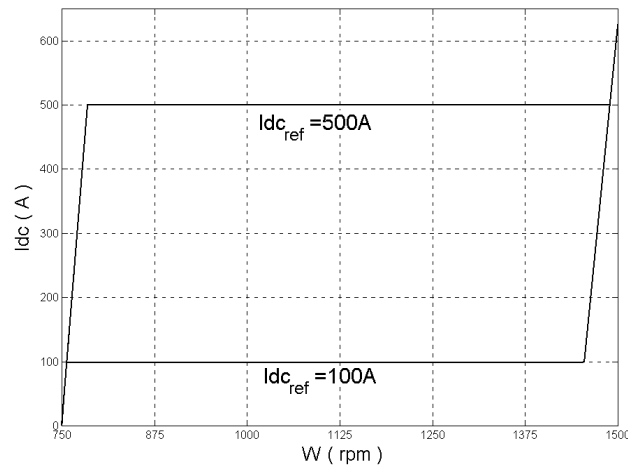


Figura 5.53 - Curvas limite de Idc para os limites da potência que o SRED pode fornecer à rede em função da velocidade.

A zona de funcionamento possível é bastante “larga” o que permite uma gama considerável de potências possíveis para cada velocidade.

Desta forma confirma-se que o SRED é um bom gerador para as energias alternativas.

Devido às limitações inferior e superior de Vdc, para velocidades perto da velocidade de sincronismo e perto de 2 vezes a velocidade de sincronismo, deixa de haver controlo e a potência passa a ser função unívoca da velocidade.

Na situação de alta velocidade é necessário ter cuidado porque a corrente Idc pode passar os limites de segurança.

Na situação de baixa velocidade a corrente Idc desce abaixo dos 100A, o que leva o SRED a funcionar em más condições.

Assim deve-se evitar o funcionamento abaixo de 760rpm (50KW) e acima de 1480rpm (470KW). Deve ser notado que estes valores limite dependem fortemente da resistência rotórica e da resistência equivalente dos filtros, pelo que o seu conhecimento é de extrema importância para se dimensionar as zonas de alarme.