

MANUAL DE UTILIZAÇÃO DE PROGRAMA DE SIMULAÇÃO DINÂMICA (Estabilidade)

Observação inicial: As barras devem ser numeradas em seqüência a partir de 1(Um) começando pelas barras geradoras.

Format dos dados de entrada

1 - Título (80 A1)

Obs. Todos os demais dados são no format I10 ou F10.5 a não ser que sejam especificados.

2 - Dimensões do Sistema

- NB - Numero de barras
- NG - Numero de geradores
- NL - Numero de linhas
- NX - Numero de transformadores
- NC - Numero de capacitores
- NQ - Numero de equivalentes dinâmicos
- NCE - Numero de compensadores estáticos
- BASE - Base do sistema em MVA se diferente de 100

3 - Dados de defeito

KEY - Tipo de defeito

- 0 - Regime permanente
- 1 - Curto trifásico com linha removida
- 2 - Rejeição de carga
- 3 - Curto trifásico sem remoção de linha
- 4 - Abertura de condutor
- 5 - Distúrbios para fins de identificação de modelo equivalente dinâmico

- LF - Linha defeituosa
- JK - Barra defeituosa
- JKK - O outro terminal da linha defeituosa
- FD - Distância do defeito à barra defeituosa (Sem uso, deixar em branco)
- TCL1 - Primeiro tempo para eliminação do defeito
- TCL2 - Segundo tempo para eliminação do defeito

OBS.: Quando KEY = 5, as variáveis acima (do 2º cartão) têm o seguinte significado:

- LF - 0 (Zero)

- JK - Barra para variação na tensão terminal
- JKK =
- 1 para variação na parte real da tensão
- 2 para variação na parte imaginária da tensão
- 3 para variação no módulo da tensão
- 4 para variação na potência mecânica
- 0 para regime permanente
- FD - 0 (zero)
- TCL1 - Duração da variação
- TCL2 - Porcentagem da variação

04 - Dados de tempos (em segundos)

- TS - Início da simulação
- DT1 - Primeiro intervalo de integração
- DP1 - Primeiro intervalo de impressão
- DPL1 - Primeiro intervalo de plotagem
- TIF1 - Tempo para mudança de DT1 para DT2
- DT2 - Segundo intervalo de integração
- DP2 - Segundo intervalo de impressão
- DPL2 - Segundo intervalo de plotagem
- TIF2 - Final da simulação

05 - Dados da linha para religamento monopolar (Em % da base do sistema) (Apenas quando K EY=4)

- I - Barra início da linha
- J - Barra fim da linha
- R - Resistência serie
- X - Reatância serie

06 - Dados de barra

- J - Número da barra
- P - Carga ativa em MW
- Q - Carga reativa em MVar
- VM - Módulo da tensão da barra
- VA - Ângulo da tensão da barra
- G - Indicador de rejeição de carga (0 = carga rejeitada, 1 = carga)
- PCZ - Porcentagem da carga representada por impedância constante (PCZ = 1 corresponde a 100%) (PCZ = 0 corresponde a 100 de corrente constante). Em barras com geradores DFIG, PCZ = 0.
- PP - Geração ativa em MW
- QQ - Geração reativa em MVar
- SPEV 1 Variação na tensão terminal por 0.08s para fins de testes com pequenas perturbações (SPEV = 0.9 significa uma variação de 10%)

- KCES 1 se a barra tem compensador estático
- CKEY 1 se a barra tem controlador ótimo
- PC2 - Potência ativa fornecida pelo conversor do lado da rede em geradores DFIG. Qualquer valor positivo. O balanço de potência será feito internamente.
- QC2 - Potência reativa fornecida pelo conversor do lado da rede em geradores DFIG. Valor zero significa operação com fator de potência unitário.

Se barra tem compensador estático, segue os seguintes dados adicionais.

- YZERO - Potência líquida inicial do compensador estático em MVar
- YBASE - Potência base do reator do compensador estático
- YCAP - Potência do capacitor do compensador estático em MVar
- RCOMP - De acordo com o diagrama de blocos da figura 6.
- GKRC
- GMRC
- TMRC
- CPRC
- CNRC
- TFRC
- YRCMA
- YRCMI

07 - Dados de linha (Em % da base do sistema)

- LL - Numero da linha
- II - Barra de inicio da linha
- JJ - barra de fim da linha
- IMP - Impedância serie complexa
- YP - Admitância shunt total complexa (MVA)

08 - Dados de transformadores (Em % da base do sistema)

- LL - Numero do transformador
- II - Barra de inicio do transformador
- JJ - Barra de fim do transformador
- IMP - Impedância serie equivalente
- YP - Relação de transformação (complexa)

09 - Dados de capacitores (indutor) (Em MVar)

- LL - Numero do capacitor
- II - número da barra
- YP - Admitancia complexa

10 - Dados de máquina (Em % dos seus nominais), governador, controlador ótimo e excitatriz (repetir para todas as barras)

- BUS - Numero da máquina
SNOM - Potência nominal da máquina
TYPE - Tipo da maquina (0,1,2,3)
0 - Tensão constante atras da reatância transitória
1 - Modelo de 3ª ordem
2 - Modelo de 3ª ordem sem regulador
3 - Modelo de 6ª ordem
4 - Modelo de 4ª ordem
5 - Gerador de indução de 4ª ordem (Gaiola)
6 - Gerador de indução de 4ª ordem (DFIG) Dupla alimentação.
- R - Resistência da armadura (R_s para gerador de indução)
XPD - x'_d ou (x_s para os geradores de indução, gaiola ou DFIG)
XQF - x_q ou (x_r para os geradores de indução, gaiola ou DFIG)
XD - x_d ou (x_m para o geradores de indução, gaiola ou DFIG)
H - Constante de Inercia
DAMP - Constante de amortecimento
FMW - Porcentagem da potência ativa
FMV - Porcentagem da potência reativa
TPDO - T'_{d0} (R_r para geradores de indução, gaiola ou DFIG)
XP - Reatância de Potier
Ax - Constante de saturação
Bx - Constante de saturação
- GKEY - Tipo do regulador de velocidade (-1, -2, -3, -4, -5, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6 e 7)
-1 Simula uma rajada de vento com curva $P_m \times v_w$
-2 Cálculo de P_m através da curva $P_m \times v_w$
-3 Cálculo de P_m através da curva $C_p(\lambda, \theta)$
-4 Pico triangular na velocidade do vento Curva $P_m \times v_w$
-5 Pico triangular na velocidade do vento Cálculo de P_m através da Curva $C_p(\lambda, \theta)$
-6 Degrau na velocidade do vento Curva $P_m \times v_w$
-7 Degrau na velocidade do vento Cálculo de P_m através da Curva $C_p(\lambda, \theta)$
0 Sem turbina e sem regulador de velocidade
1, 2, 3, 4, 5 (de acordo com os diagramas de blocos)
6 Cálculo de P_m através da curva $C_p(\lambda, \theta)$ com controle do ângulo das pás da turbina.

7 Pico triangular na velocidade do vento Cálculo de P_m através da Curva $C_p(\lambda, \theta)$ com controle do ângulo das pás da turbina.

8 Degrau na velocidade do vento Cálculo de P_m através da Curva $C_p(\lambda, \theta)$ com controle do ângulo das pás da turbina.

Para o gerador do tipo 3 segue os seguintes dados adicionais em uma linha adicional:

TPQO	-	T'_{q0}
XPQ	-	x'_q
TPPD	-	T''_{d0}
TPPQ	-	T''_{q0}
XPPD	-	x''_d
XL	-	Reatância de dispersão

Dados do Governador (quando existir), Constantes e ganhos de acordo com o diagrama de blocos das figuras 7 a 15. (Quando não houver a constante ou ganho, deixar o valor em branco)

PMI	-	Potência mecânica (MW) ou (número de turbinas eólicas em paralelo).
PNOM	-	Potência nominal (MW) ou (velocidade do vento em turbinas eólicas).
TTp	-	T_p
TTg	-	T_g
TTr	-	T_r
DLT	-	r
TTAL	-	τ
TTw	-	T_w
LMIN	-	LMIN
LMAX	-	LMAX
TTY	-	T_y
TT0	-	T_0
TT1	-	T_1
TT2	-	T_2
TT3	-	T_3
TT4	-	T_4
XK1	-	XK1
XK2	-	XK2
AT	-	A_t
GGMIN	-	Gmin
GGMAX	-	Gmax

Dados de controle ótimo (Quando houver)

K11 –
K12 –
K13 –

Dados da excitação

KEY - Tipo do excitador (1,2,3,4,5,6,7 e 8)
KA - Ganho do amplificador
TA - Constante de tempo do Amplificador
VMAX - Limite superior
VMIN - Limite inferior
KE - Ganho da excitação
TE - Constante de tempo da excitação
AS - Constante de saturação (Potência ativa de referência para o DFIG)
BS - Constante de saturação (Potência reativa de referência para o DFIG)
MUS - Ganho de realimentação
TSE - Constante de tempo de realimentação
KQ2 - Ganho do lead-lag
TQ - Constante do wash-out
T1 - Constante de tempo
T2 - Constante de tempo
TLD1 - Constante de tempo do lead-lag
TLD2 - Constante de tempo do lead-lag
TLG1 - Sinal estabilizador derivado de $0 = \delta$, $1 = P_t$
TSEN - Constante de tempo de medição da tensão
STQ - Constante de wash-out para o controlador ótimo
TM1 - Constante de tempo
TM2 - Constante de tempo
TM3 - Constante de tempo
TM4 - Constante de tempo
XVMAX - Limite superior
XVMIN - Limite inferior
YVMAX - Limite superior
YVMIN - Limite inferior

11 - Dados gerais do modelo equivalente dinâmico

QB - Numero da barra
NQS - Numero de estados do modelo
QVO - Tensão inicial (Real e imaginária)
QI0 - Corrente inicial (Real e imaginária)

12 - Matrizes do modelo equivalente dinâmico (Variáveis de estado)

- QMA - Dimensão NQS X NQS (Matriz A contínua equivalente) A_{ij}
- QMB - Dimensão NQS X 1 (Matriz B contínua equivalente) $B_{1i} + jB_{2i}$
- QMC - Dimensão 1 X NQS (Matriz C equivalente) $C_{1i} + jC_{2i}$
- QMD - Dimensão 1 X 1 ($D_{11} - jD_{12}$)

Diagramas de blocos

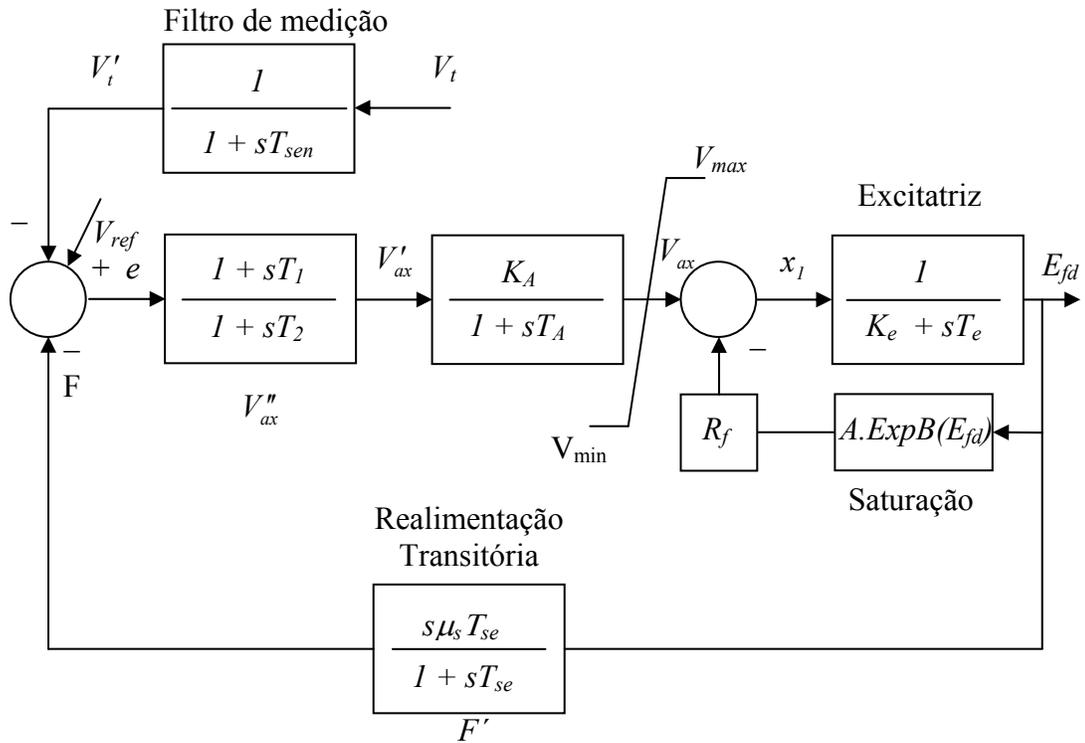


Figura 1 Regulador de tensão tipo 1 Diagrama de blocos do modelo do regulador de tensão com excitatriz rotativa.

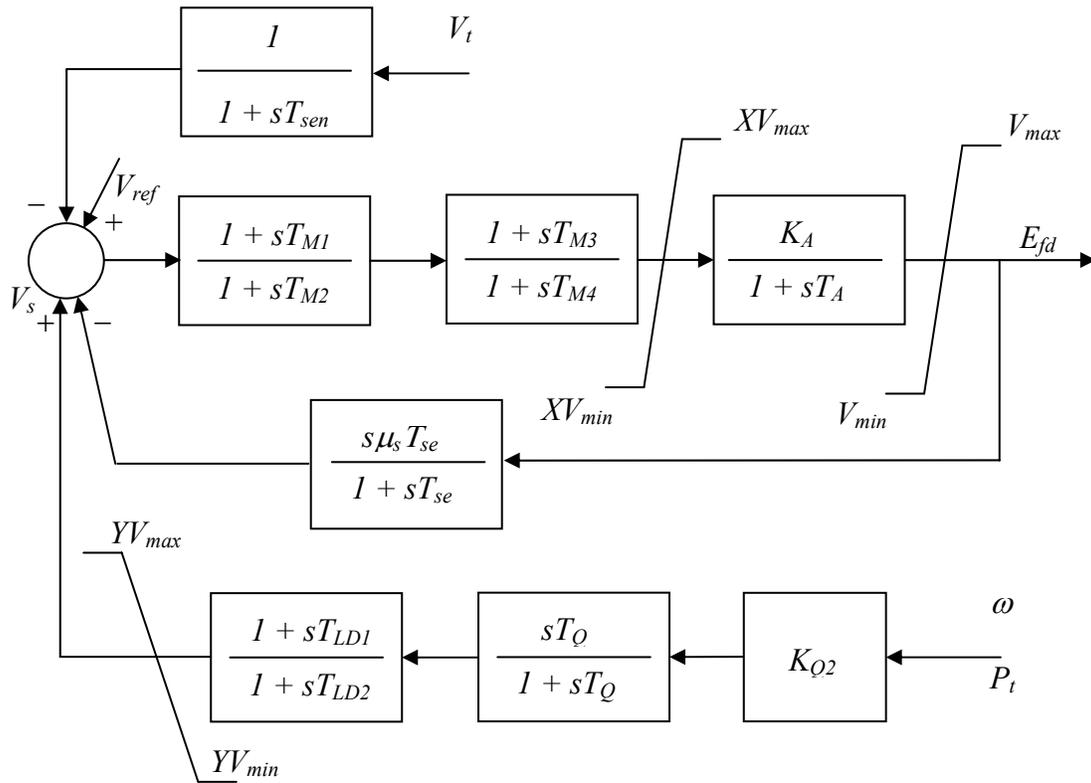
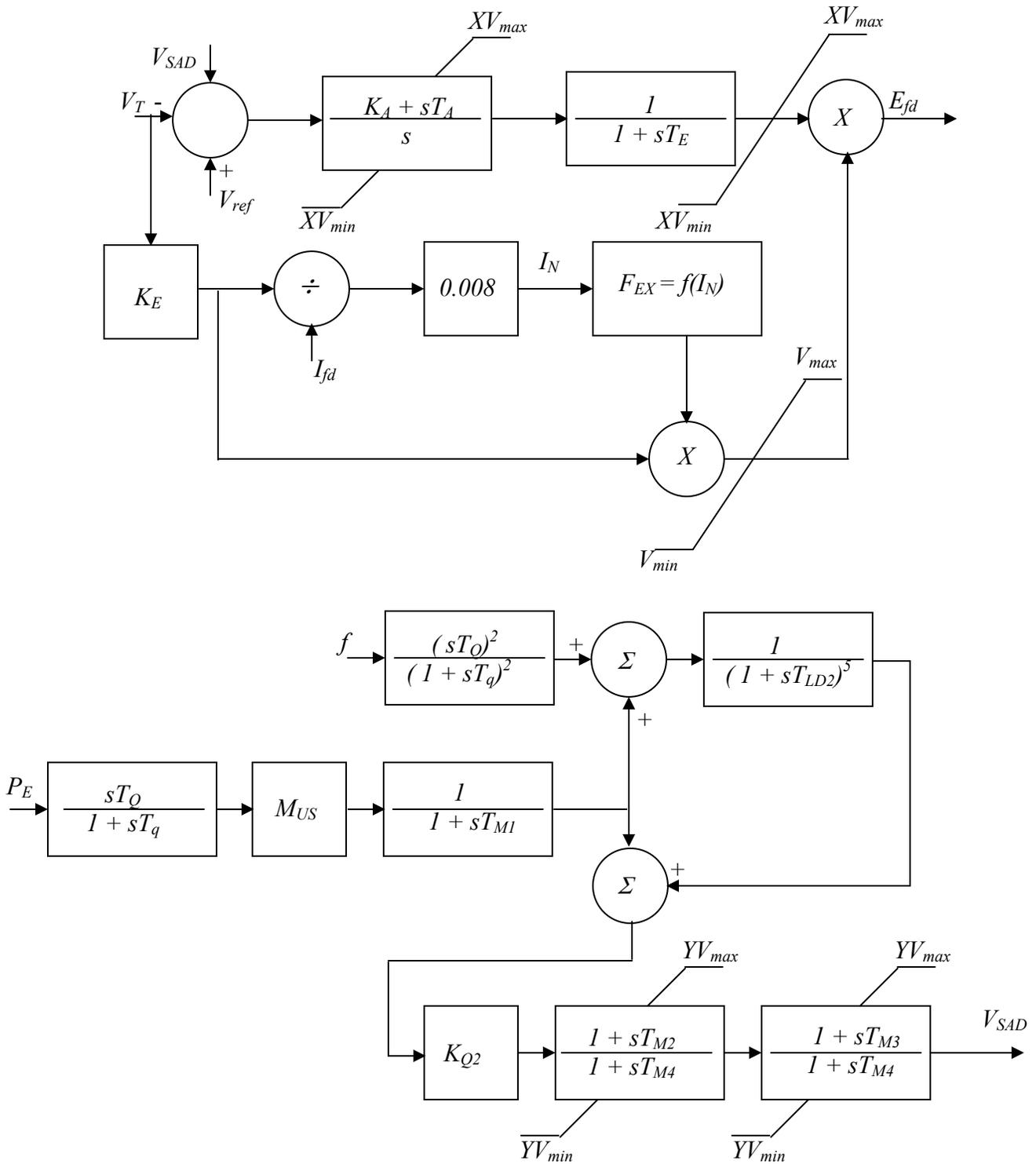


Figura 2 Regulador de tensão tipo 4 Diagrama de blocos do modelo do regulador de tensão com excitatriz estática.



$$\begin{aligned}
 I_N < 0.433 & \quad \rightarrow f(I_N) = 1 - 0.577I_N \\
 0.433 \leq I_N < 0.75 & \quad \rightarrow f(I_N) = \sqrt{0.73 - I_N^2} \\
 I_N \geq 0.75 & \quad \rightarrow f(I_N) = 1.732 - 1.732I_N
 \end{aligned}$$

Figura 3 Regulador de tensão tipo 2 (Térmicas da Termopernambuco)

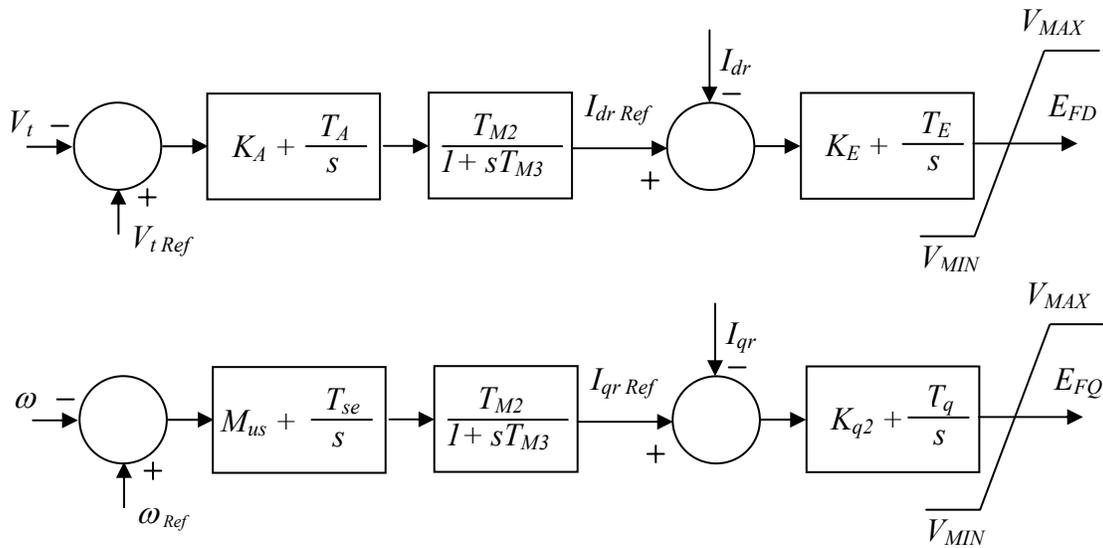


Figura 4 **Regulador de tensão tipo 7** Diagrama de blocos do modelo de controle independente da tensão/velocidade de um gerador de indução com dupla alimentação DFIG.

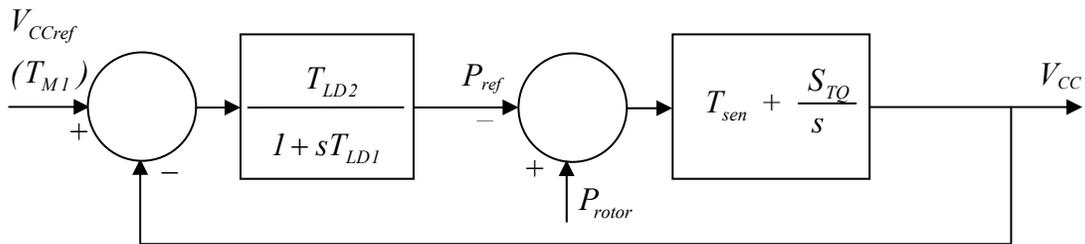


Figura 5 **Regulador de tensão tipo 8** - Controle da tensão Vcc adicionado ao tipo 7 ou **tipo 3** - Controle da tensão Vcc adicionado ao tipo 5.

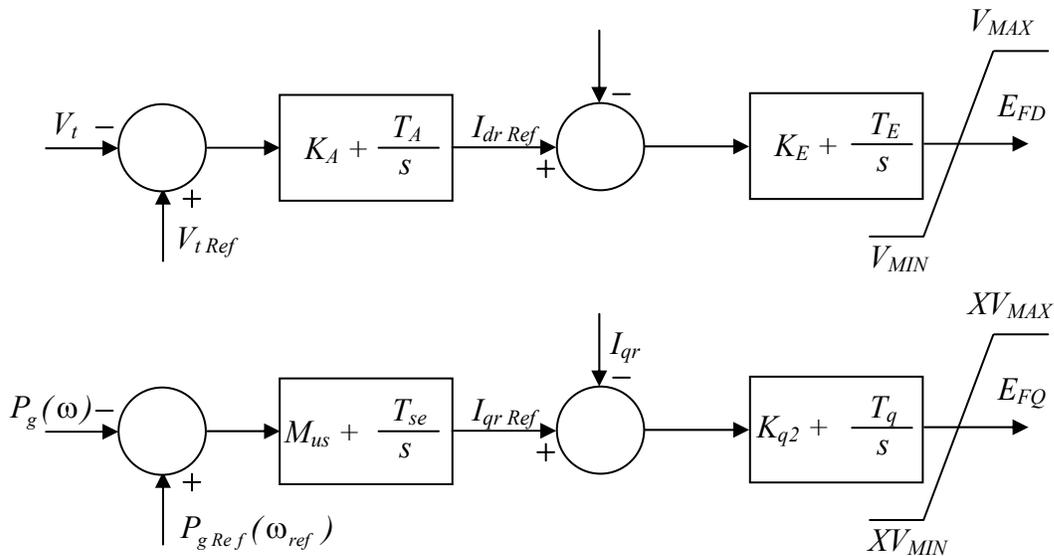


Figura 5 **Regulador de tensão tipo 9** Controle de tensão/potência, **tipo 5** Controle de tensão/velocidade para o DFIG.

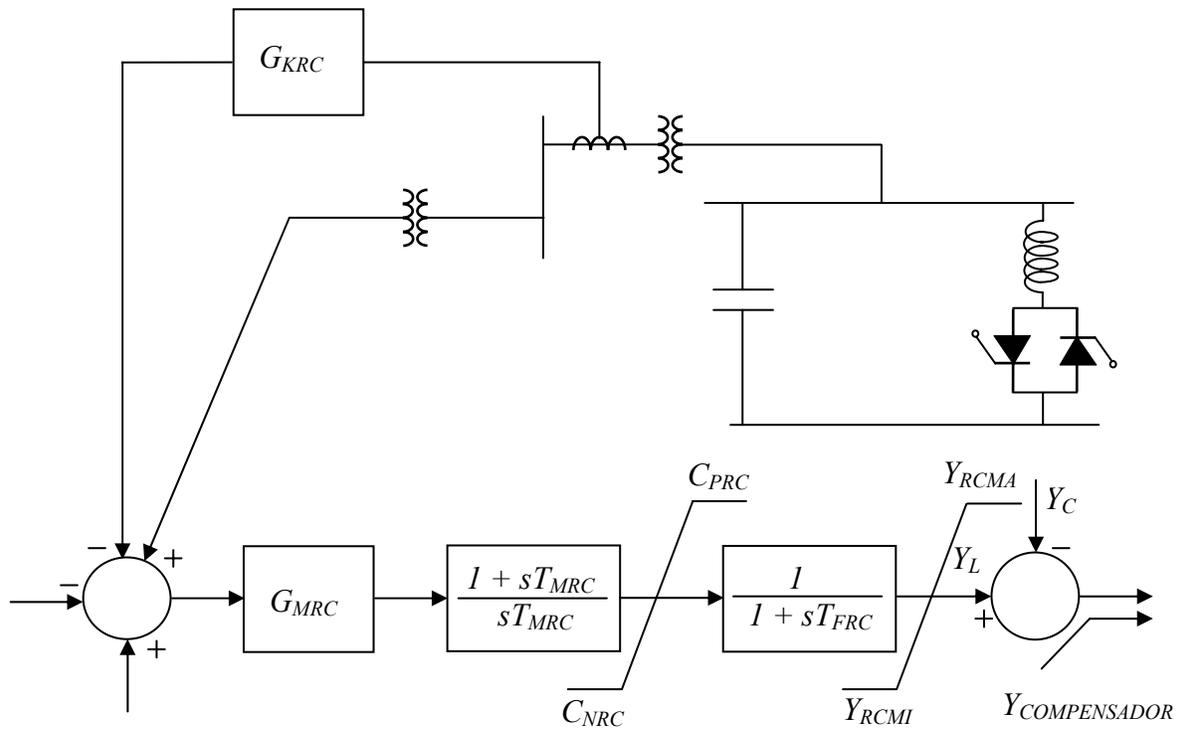
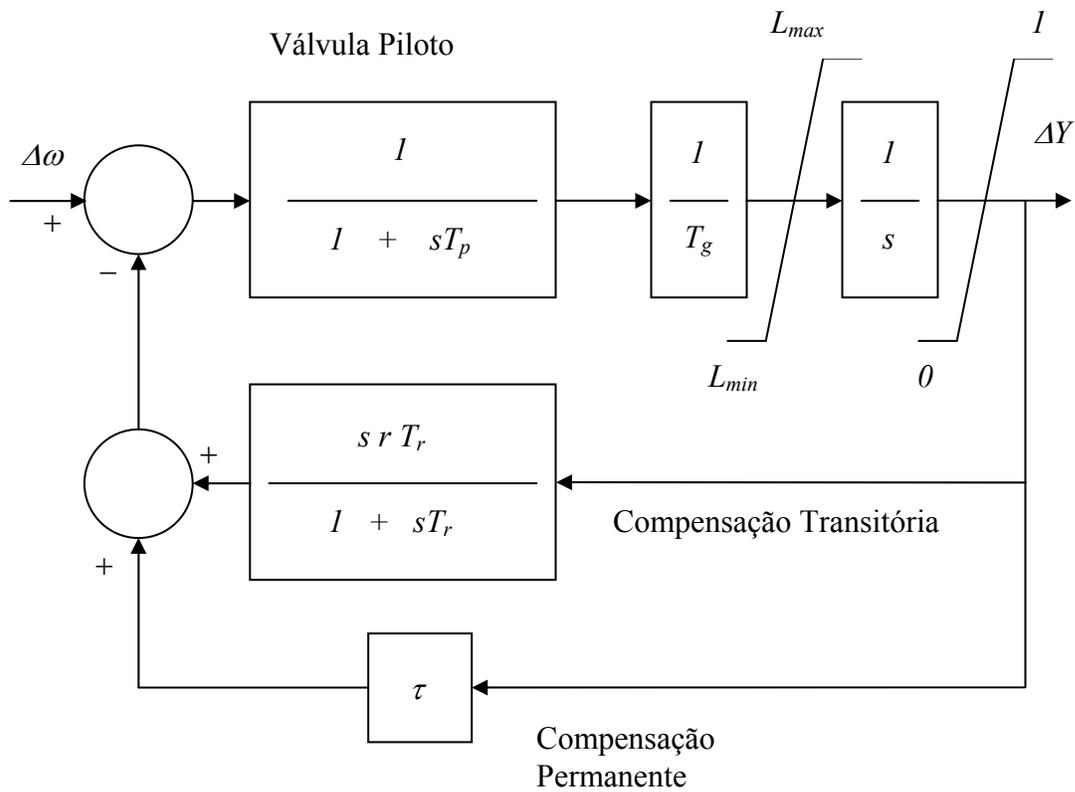


Figura 6 Compensador estático de reativos - Diagrama de blocos do modelo de controle de um compensador estático de reativos.



Turbina hidráulica

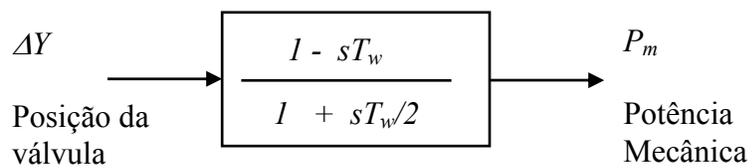
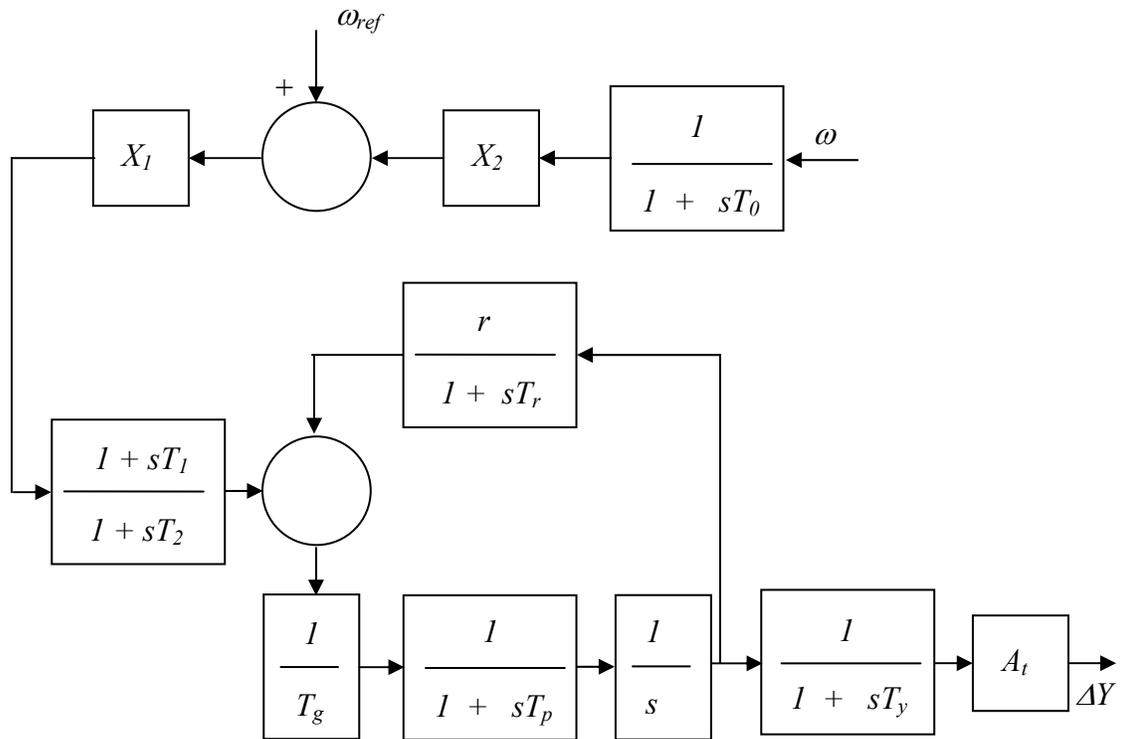


Figura 7 Regulador de velocidades e turbina tipo 1 Diagrama de blocos do do modelo de controle de velocidades de um gerador hidráulico.



Turbina hidráulica

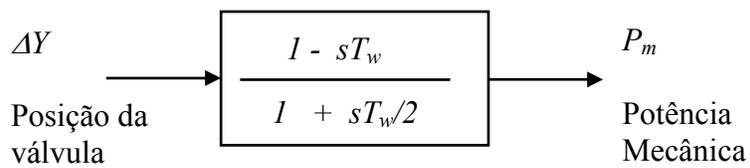


Figura 8 Regulador de velocidades e turbina tipo 2 *Diagrama de blocos do do modelo de controle de velocidades de um gerador hidráulico.*

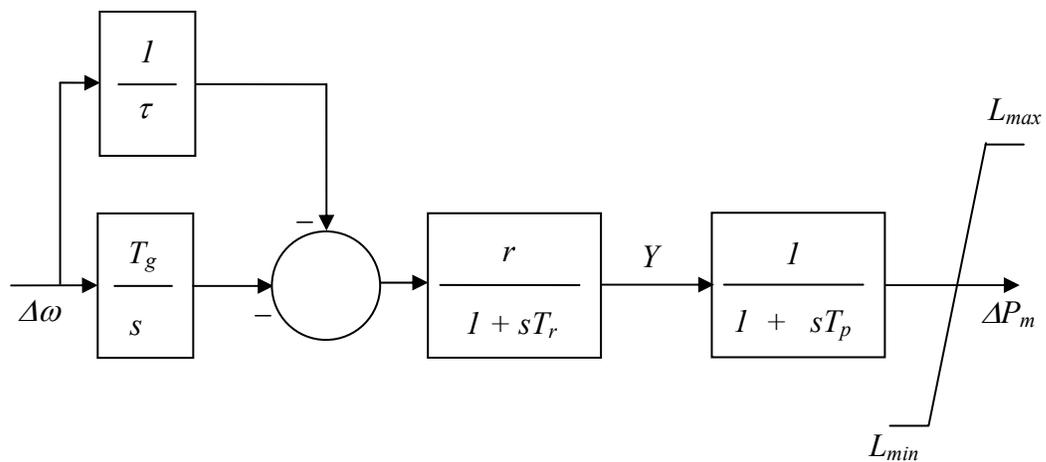


Figura 9 **Regulador de velocidades e turbina tipo 3** *Diagrama de blocos do do modelo de controle de velocidades de um grupo moto gerador diesel.*

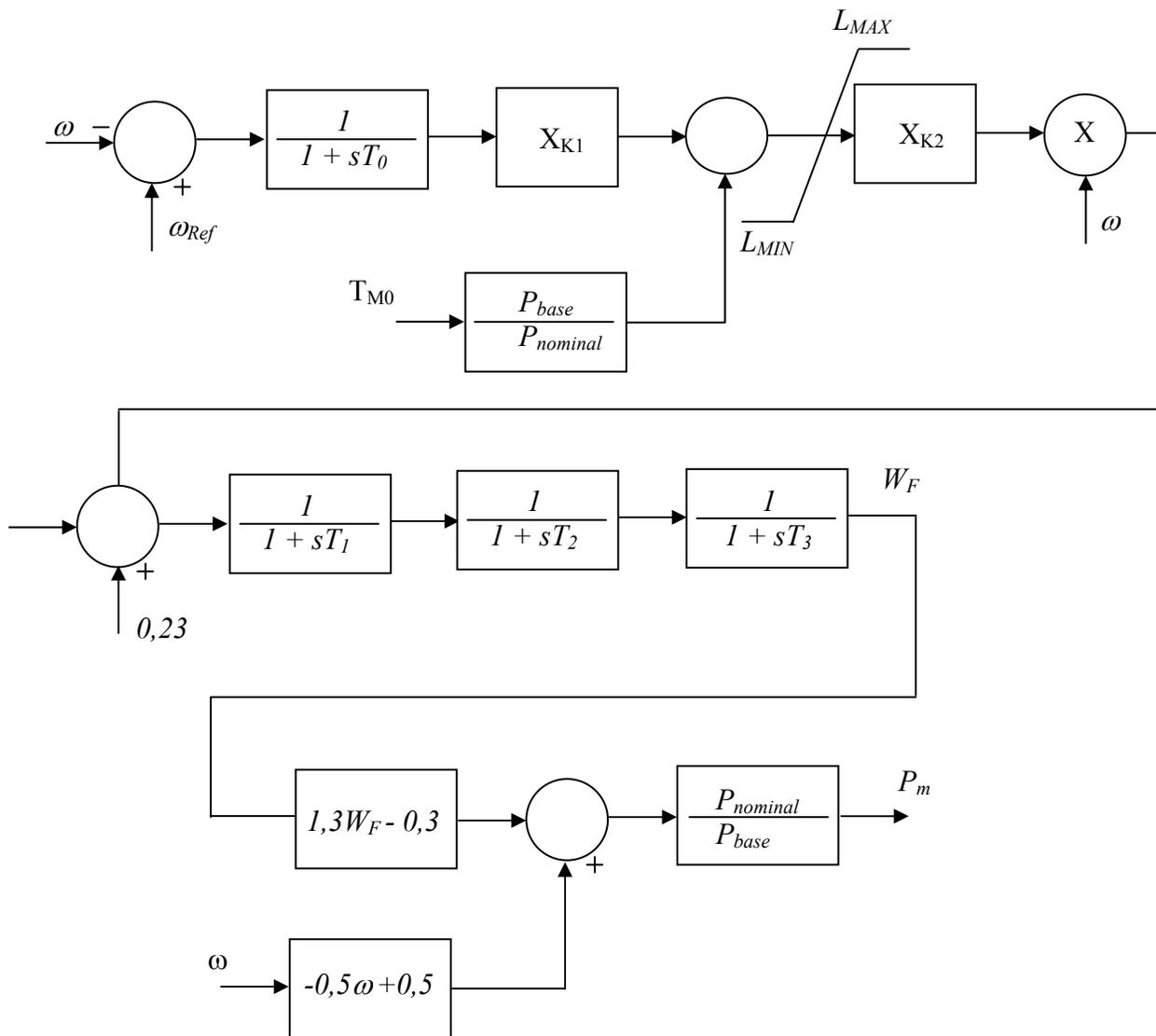


Figura 10 **Regulador de velocidades e turbina tipo 4** Diagrama de blocos do do modelo de controle de velocidades de um gerador térmico. (Similar as máquinas 1 e 2 da Termopernambuco)

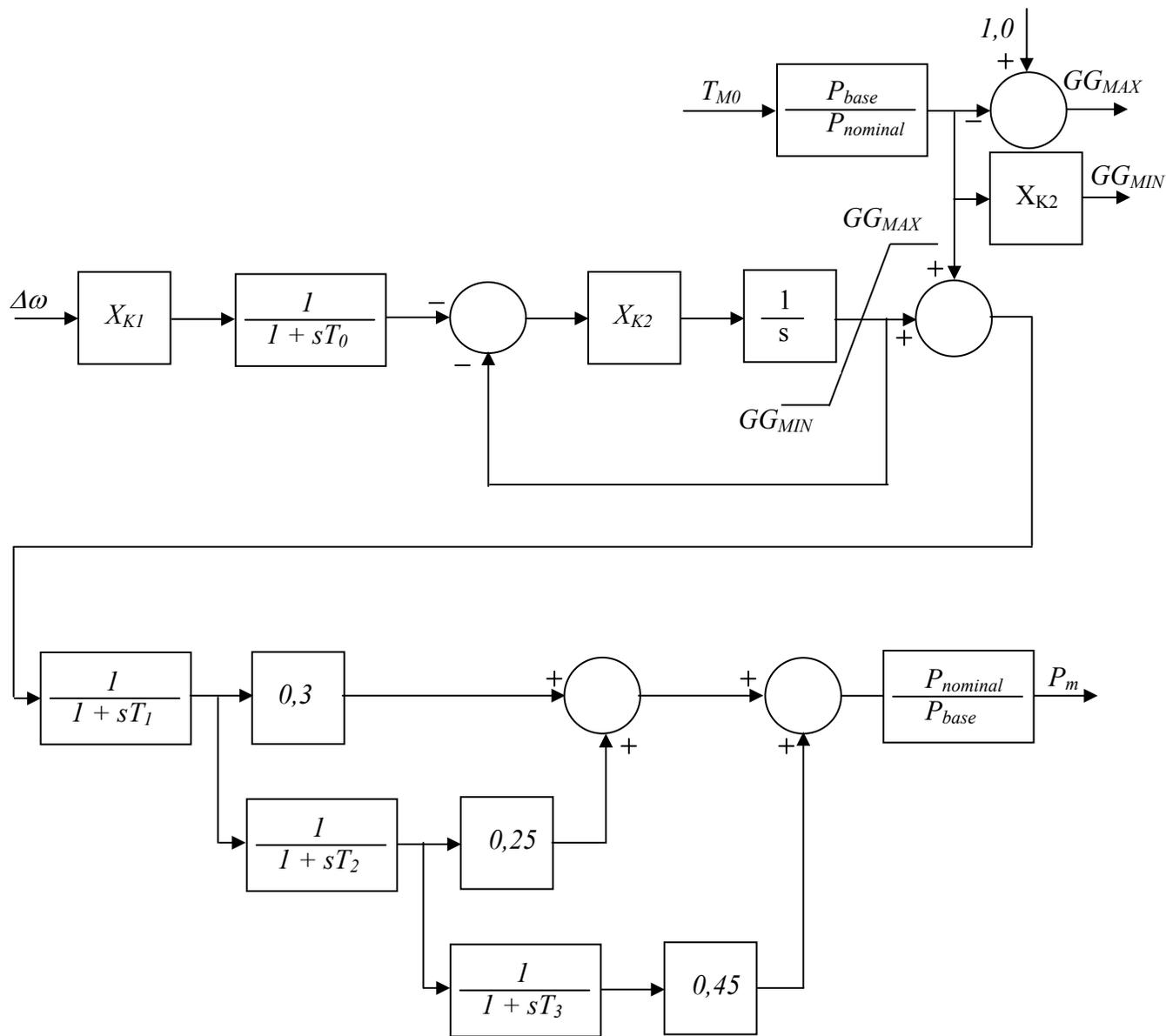


Figura 11 **Regulador de velocidades e turbina tipo 5** *Diagrama de blocos do do modelo de controle de velocidades de um gerador térmico.(Similar a máquina 3 da Termopernambuco)*

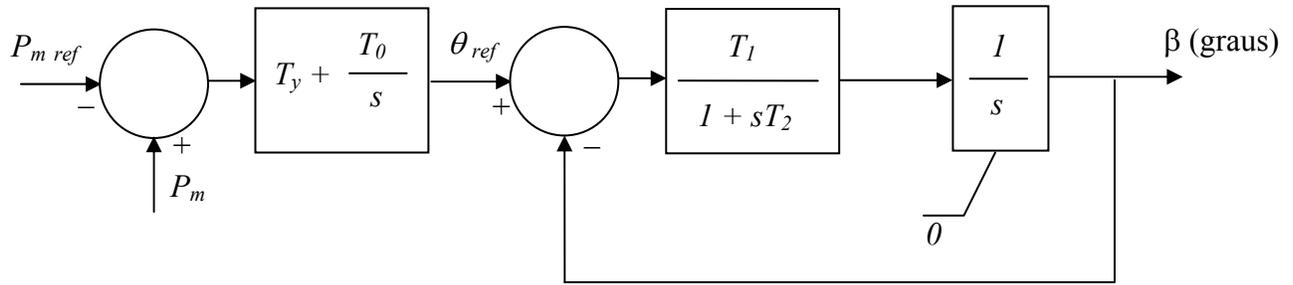


Figura 12 Complemento das turbinas tipo 6, 7 e 8 - Controle do ângulo das pás de turbina eólica.

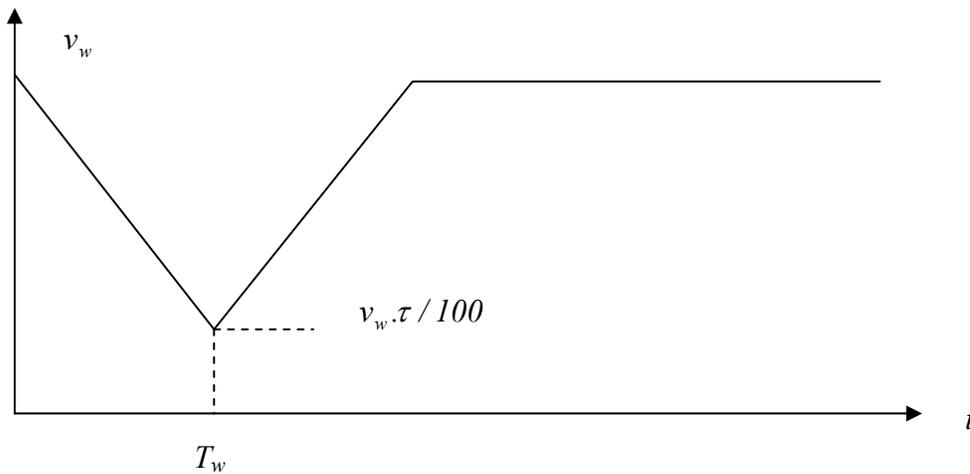


Figura 13 Pico triangular na velocidade do vento, simulado através das turbinas tipo: -4, -5 e 7. Variação no pico da velocidade do vento de $\tau\%$, com tempo de descida ou subida de T_w segundos.

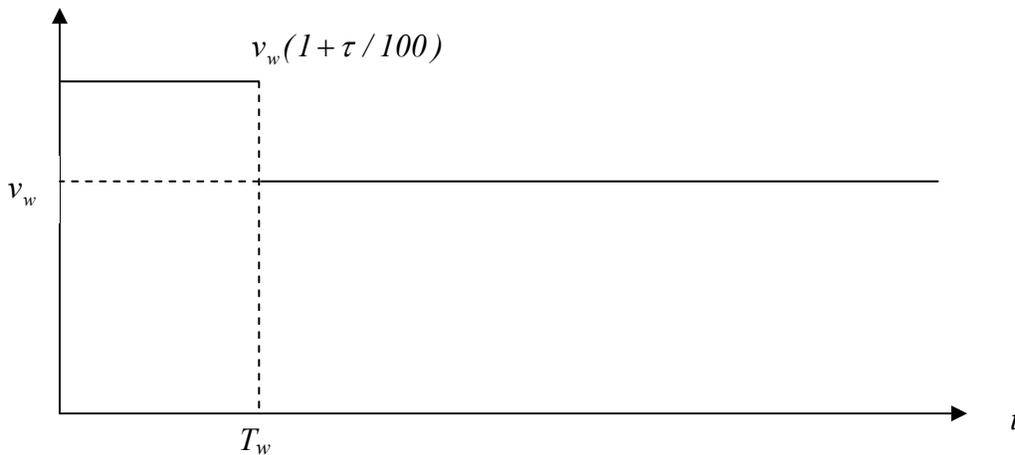


Figura 14 Degrau na velocidade do vento, simulado através das turbinas tipo: -6, -7 e 8. Variação da velocidade do vento de $\tau\%$, durante T_w segundos.

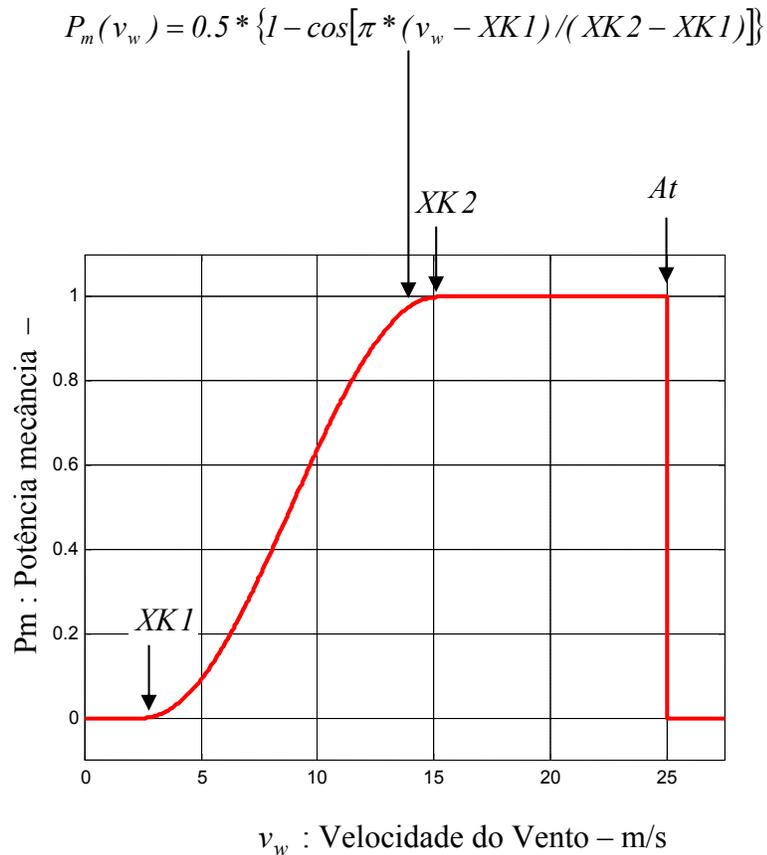


Figura 15 Potência mecânica da turbina eólica em função da velocidade do vento, modelada através das turbinas tipo: -1, -2, -4 e -6. Curva geralmente fornecida pelo fabricante da turbina.

Obtenção da potência mecânica da turbina eólica a partir da velocidade do vento.

A potência mecânica aplicada é função da velocidade do vento como segue:

O procedimento sugerido abaixo permite obter o comportamento da potência mecânica de uma turbina eólica em função do tempo, utilizando as informações da velocidade do vento no intervalo considerado e dados nominais da turbina fornecidos pelo fabricante.

Procedimento

A partir da curva **Potência x Velocidade do vento** fornecida pelo fabricante devem ser identificados os seguintes valores de velocidade do vento:

$AX1$	Velocidade do vento para INÍCIO DE OPERAÇÃO DA TURBINA
$AX2$	Velocidade do vento na qual a TURBINA atinge sua a Potência Nominal
At	Velocidade MÁXIMA de operação da Turbina

Para uma turbina típica,

$$XK1 = 2,5 \text{ m/s}$$

$$XK2 = 15,2 \text{ m/s}$$

$$At = 25,0 \text{ m/s}$$

Com os valores de velocidade obtidos, constroem-se a curva Potência x Velocidade do vento, Figura 15, utilizando como aproximação para a porção ascendente da curva, uma função consenoidal na forma:

A velocidade do vento foi gerada pela seguinte função:

$$P_m(v_w) = 0.5 * \{1 - \cos[\pi * (v_w - XK1) / (XK2 - XK1)]\}$$

E, por fim, partindo-se da curva da velocidade do vento pode-se obter a potência em um determinado instante utilizando-se os passos abaixo:

Para o instante t desejado identifique a Velocidade do vento no gráfico da Velocidade do vento x tempo;

Se a Velocidade do vento $\leq XK1$ então a Potência mecânica = 0,0 (zero) p.u.;

Se a Velocidade do vento $> XK1$ e $\leq XK2$ então a Potência mecânica é calculada partir da expressão:

$$P_m(v_w) = 0.5 * \{1 - \cos[\pi * (v_w - XK1) / (XK2 - XK1)]\}$$

Se a Velocidade do vento $> XK2$ e $\leq At$ então a Potência mecânica = 1.0 p.u.;

Se a Velocidade do vento $> At$ então a Potência mecânica = 0.0 p.u.;

Variação aleatória da velocidade do vento, simulada através da turbina tipo -1.

A simulação de uma rajada de vento pode ser feita através da seguinte função:

$$v_w = F_w + 2V_a + \text{sen}(600t/12) - 2 \cos(600t/15)$$

em que:

v_w é a velocidade do vento.

F_w é um fator para se ajustar velocidade média desejada.

V_a é uma variável aleatória gerada entre 0 e 1.

t é o tempo em segundos.

Obtenção da potência mecânica através da equação aerodinâmica, modelada através das turbinas tipo: -3, -5, -7, 6, 7 e 8.

A Potência mecânica P_m disponível no eixo da turbina eólica é obtida através da seguinte equação aerodinâmica em função da velocidade do vento v_w , Poller (2003):

$$P_m = \frac{\rho}{2} \pi R^2 c_p(\lambda, \beta) v_w^3 \text{ (W)}$$

em que

- ρ Densidade do ar (kg/m^3);
- R Raio do rotor da turbina (m);
- C_p Coeficiente de potência da turbina;
- λ Taxa de velocidade de extremidade;
- β Ângulo de passo das pás da turbina (graus);

A taxa de velocidade de extremidade é definida por:

$$\lambda = \frac{\omega_m}{v_w} R$$

em que ω_m é a velocidade mecânica da turbina (rad/s).

Na figura 16, família de curvas $C_p(\lambda, \beta)$, mostra-se a dependência da potência mecânica fornecida pelo vento em função do ângulo de pitch, Sloodweg *et al.* (2003)

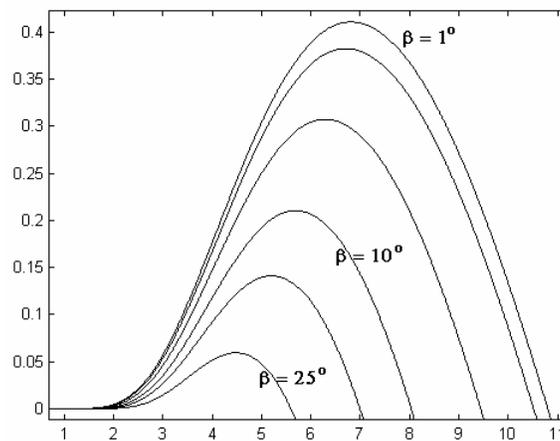


Figura 16 Família de curvas $C_p(\lambda, \beta)$.

Além dos dados do número de turbinas em paralelo e da velocidade do vento, estas turbinas têm como entrada de dados:

- θ , através da variável, T_p
- Número de pólos, através da variável, T_g
- Relação das engrenagens, através da variável, T_r
- Raio da hélice, através da variável, r

As variáveis são plotadas através do executável `plota.m` (MATLAB)

Outras variáveis que podem ser plotadas digitando-as no bloco acima de “Aciona” .

Variável	Digitar e em seguida acionar.
Escorregamento	Esco
Velocidade angular	Omega
Potência ativa do rotor	Protor
Potência reativa do rotor	Qrotor
Potência do conversor C2	Pconv
Tensão aplicada no rotor	Vrotor
Tensão Vcc	Vcc
Corrente no rotor	Irotor
Velocidade do vento com variações.	Vrajada