



Universidade Federal do ABC

Universidade Federal do ABC

Pós-graduação em Engenharia Elétrica

# Aplicações de Conversores Estáticos de Potência

---

José L. Azcue, Prof. Dr.

- ✓ *Conversores CC/CA Conectados à Rede Elétrica*

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

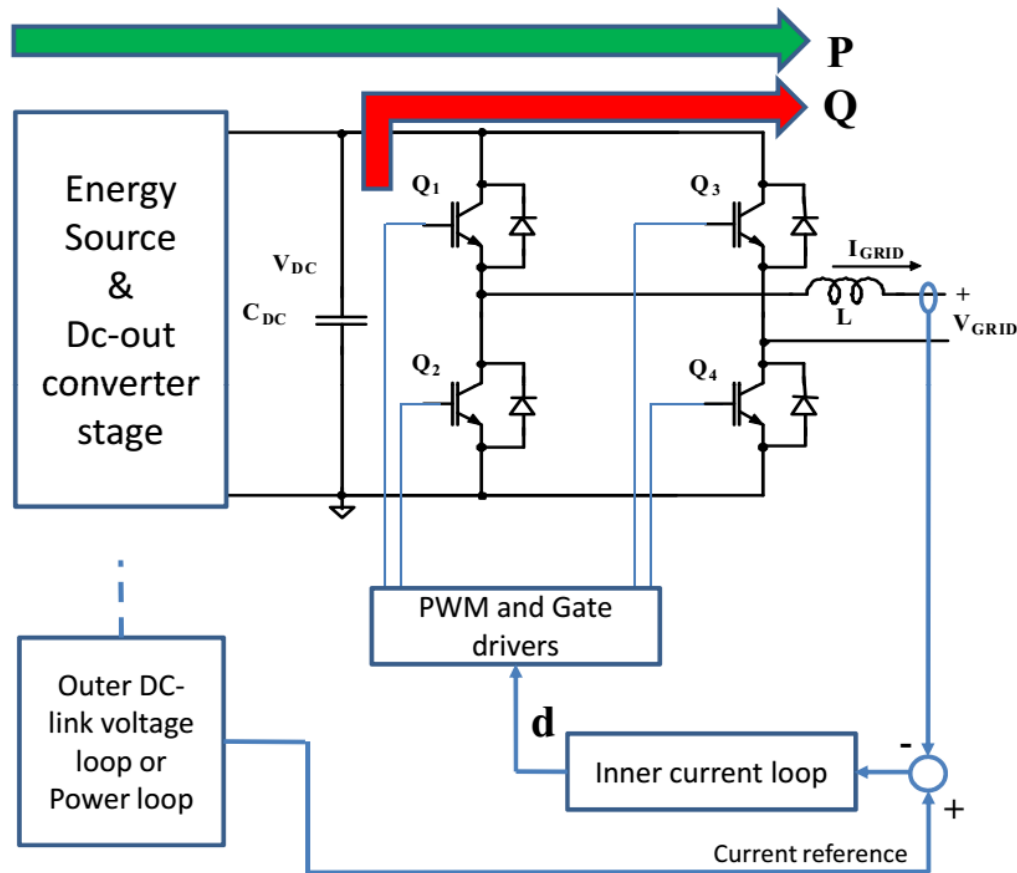
Inversores monofásicos, em ponte completa conectados com a rede elétrica, podem ser controlados através de dois métodos:

- Controle modo corrente
- Controle modo tensão

**Controle modo corrente:** a corrente do indutor no lado da rede elétrica será controlado de modo a seguir a referência fornecida pelo controlador do barramento CC (configuração típica nos sistemas fotovoltaicos) ou por uma malha externa de potência. **O inversor se comporta como uma fonte de corrente (ou potência) controlada [2].**

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

## Controle modo corrente



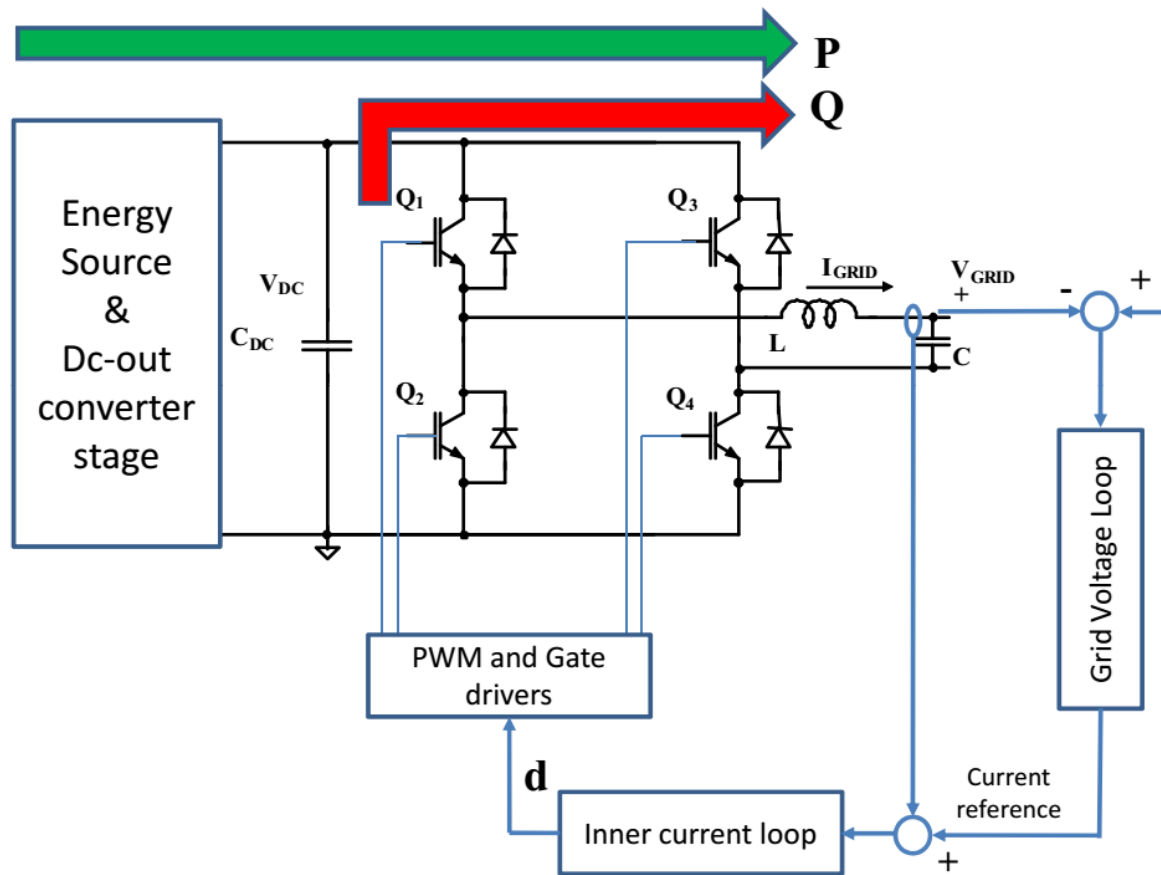
Ref. [2]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

**Controle modo tensão:** a malha de corrente é controlada por uma malha externa de controle de tensão (por exemplo aplicações de UPS, na qual o fluxo de potência é controlado atuando no módulo e a fase da tensão CA do inversor) . **○**  
**inversor se comporta como uma fonte de tensão controlada [2].**

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

## Controle modo tensão



Ref. [2]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

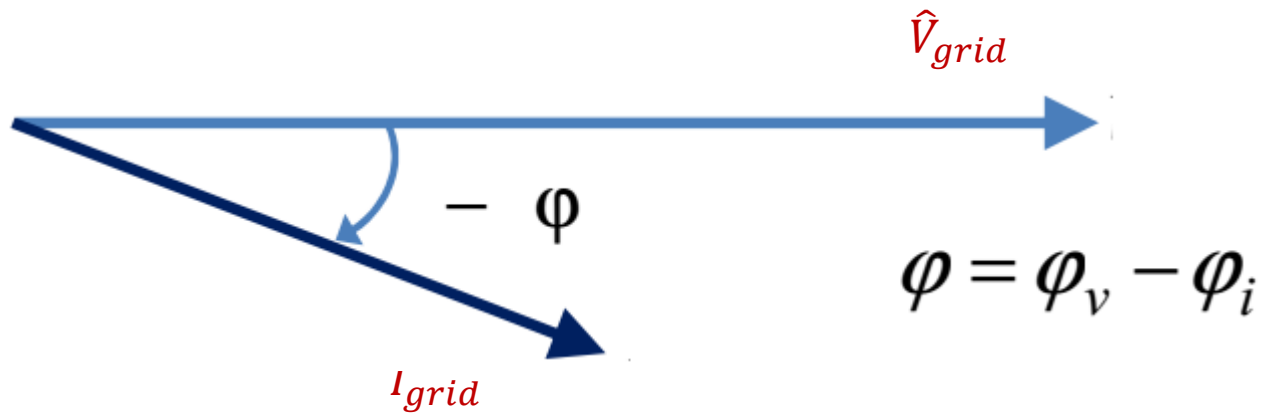
**Injeção de Corrente:** Para o inversor com controle modo corrente um requerimento típico nos sistemas conectados com a rede elétrica (por ex. inversores fotovoltaicos) é fornecer potência puramente ativa, isto é, **injetar corrente em fase com a tensão (FP=1)**; [2]

Supondo que a tensão e a corrente da rede elétrica são senoidais ( $V_{grid}, I_{grid}$ ), a representação fasorial para esta condição é:



# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

No entanto, o inversor pode injetar uma corrente adiantada ou atrasada em relação à tensão da rede elétrica [2].



# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

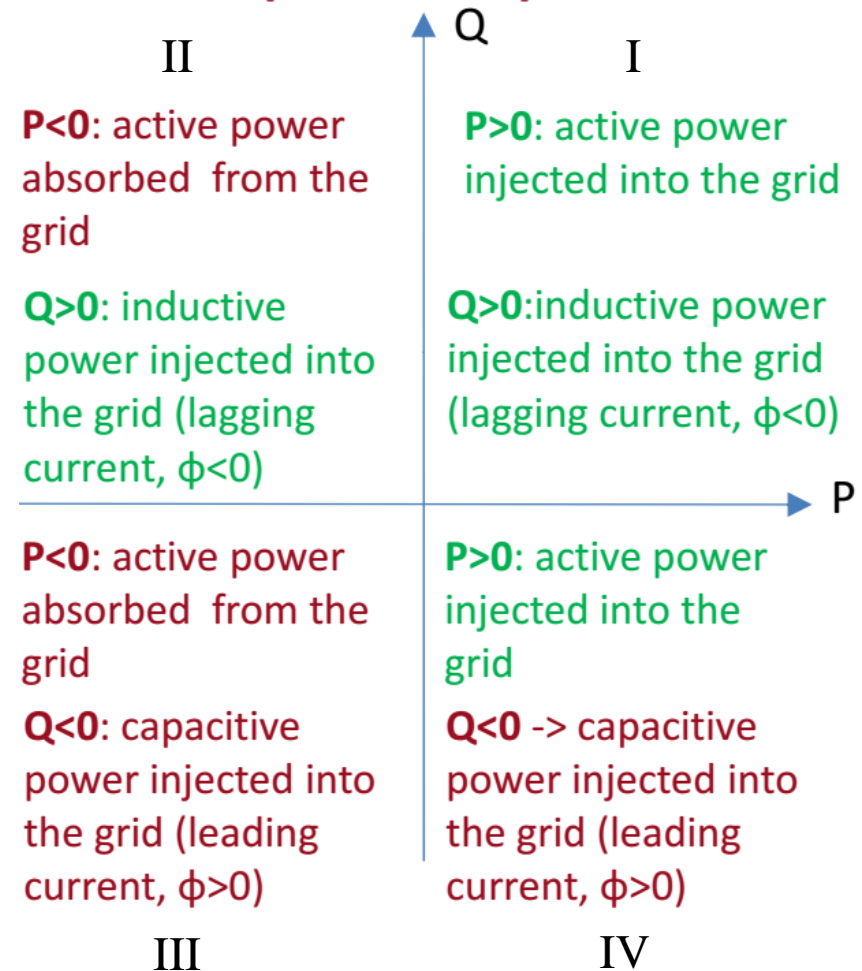
Potência complexa fornecida pelo inversor:

$$\hat{S} = \hat{V}_{grid} \hat{I}_{grid}^* = P + jQ$$

$$P = V_{grid} I_{grid} \cos \varphi$$

$$Q = V_{grid} I_{grid} \sin \varphi$$

## Four quadrant operation



[2]

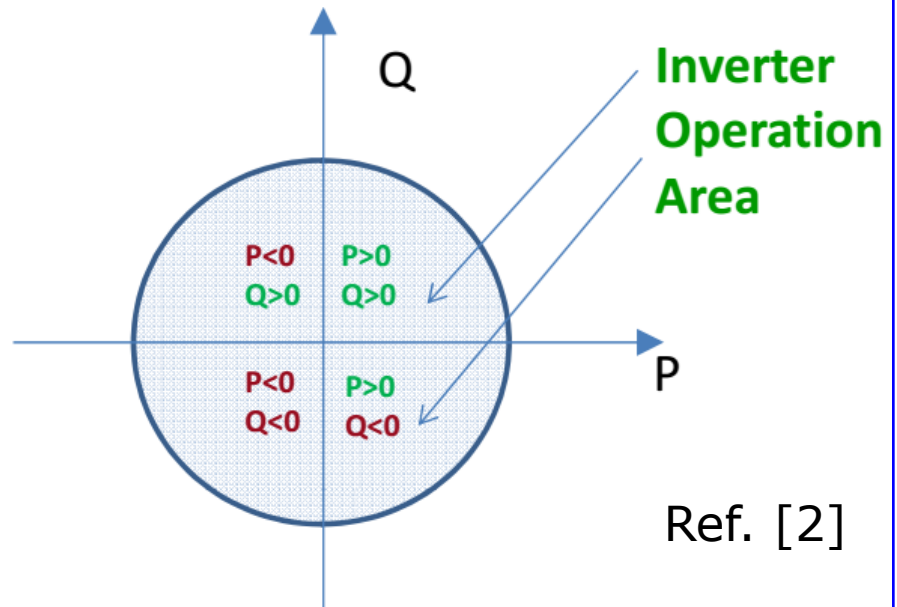


# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

Em geração distribuída, os inversores operam nos quadrantes I e IV, **injetando potência ativa positiva** e **injetando potência reativa positiva ou negativa**.

## Potência Nominal

A potência complexa que pode ser fornecida por um inversor está limitado pela tensão e corrente nominal dos componentes.

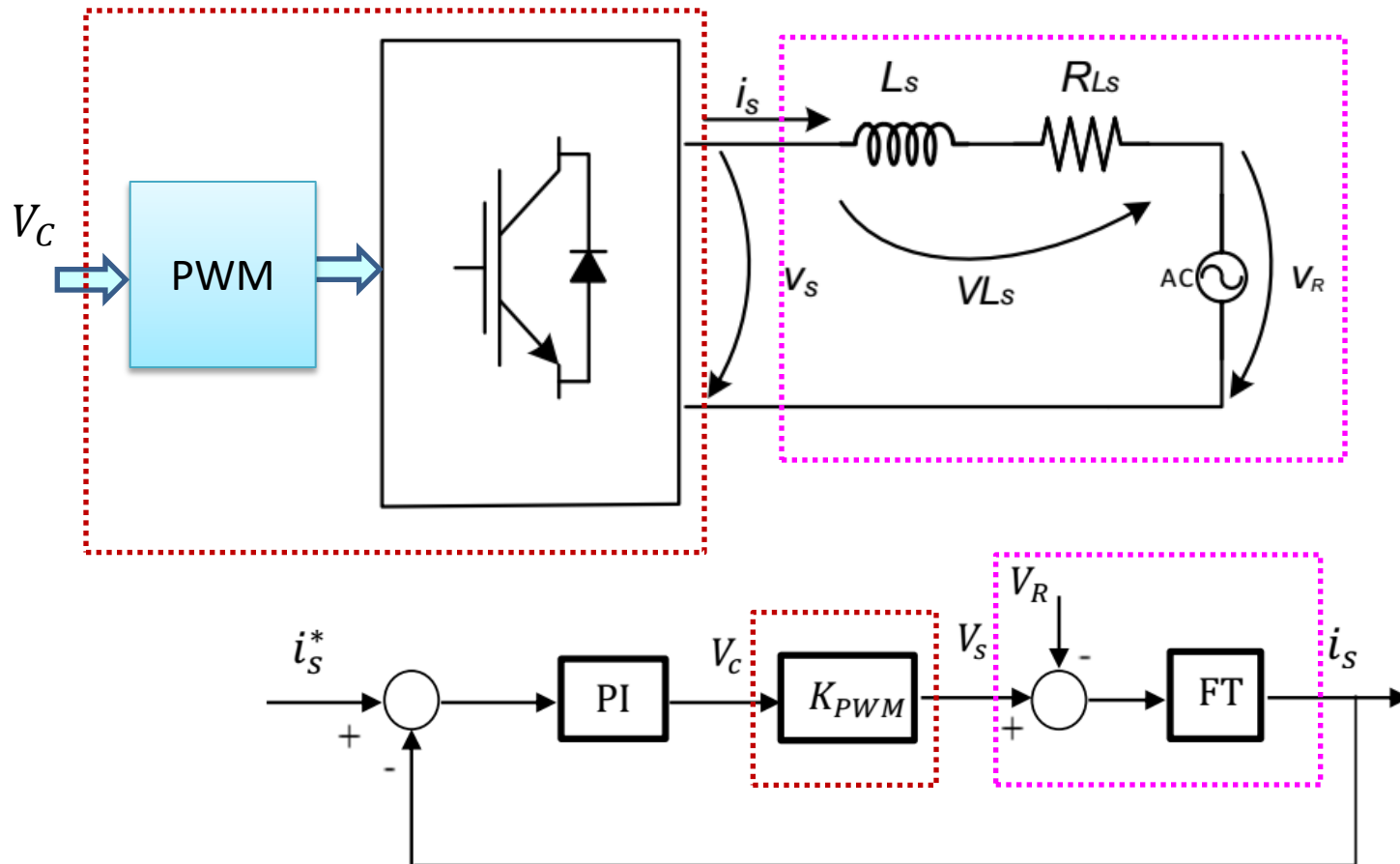


Para uma determinada tensão da rede, estes limites são representados pela potência aparente

$$S = V_{grid} I_{grid,max} = |\hat{S}_{max}| \text{ [VA]}$$

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

## Inversor monofásico: controle modo corrente



[6]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

Para obter o valor de  $K_{PWM}$  é necessário definir a técnica de modulação e a topologia do conversor. Neste caso será um inversor monofásicos em ponte completa com modulação PWM unipolar.

$$V_s = m_a V_{DC}$$

$$m_a = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_{tri}}$$

$$V_s = m_a V_{DC} = \frac{\hat{V}_c}{\hat{V}_{tri}} V_{DC} = \frac{V_{DC}}{\hat{V}_{tri}} \hat{V}_c$$

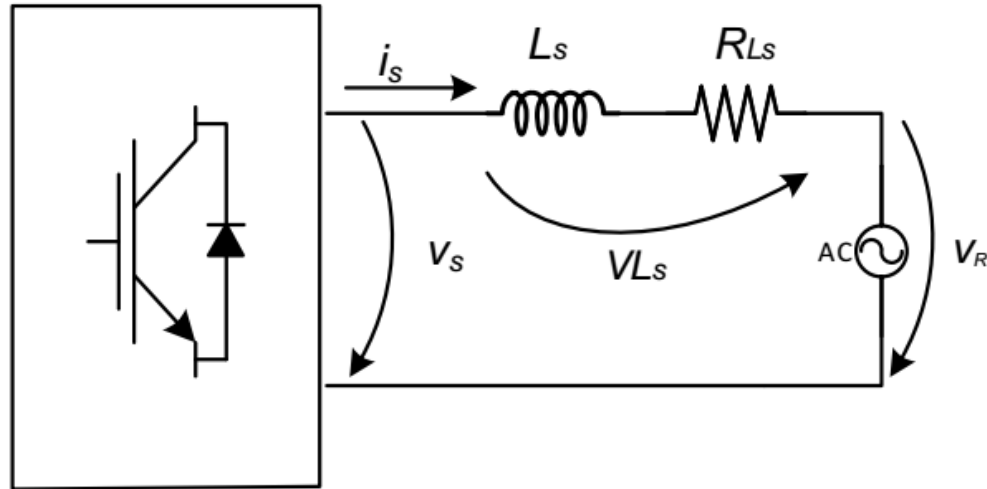
Portanto,

$$K_{PWM} = \frac{V_{DC}}{\hat{V}_{tri}}$$

Sendo  $\hat{V}_{tri}$  a amplitude do sinal da portadora.

[6]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica



Por outro lado, tem-se que:

$$V_s = L_s \frac{di_s}{dt} + R_{Ls} i_s + V_R$$

[6]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

$$V_S = L_S \frac{di_S}{dt} + R_{L_S} i_S + V_R$$

Aplicando a transformada de Laplace, tem-se:

$$V_S(s) = (R_{L_S} + L_S s) I_S(s) + V_R(s)$$

Isolando  $I_S$

$$V_S - V_R = (R_{L_S} + sL_S) I_S \leftrightarrow I_S = \frac{V_S - V_R}{R_{L_S} + sL_S}$$

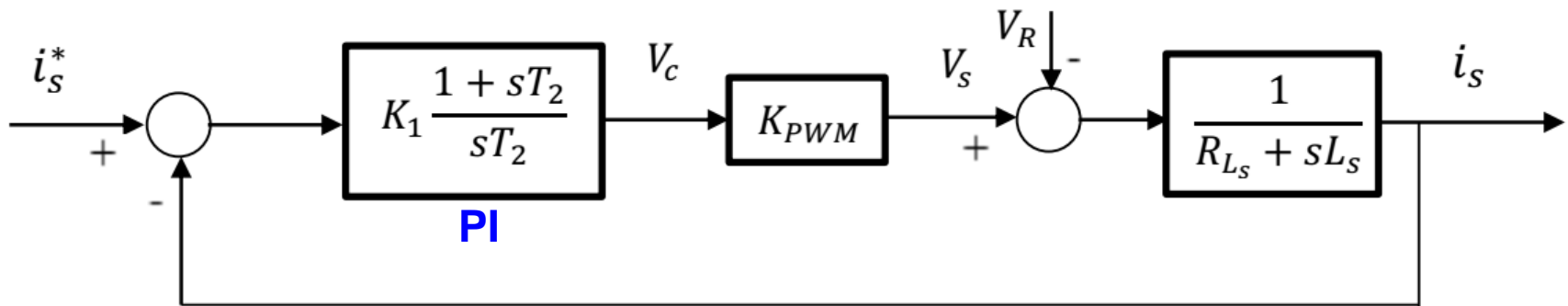
Sendo a **função de transferência (FT)** do sistema:

$$\frac{I_S}{V_S - V_R} = \text{FT} = \frac{1}{R_{L_S} + sL_S}$$

[6]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

Diagrama em blocos



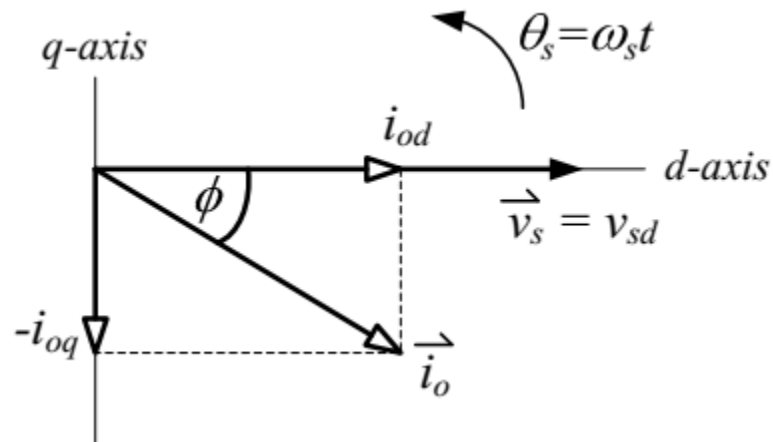
$$K_{PWM} = \frac{V_{DC}}{\hat{V}_{tri}}$$

$$\frac{I_s}{V_S - V_R} = FT = \frac{1}{R_{Ls} + sL_s}$$

[6]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

**Controle vetorial das correntes:** controle orientado pela tensão



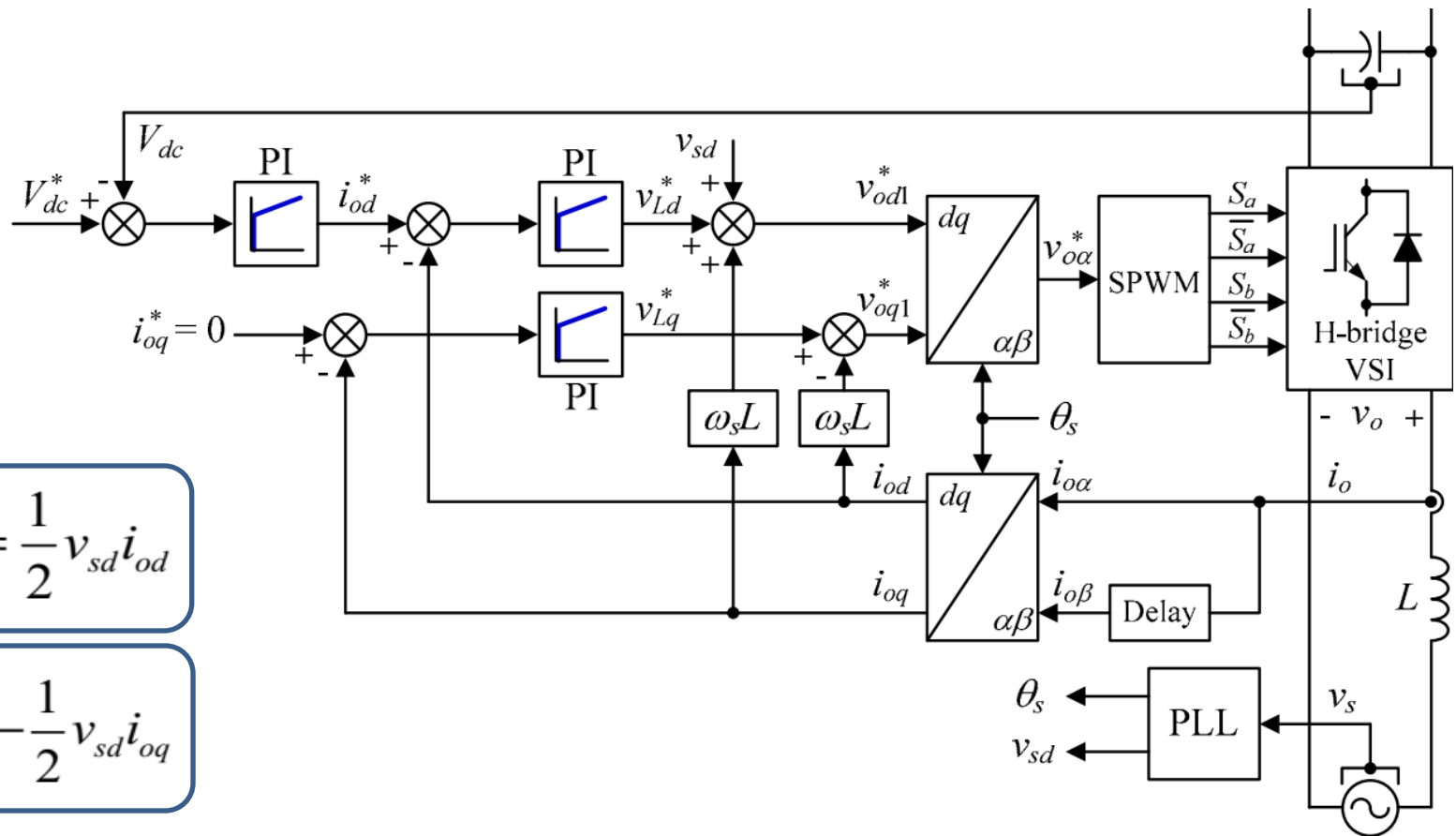
$$p = \frac{1}{2} v_{sd} i_{od}$$

$$q = -\frac{1}{2} v_{sd} i_{oq}$$

[7]

# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

## Controle vetorial das correntes



$$p = \frac{1}{2} v_{sd} i_{od}$$

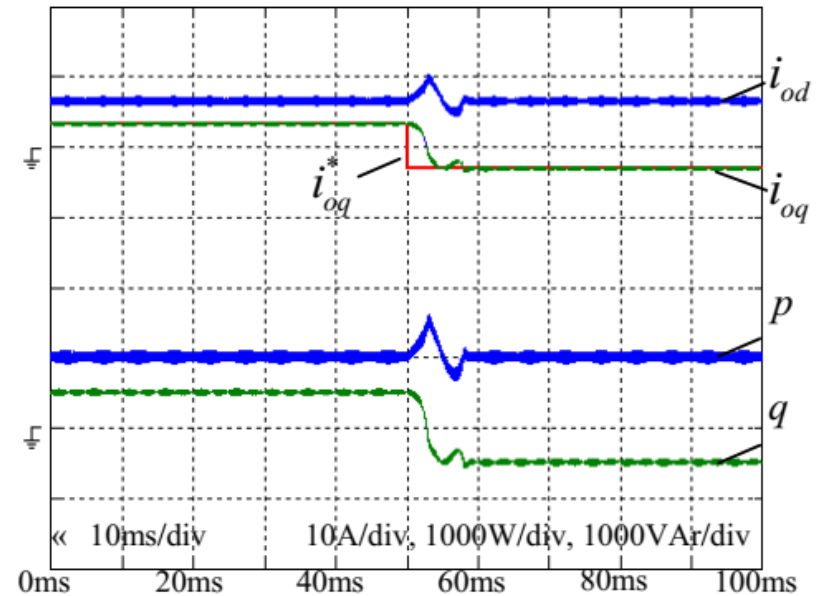
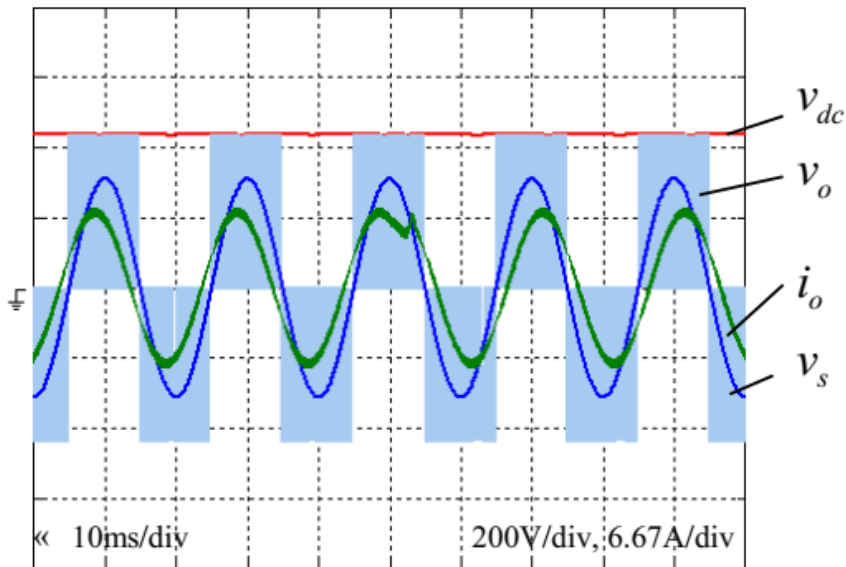
$$q = -\frac{1}{2} v_{sd} i_{oq}$$

[7]



# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

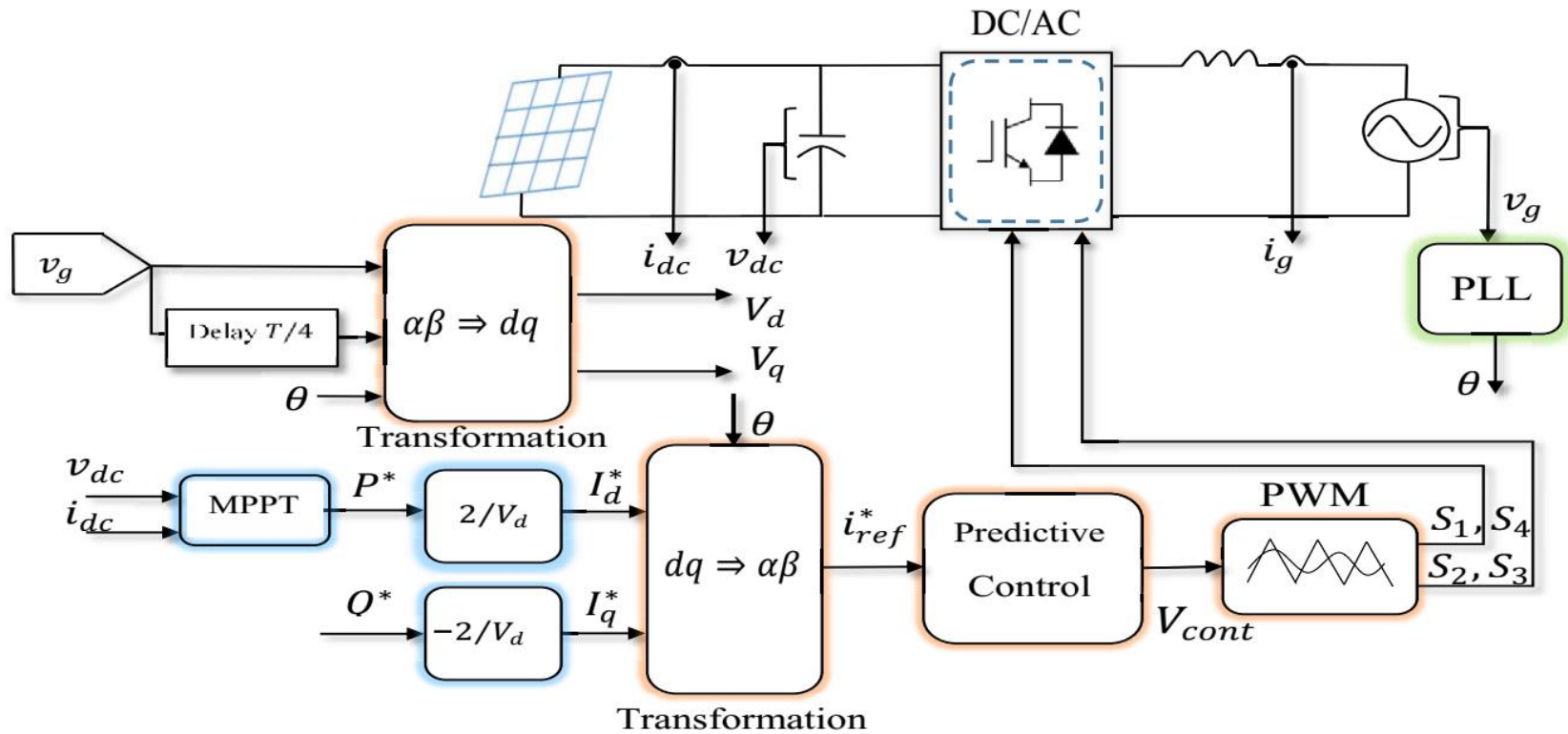
## Controle vetorial das correntes



Ref. [7]

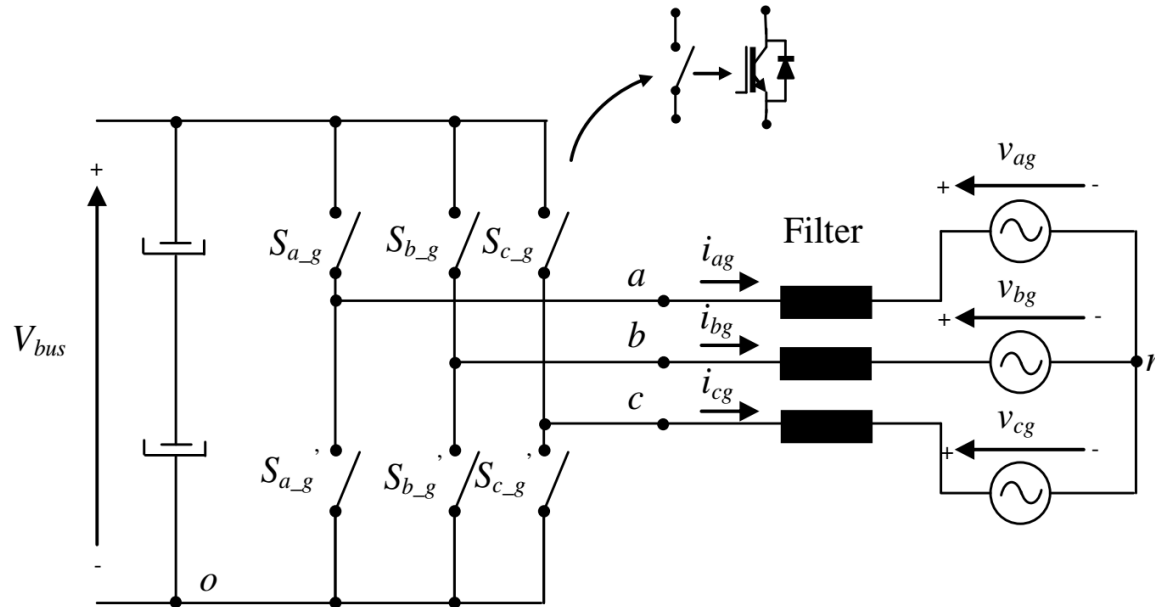
# Conversor Monofásico Conectado à Rede Elétrica

## Controle de corrente preditivo



Ref. [9]

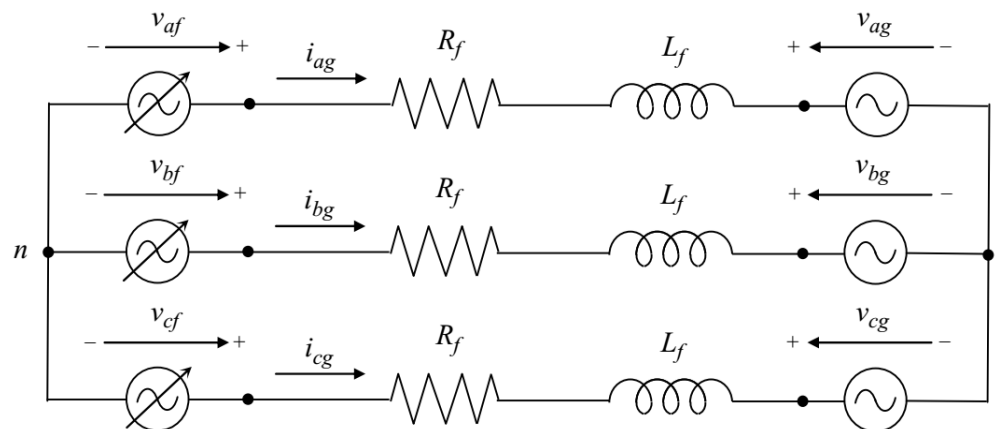
# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica



Ref. [1]

$$\text{Maximum } \langle v_{af} \rangle_1 = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}}$$

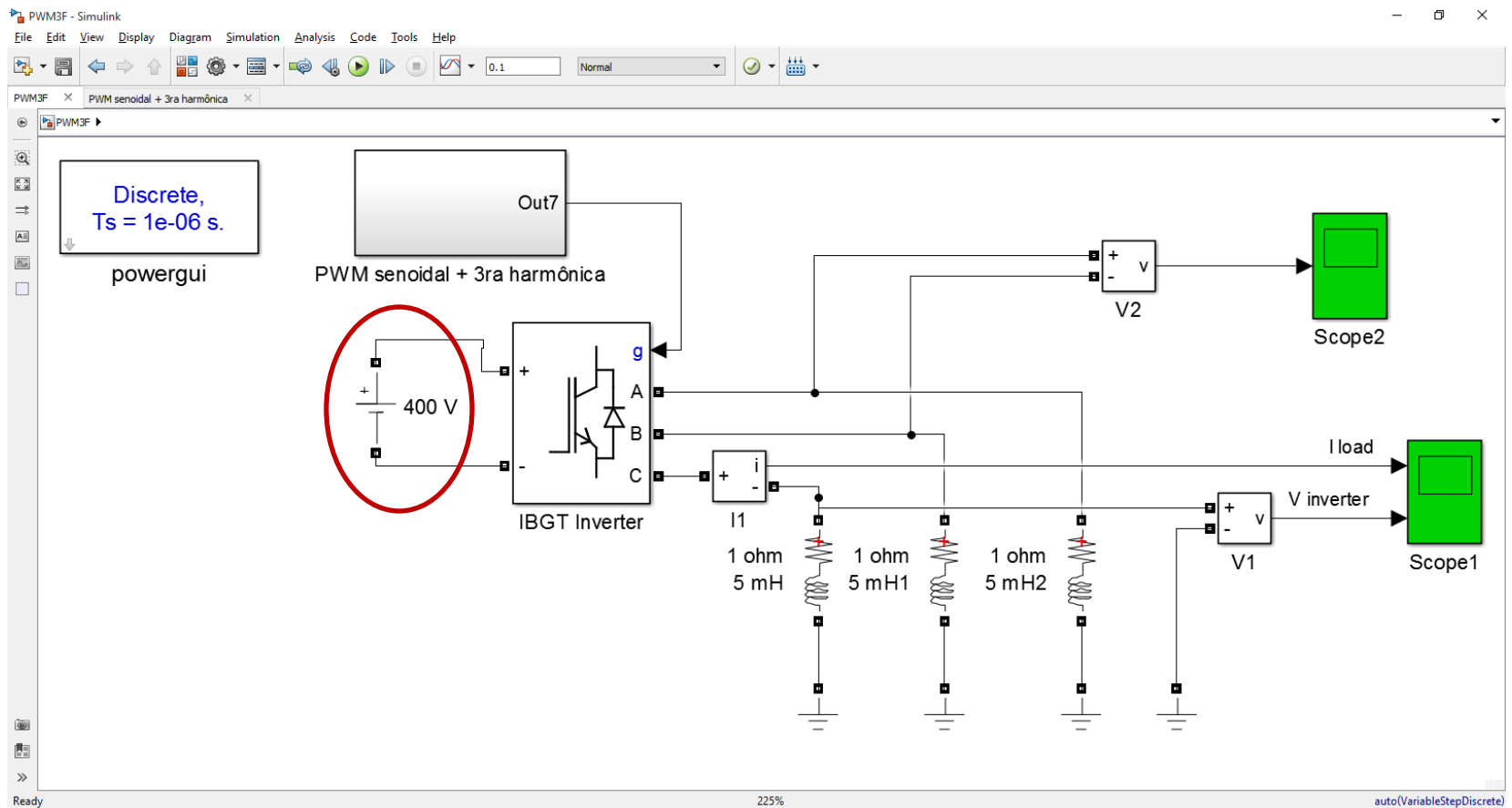
**SVM, PWM senoidal**  
**com terceira**  
**harmônica**  
 (na região linear)



Circuito  
 equivalente

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Simulação do inversor trifásico de dois níveis (modulação PWM senoidal com terceira harmônica)

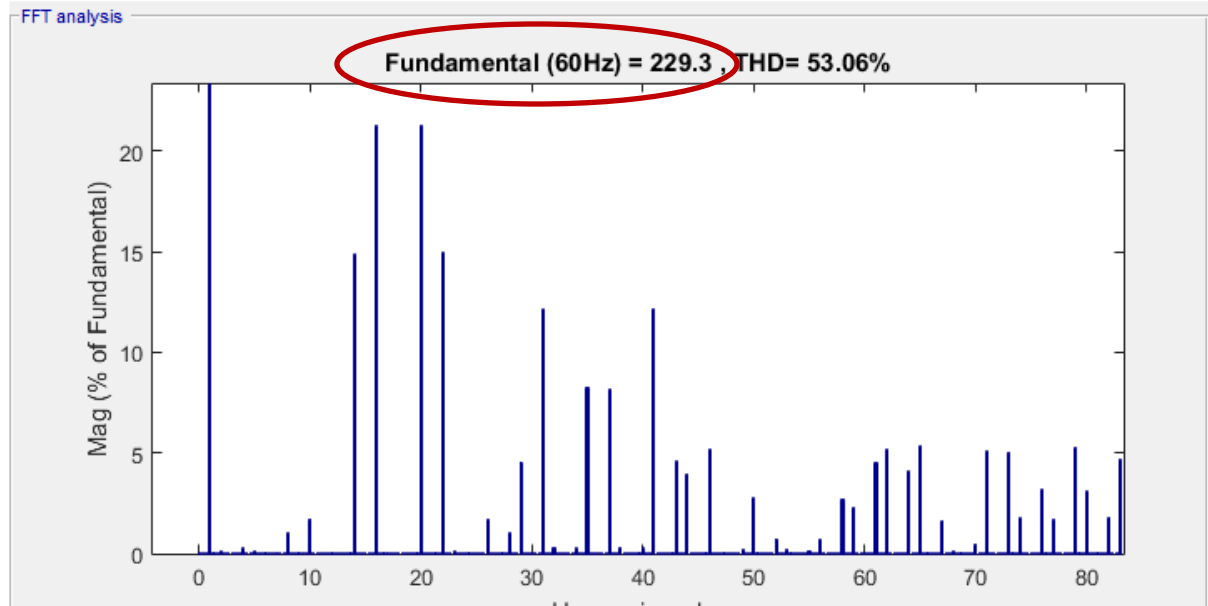
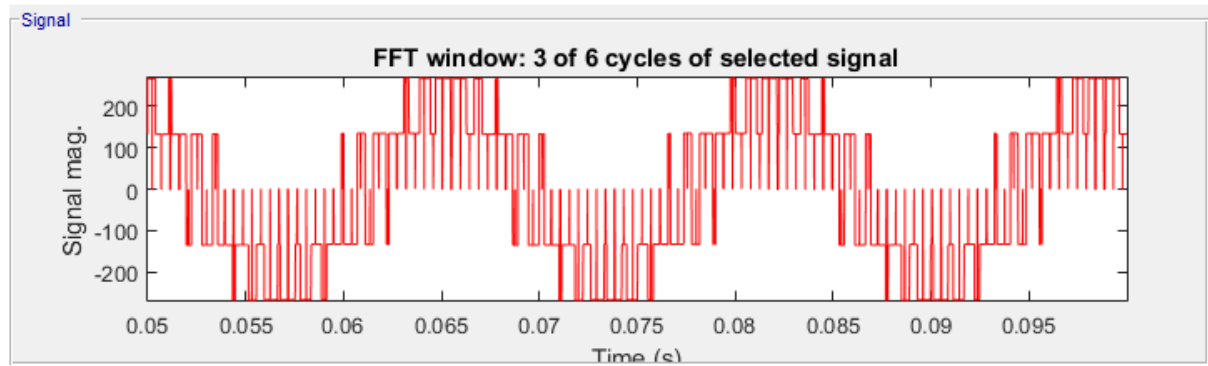


# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Amplitude da fundamental

$$\langle v_{af} \rangle_1 = \frac{V_{bus}}{\sqrt{3}}$$

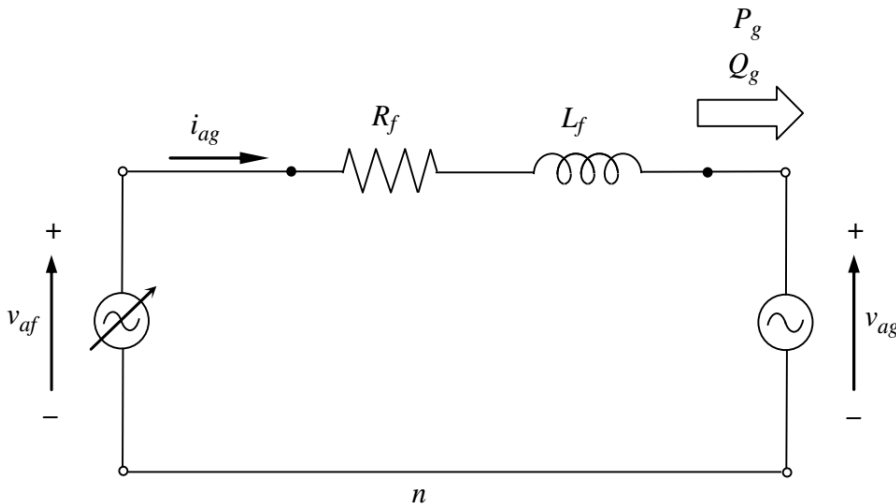
$$\frac{400}{\sqrt{3}} = 230.9$$



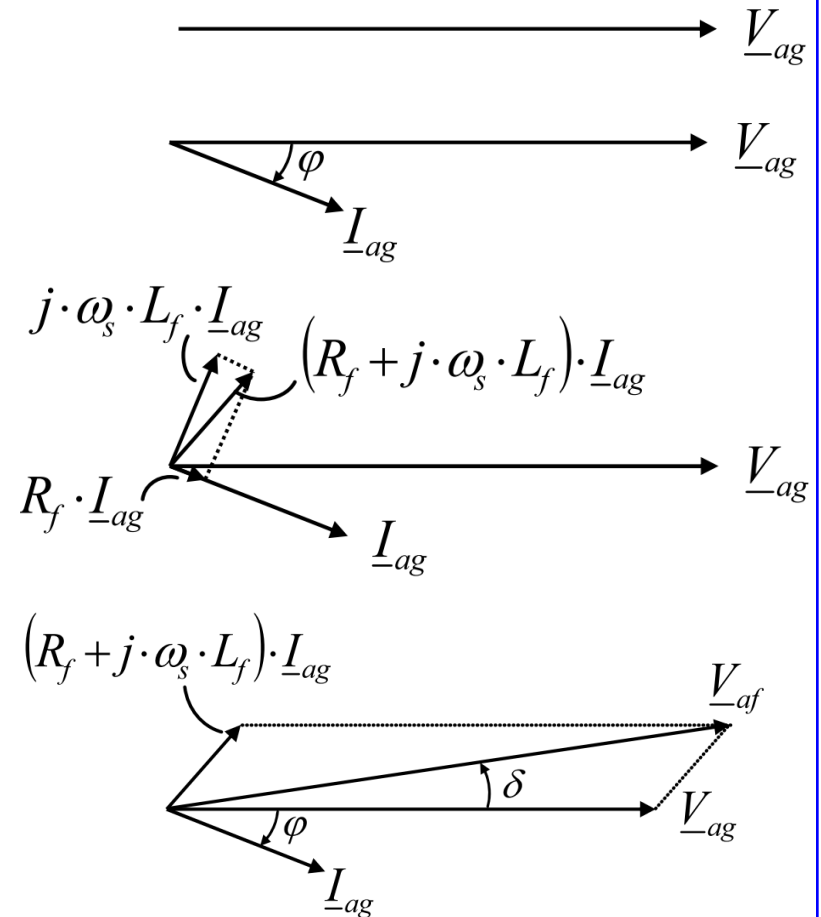
# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Modelo simplificado para uma fase  
(regime permanente)

$$\underline{V}_{af} = \underline{V}_{ag} + (R_f + jL_f\omega_s)\underline{I}_{ag}$$



Representação fasorial



Ref. [1]

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Potência ativa e reativa

$$P_g = |\underline{V}_{ag}| \cdot |\underline{I}_{ag}| \cdot \cos \varphi$$

$$Q_g = |\underline{V}_{ag}| \cdot |\underline{I}_{ag}| \cdot \sin \varphi$$

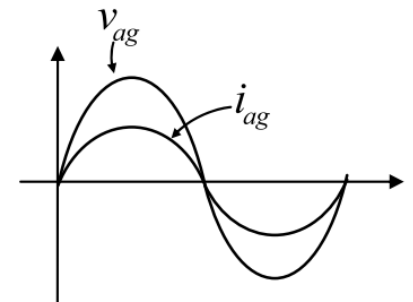
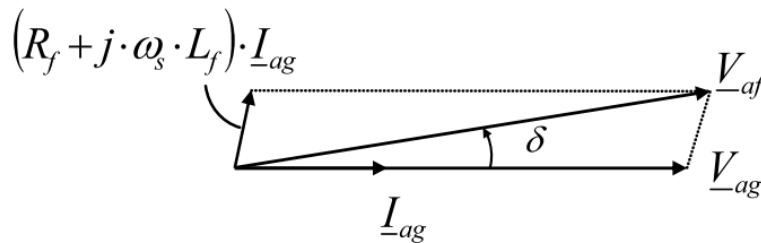
Quando  $P_g > 0$  o inversor injeta potência na rede

Quando  $P_g < 0$ , o inversor recebe potência da rede

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

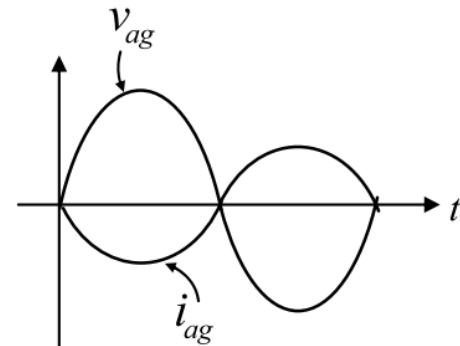
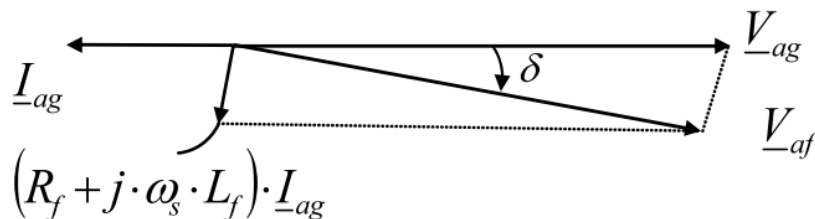
Considerando FP=1 ( $Q_g = 0$ )

$P_g > 0$ ,  $Q_g = 0$  (Inversor injetando potência)



Ref. [1]

$P_g < 0$ ,  $Q_g = 0$  (Inversor consumindo potência)





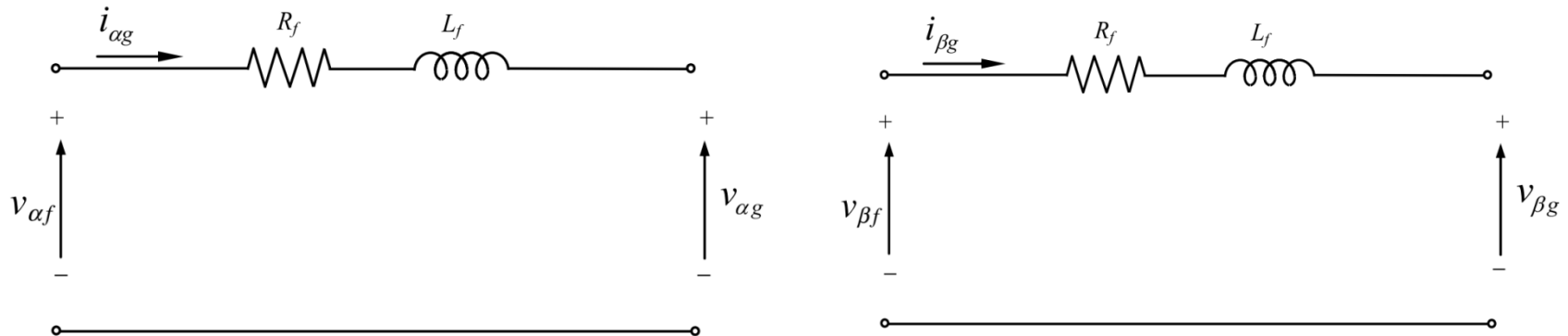
# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

## Modelo Dinâmico

Modelo no sistema de referência estacionário ( $\alpha\beta$ )

$$\vec{v}_f^s = R_f \vec{i}_g^s + L_f \frac{d\vec{i}_g^s}{dt} + \vec{v}_g^s \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{\alpha f} = R_f i_{\alpha g} + L_f \frac{di_{\alpha g}}{dt} + v_{\alpha g} \\ v_{\beta f} = R_f i_{\beta g} + L_f \frac{di_{\beta g}}{dt} + v_{\beta g} \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned} \vec{v}_f^s &= v_{\alpha f} + jv_{\beta f} \\ \vec{v}_g^s &= v_{\alpha g} + jv_{\beta g} \\ \vec{i}_g^s &= i_{\alpha g} + ji_{\beta g} \end{aligned}$$



Circuito elétrico equivalente no sistema estacionário [1].

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

## Modelo no sistema de referência síncrono ( $dq$ )

No sistema síncrono  $\theta$  é o ângulo do sistema de referência (arbitrário),  $\theta = \omega_a t$

$$\vec{v}_f^a = R_f \vec{i}_g^a + L_f \frac{d\vec{i}_g^a}{dt} + \vec{v}_g^a + j\omega_a L_f \vec{i}_g^a \quad \left\{ \begin{array}{l} v_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + v_{dg} - \omega_a L_f i_{qg} \\ v_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + v_{qg} + \omega_a L_f i_{dg} \end{array} \right.$$

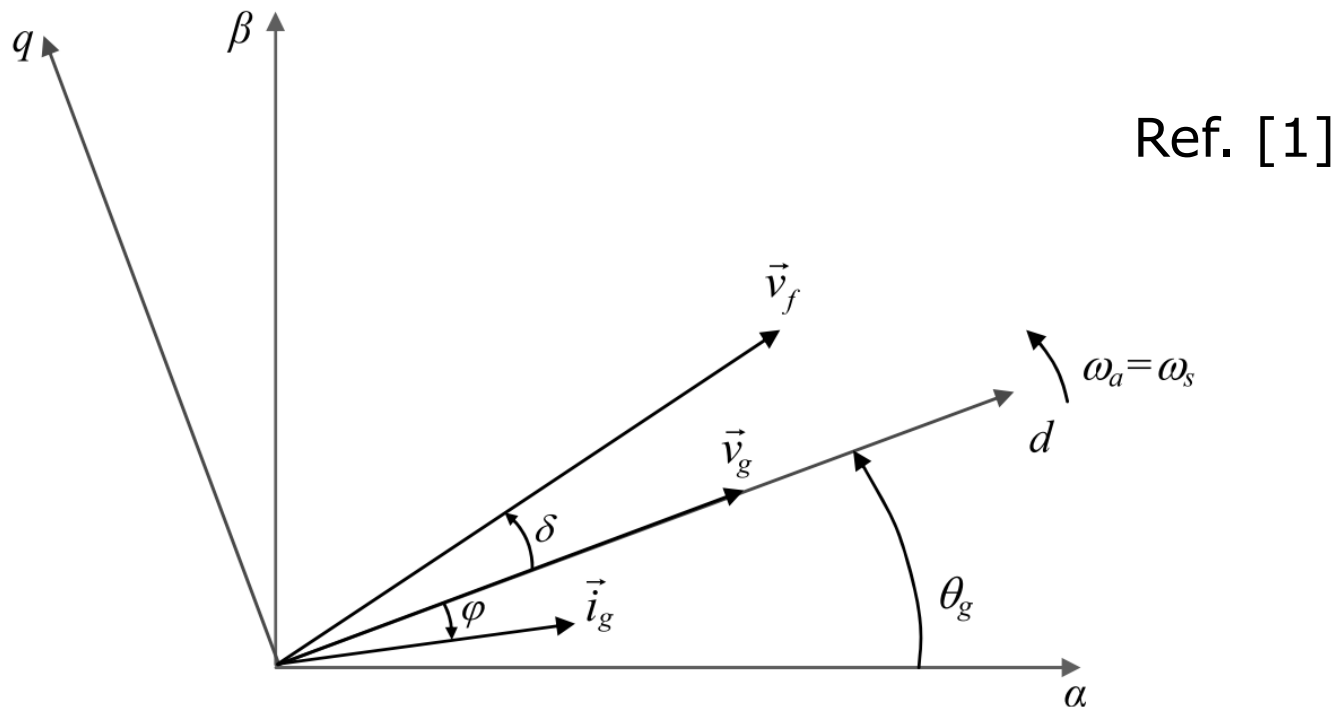
$$\vec{v}_f^a = v_{df} + jv_{qf}$$

$$\vec{v}_g^a = v_{dg} + jv_{qg}$$

$$\vec{i}_g^a = i_{dg} + ji_{qg}$$

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Modelo no sistema de referência síncrono ( $dq$ )



Sistema de referência alinhado com o vetor espacial da tensão da rede elétrica.

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

No sistema de referência alinhado com o vetor espacial da tensão da rede elétrica, tem-se que: [1]

$$v_{dg} = |\vec{v}_g^a|$$

$$v_{qg} = 0$$

$$\omega_a = \omega_s$$

$$\theta = \omega_a t \Rightarrow \theta = \theta_g = \omega_s t$$

Então:

$$v_{df} = R_f i_{dg} + L_f \frac{di_{dg}}{dt} + v_{dg} - \omega_s L_f i_{qg}$$

$$v_{qf} = R_f i_{qg} + L_f \frac{di_{qg}}{dt} + \omega_s L_f i_{dg}$$

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

As expressões para as potências ativa e reativa são: [1]

$$P_g = \frac{3}{2} \operatorname{Re} \left\{ \vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^* \right\} = \frac{3}{2} (v_{dg} i_{dg} + v_{qg} i_{qg})$$

$$Q_g = \frac{3}{2} \operatorname{Im} \left\{ \vec{v}_g \cdot \vec{i}_g^* \right\} = \frac{3}{2} (v_{qg} i_{dg} - v_{dg} i_{qg})$$

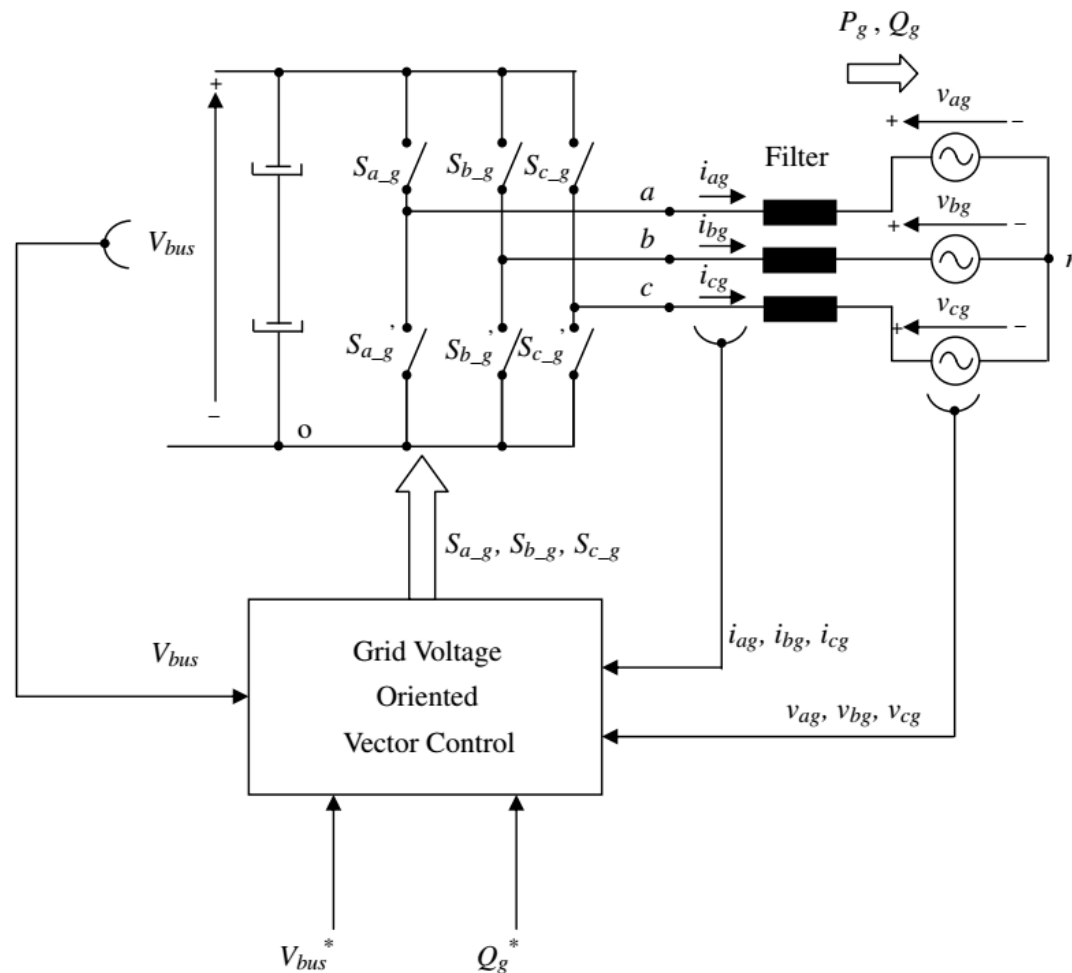
Portanto, tem-se: (considerando o sistema alinhado com a tensão da rede elétrica)

$$P_g = \frac{3}{2} v_{dg} i_{dg} = \frac{3}{2} |\vec{v}_g^a| i_{dg}$$

$$Q_g = -\frac{3}{2} v_{dg} i_{qg} = -\frac{3}{2} |\vec{v}_g^a| i_{qg}$$

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

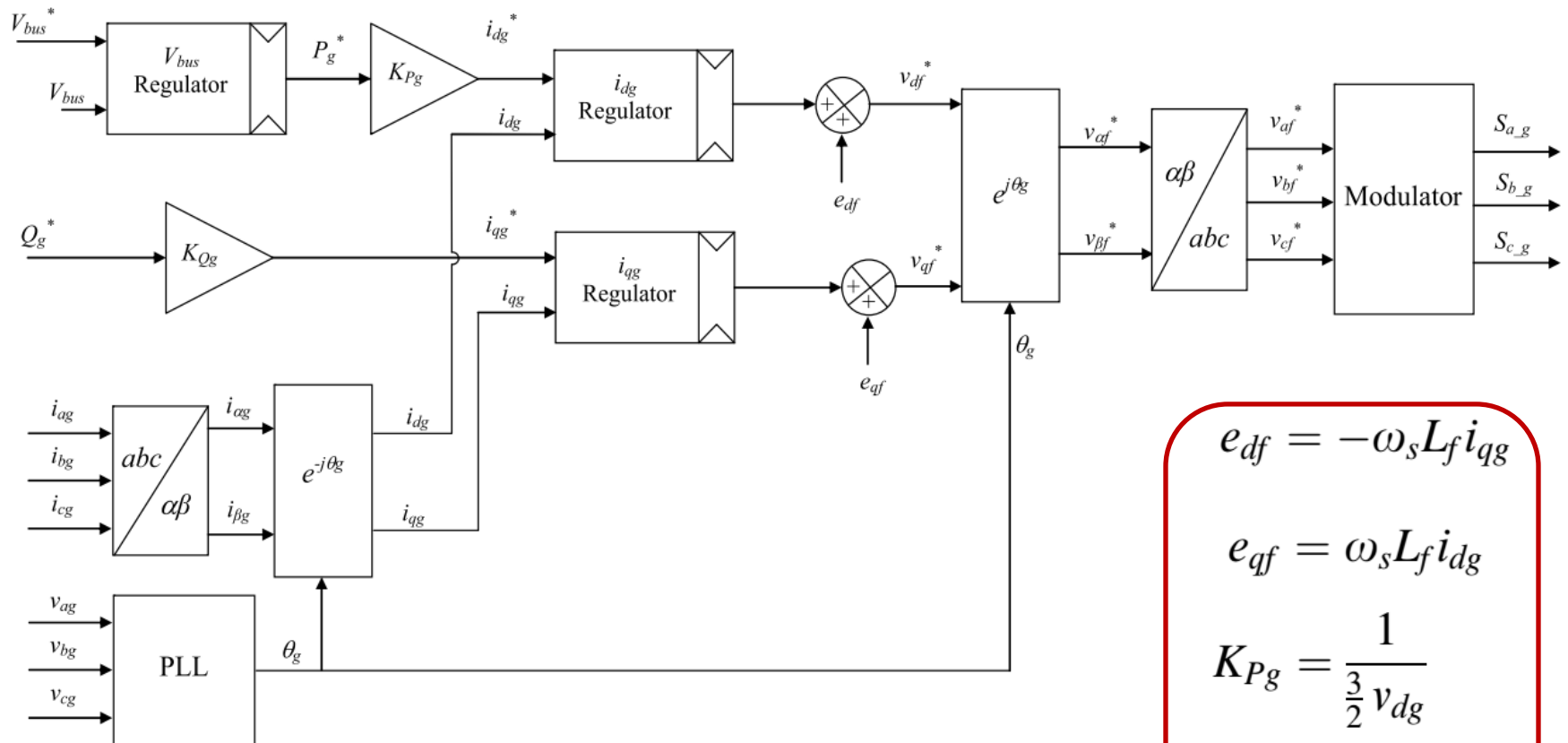
Controle orientado pela tensão



[1]

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

Controle orientado pela tensão



[1]

$$e_{df} = -\omega_s L_f i_{qg}$$

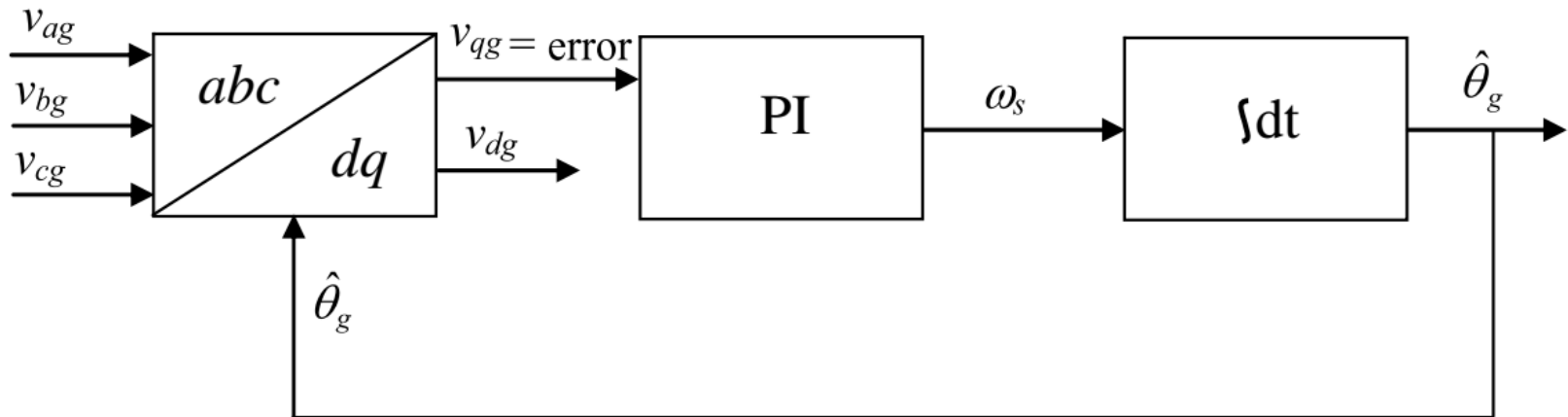
$$e_{qf} = \omega_s L_f i_{dg}$$

$$K_{Pg} = \frac{1}{\frac{3}{2} v_{dg}}$$

$$K_{Qg} = \frac{1}{-\frac{3}{2} v_{dg}}$$

# Conversor Trifásico Conectado à Rede Elétrica

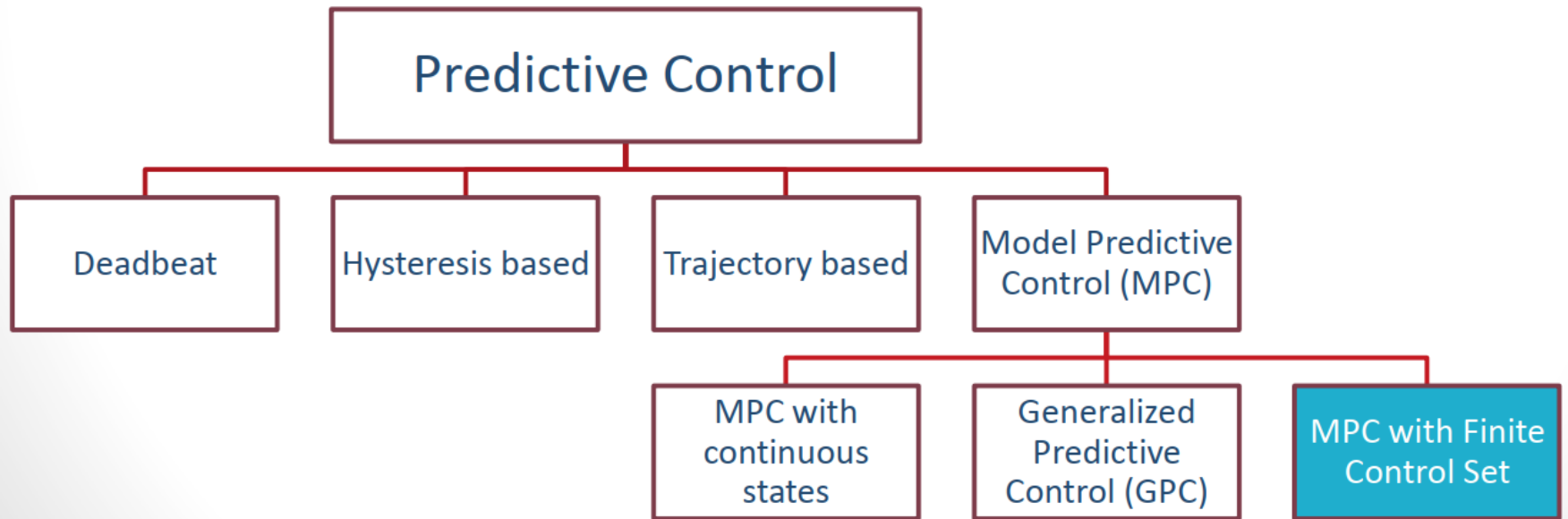
*Phased Locked Loop (PLL)*



[1]



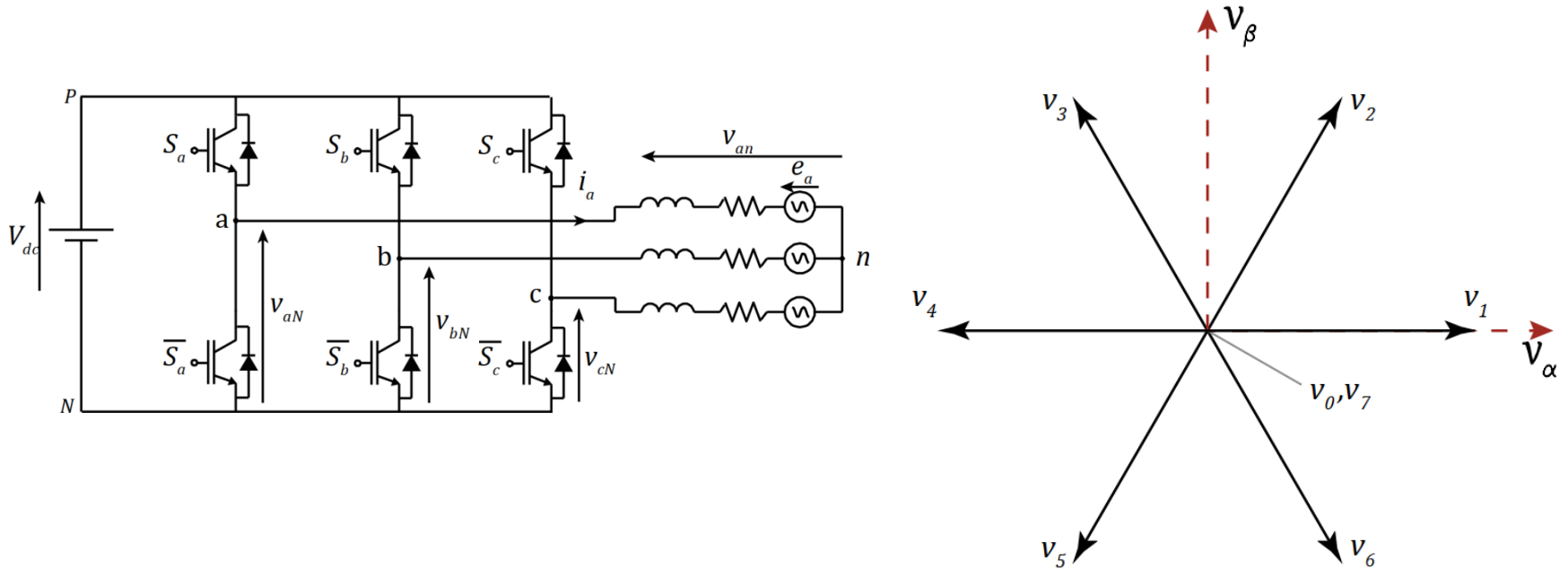
# Controle Preditivo de Corrente



[10]

# Controle Preditivo da Corrente

Controle de corrente no conversor trifásico de dois níveis



$$v = \frac{2}{3} (v_{aN} + a v_{bN} + a^2 v_{cN})$$

$$a = e^{j(2\pi/3)}$$

[10]

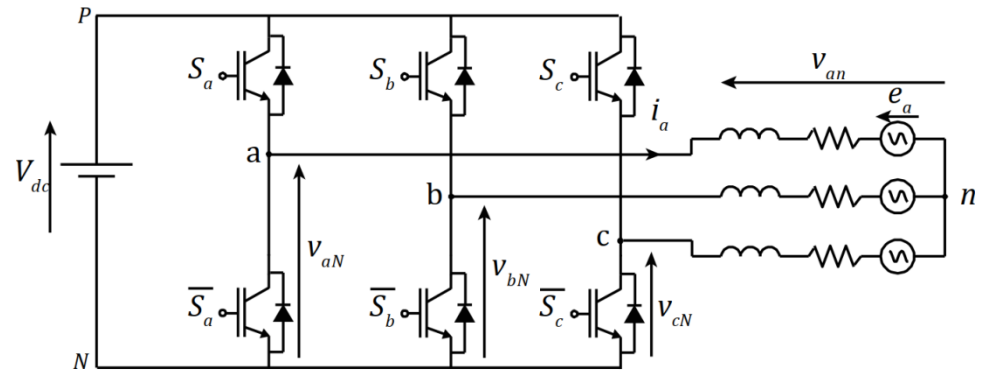
# Controle Preditivo da Corrente

Modelo matemático do inversor

$$i = \frac{2}{3} (i_a + ai_b + a^2 i_c)$$

$$v = \frac{2}{3} (v_a + av_b + a^2 v_c)$$

$$v = Ri + L \frac{di}{dt} + e$$



Discretizar utilizando Euler

$$\frac{di}{dt} \approx \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \quad \Rightarrow \quad v(k) = R \cdot i(k) + L \left( \frac{i(k+1) - i(k)}{T_s} \right) + e(k)$$

Equação para a predição da corrente

$$i^P(k+1) = \left( 1 - \frac{RT_s}{L} \right) i(k) + \frac{T_s}{L} (V(k) - \hat{e}(k)) \quad [10]$$

# Controle Preditivo da Corrente

## O algoritmo:

1. As correntes de referência e de carga são amostradas no instante  $k$ .
2. Utilizando a equação de predição calcular o valor da corrente no seguinte instante de amostragem ( $k+1$ ) para cada vetor de tensão.

$$i^P(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (V(k) - \hat{e}(k))$$

3. Para cada vetor de tensão, calcular a função objetivo (custo):

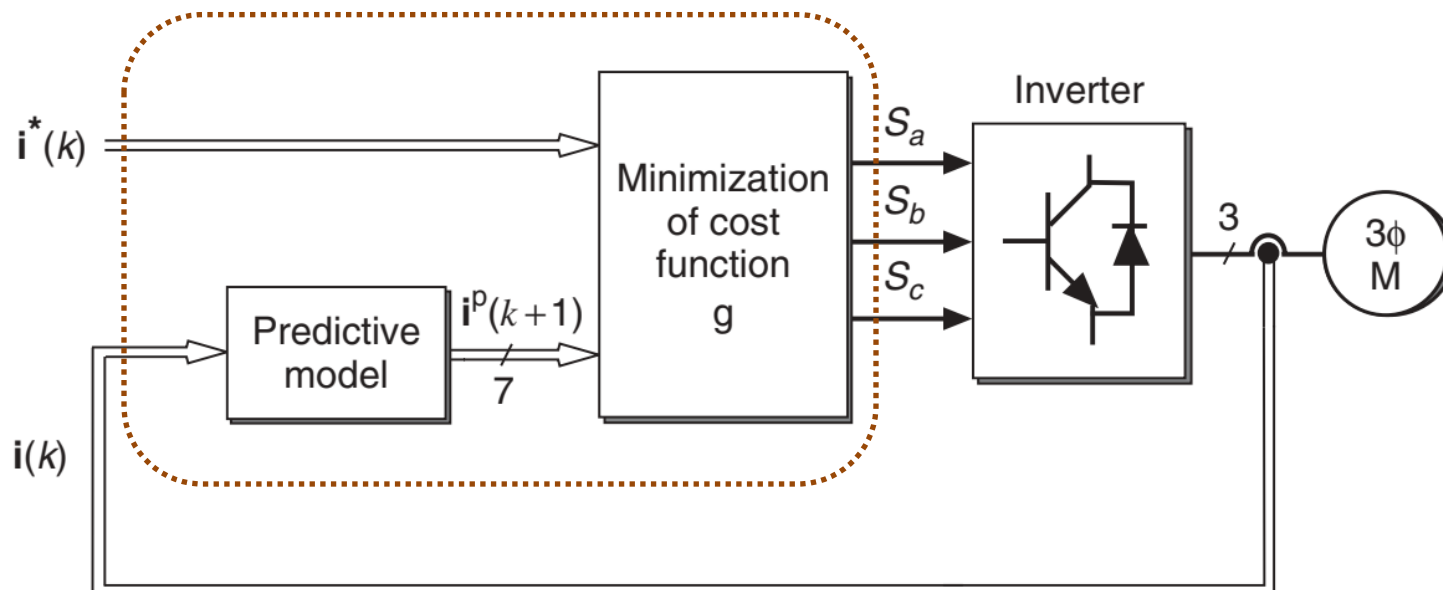
$$g = |i_\alpha^* - i_\alpha^P| + |i_\beta^* - i_\beta^P| \quad (\text{erro})$$

4. Selecionar o vetor de chaveamento que minimiza a função objetivo.

[10]

# Controle Preditivo da Corrente

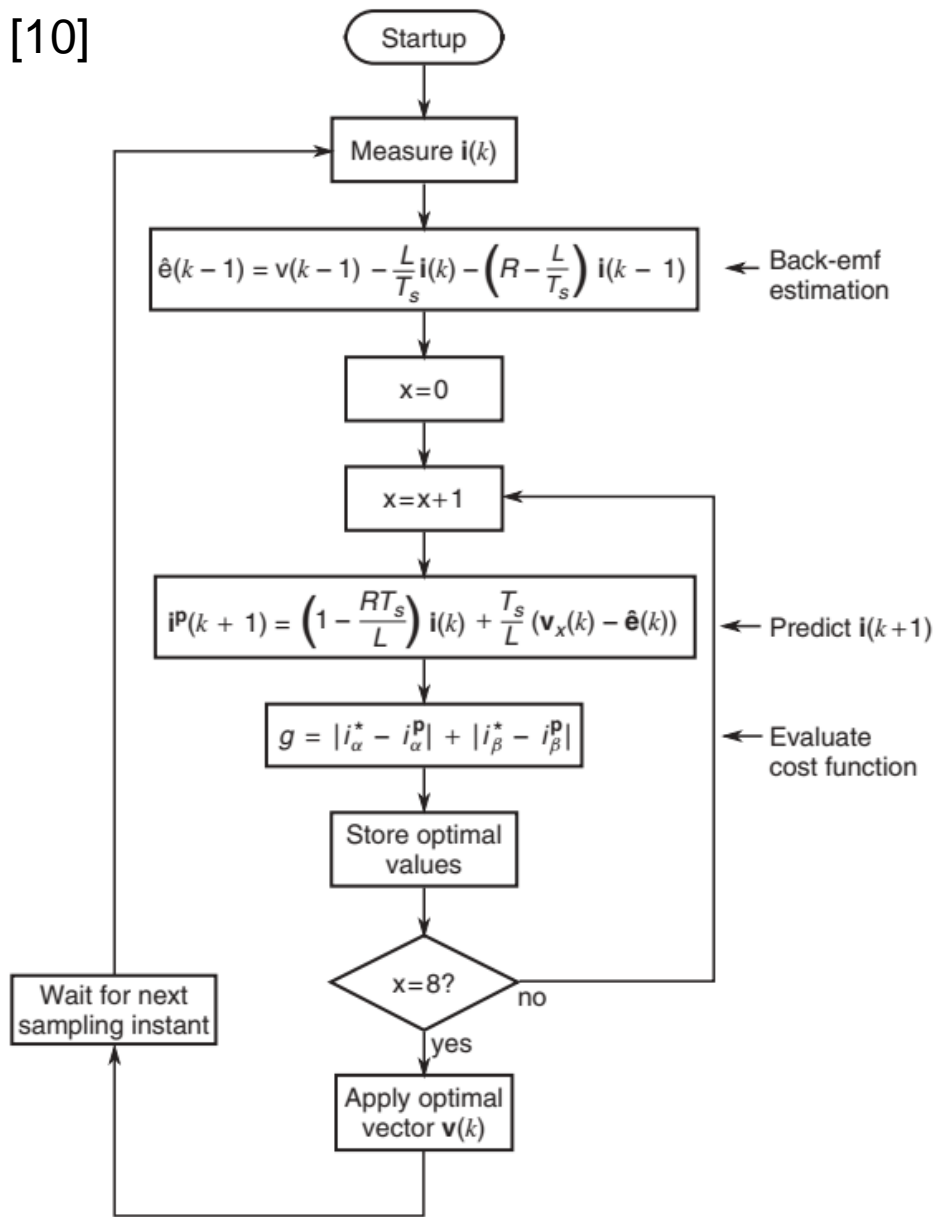
Diagrama de blocos



$$g = |i_{\alpha}^* - i_{\alpha}^P| + |i_{\beta}^* - i_{\beta}^P|$$

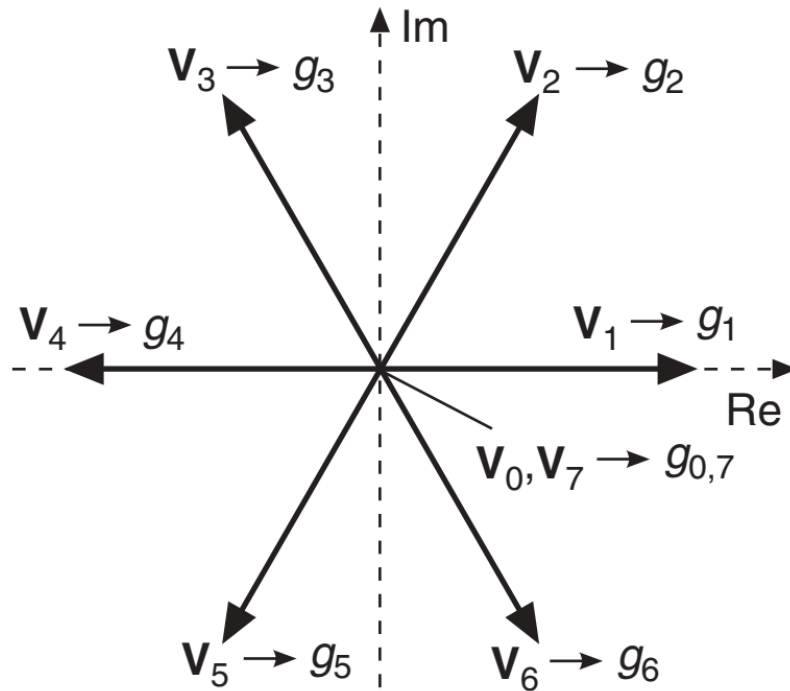
[10]

[10]



1. Medir as correntes de carga.
2. Predizer as correntes de carga para o seguinte instante de amostragem para todas as possibilidades de vetores de chaveamento.
3. Calcular a função objetivo para cada predição.
4. Selecionar o vetor de chaveamento que minimiza a função objetivo.
5. Aplicar o vetor de chaveamento ótimo.

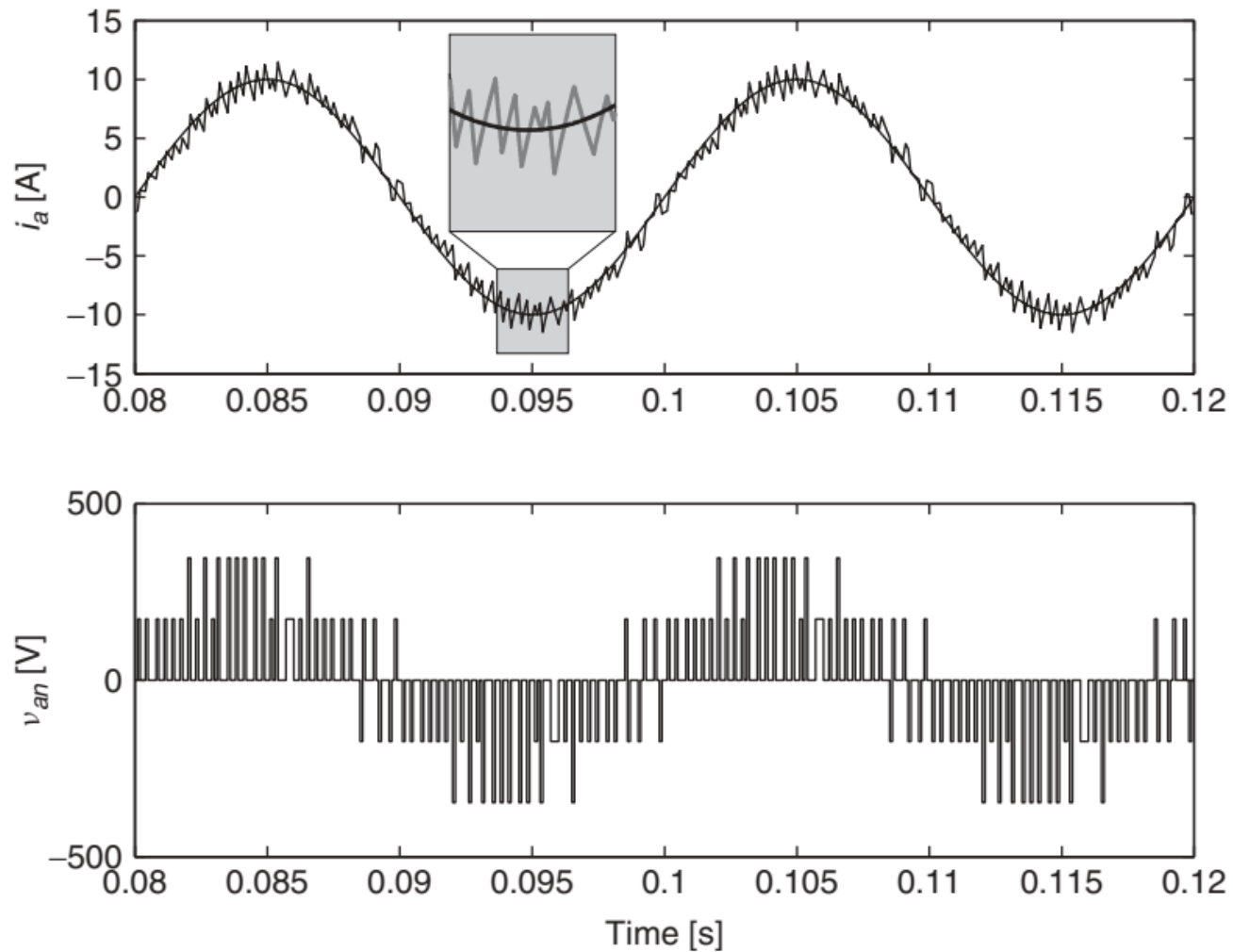
[10]



Vetor de tensão	Função objetivo	
$v_0$	$g_0$	0,6
$v_1$	$g_1$	0,82
$v_2$	$g_2$	0,24
$v_3$	$g_3$	0,42
$v_4$	$g_4$	0,96
$v_5$	$g_5$	1,24
$v_6$	$g_6$	1,19

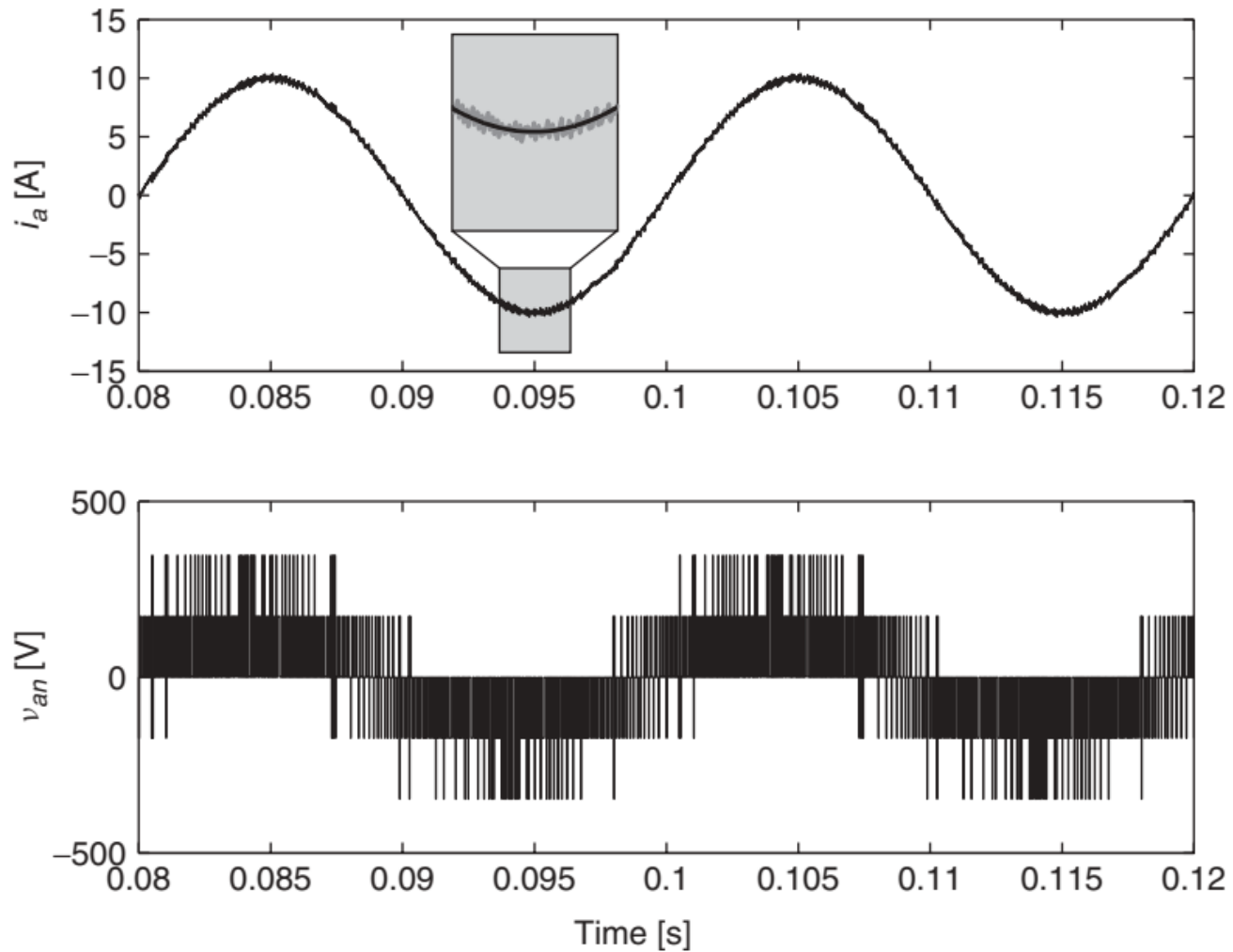
$$i^P(k+1) = \left(1 - \frac{RT_s}{L}\right) i(k) + \frac{T_s}{L} (\underline{V(k)} - \hat{e}(k))$$

- O vetor de tensão  $v_0$  é utilizado para prever  $i_0$  e calcular a função objetivo (error)  $g_0$ .
- O vetor de tensão  $v_1$  é utilizado para prever  $i_1$  e calcular a função objetivo (error)  $g_1$ .
- $g_{min} = g_2$
- Aplicar vetor  $v_2$  no seguinte instante de amostragem.



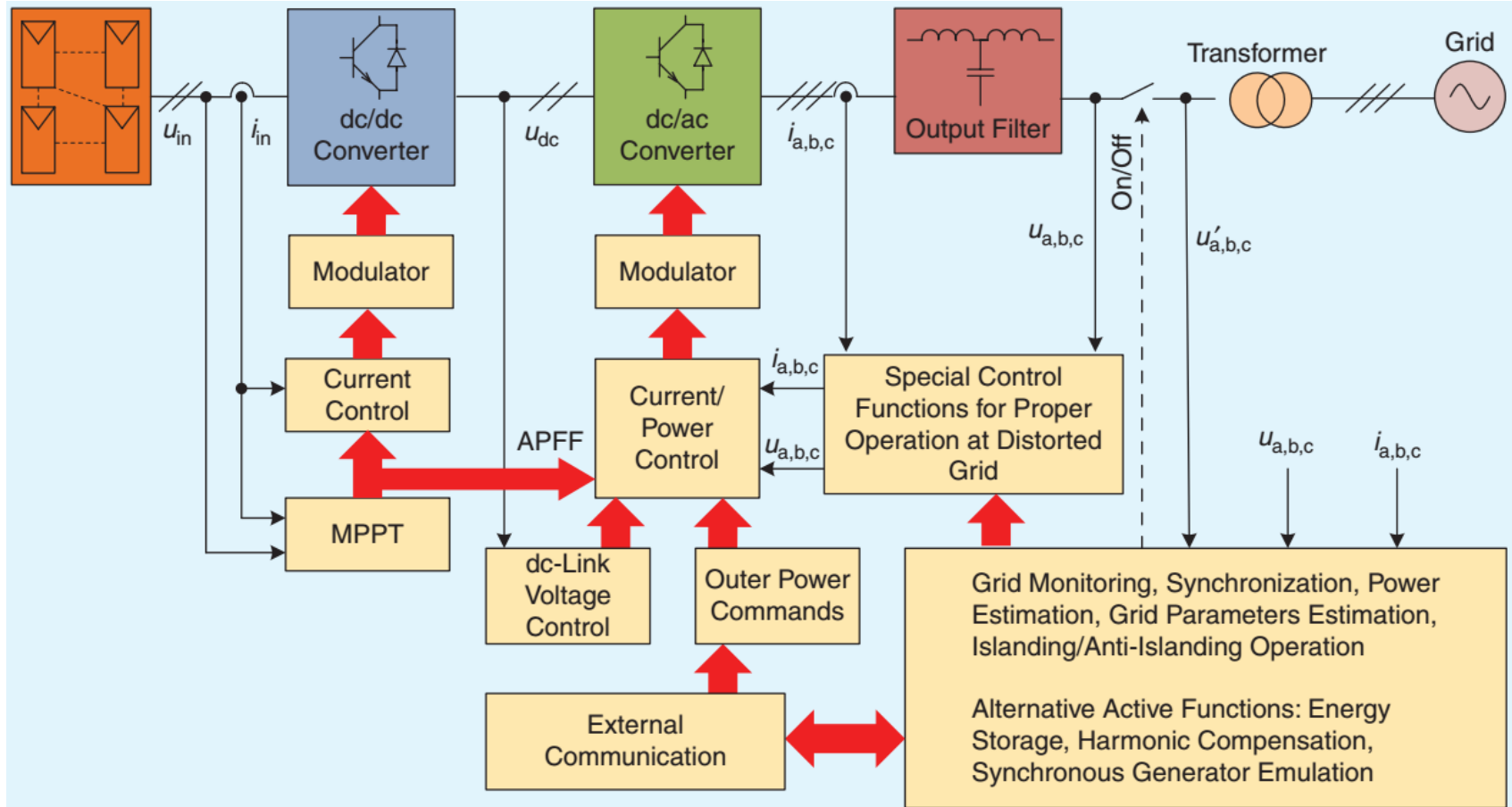
[10] Tensão e corrente na carga em regime permanente para  $T_s = 100 \mu s$





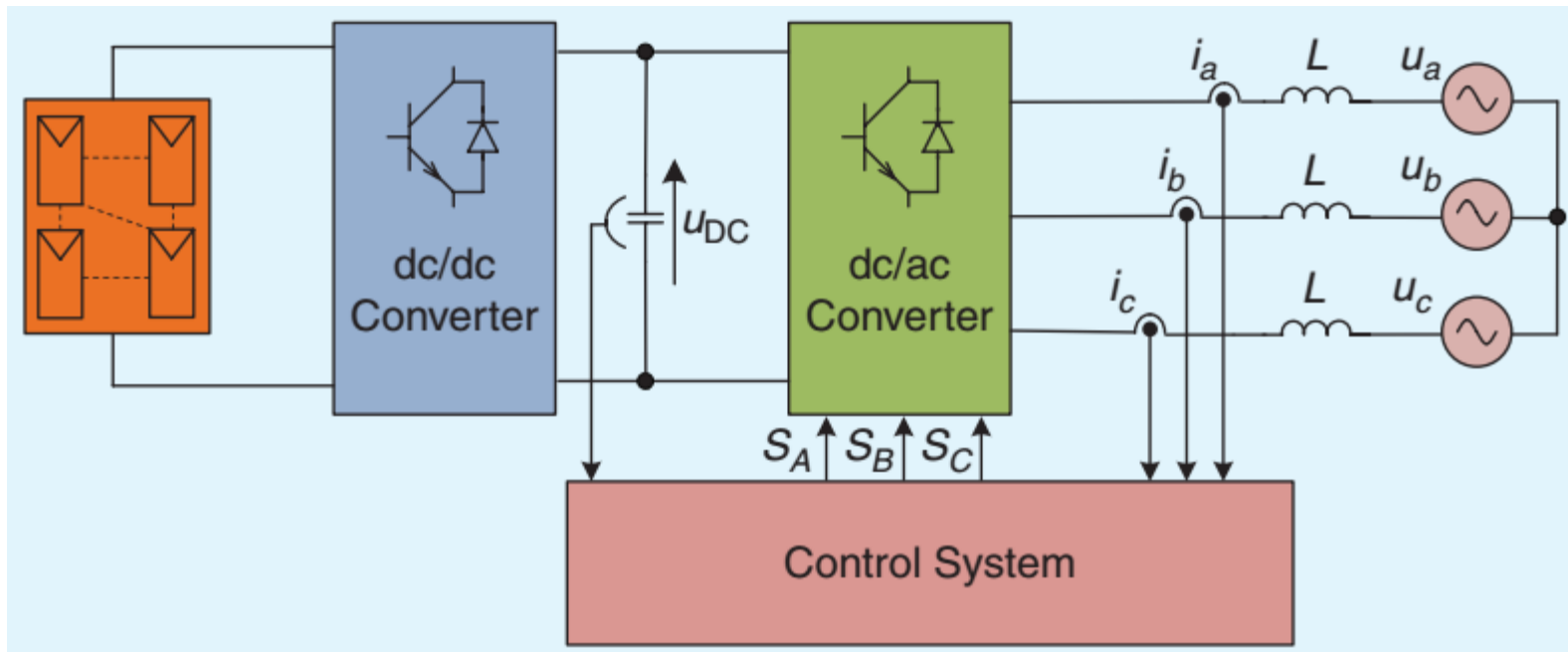
[10] Tensão e corrente na carga em regime permanente para  $T_s = 25 \mu s$

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



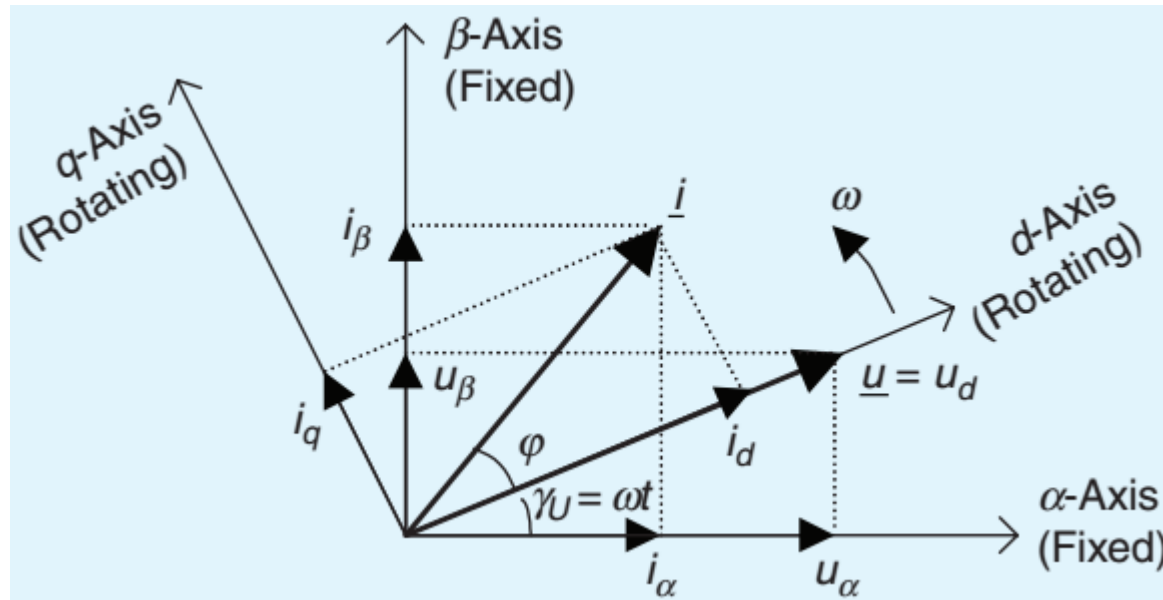
Estrutura geral de um sistema de conversão de energia fotovoltaica [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



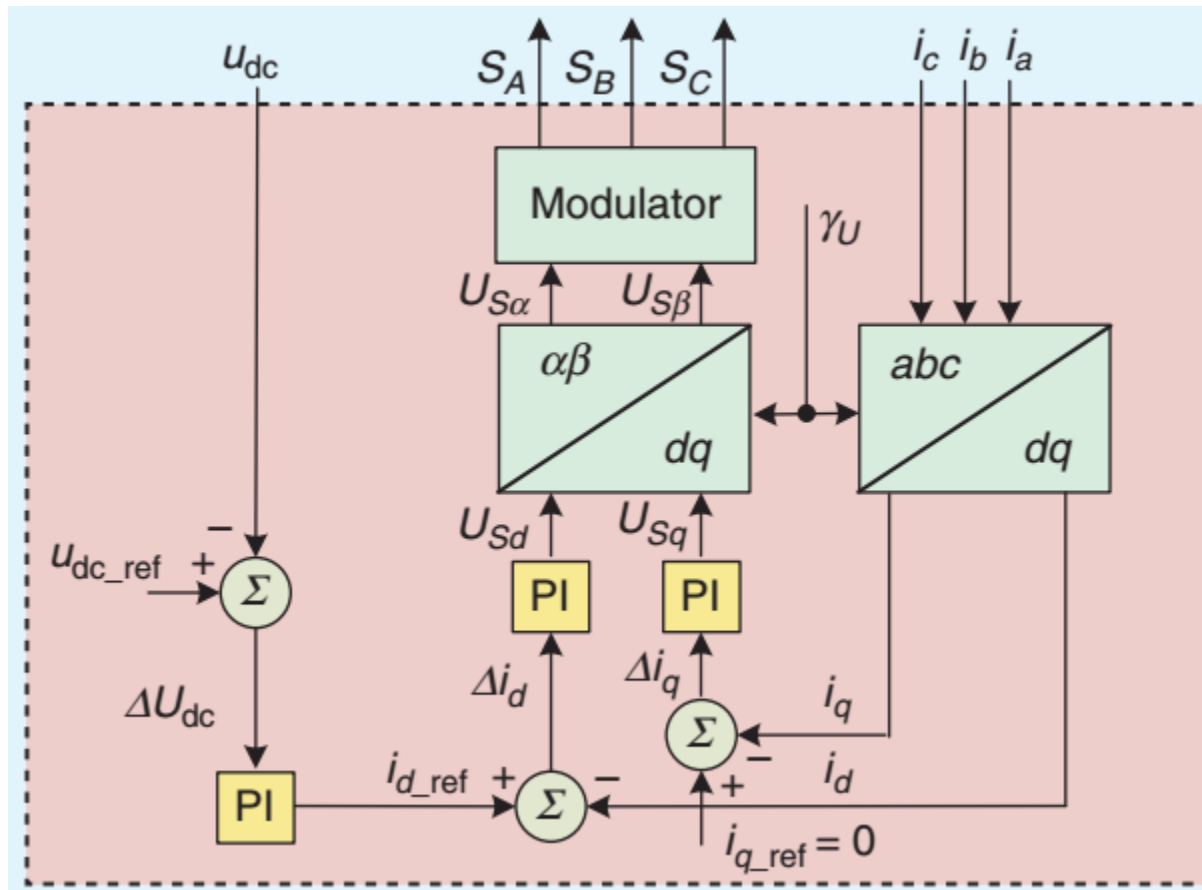
Estrutura simplificada do sistema fotovoltaico [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



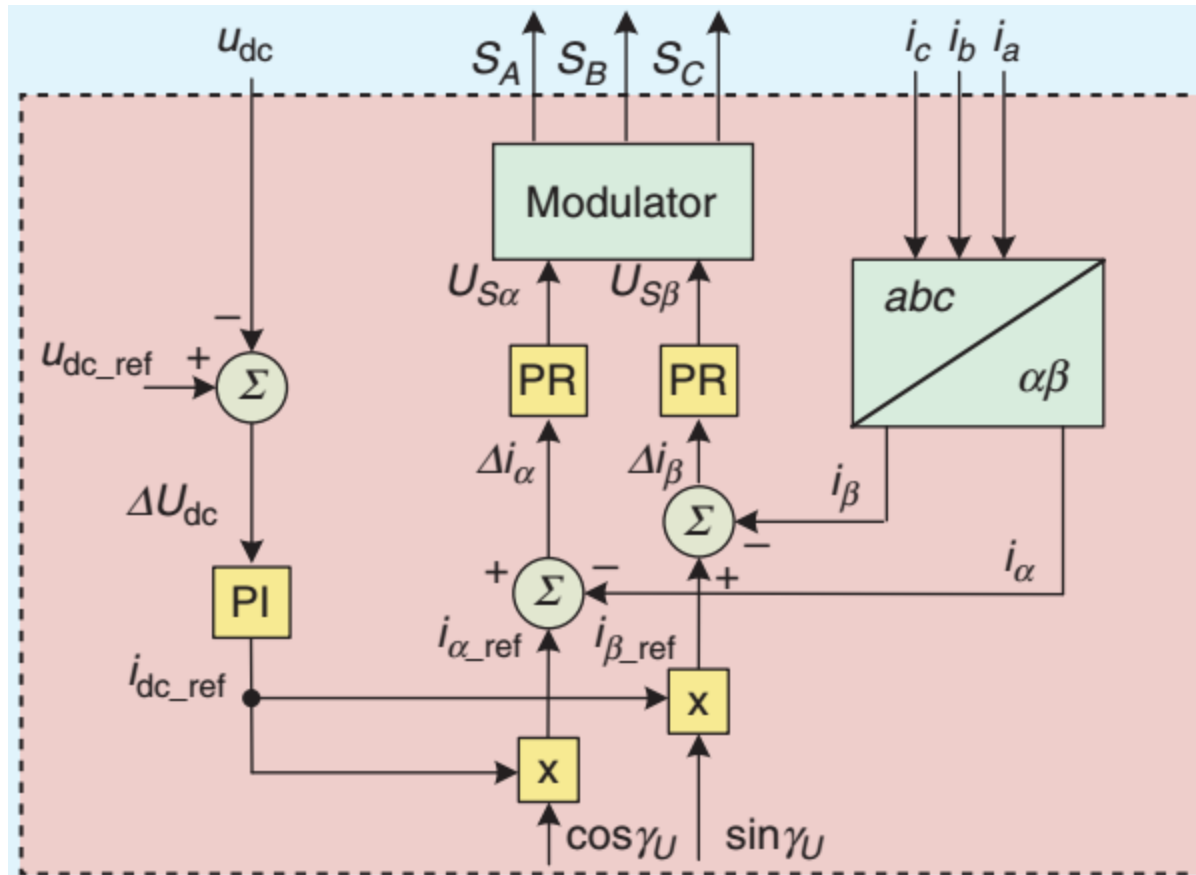
Sistema de referência orientada pela tensão da rede elétrica [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



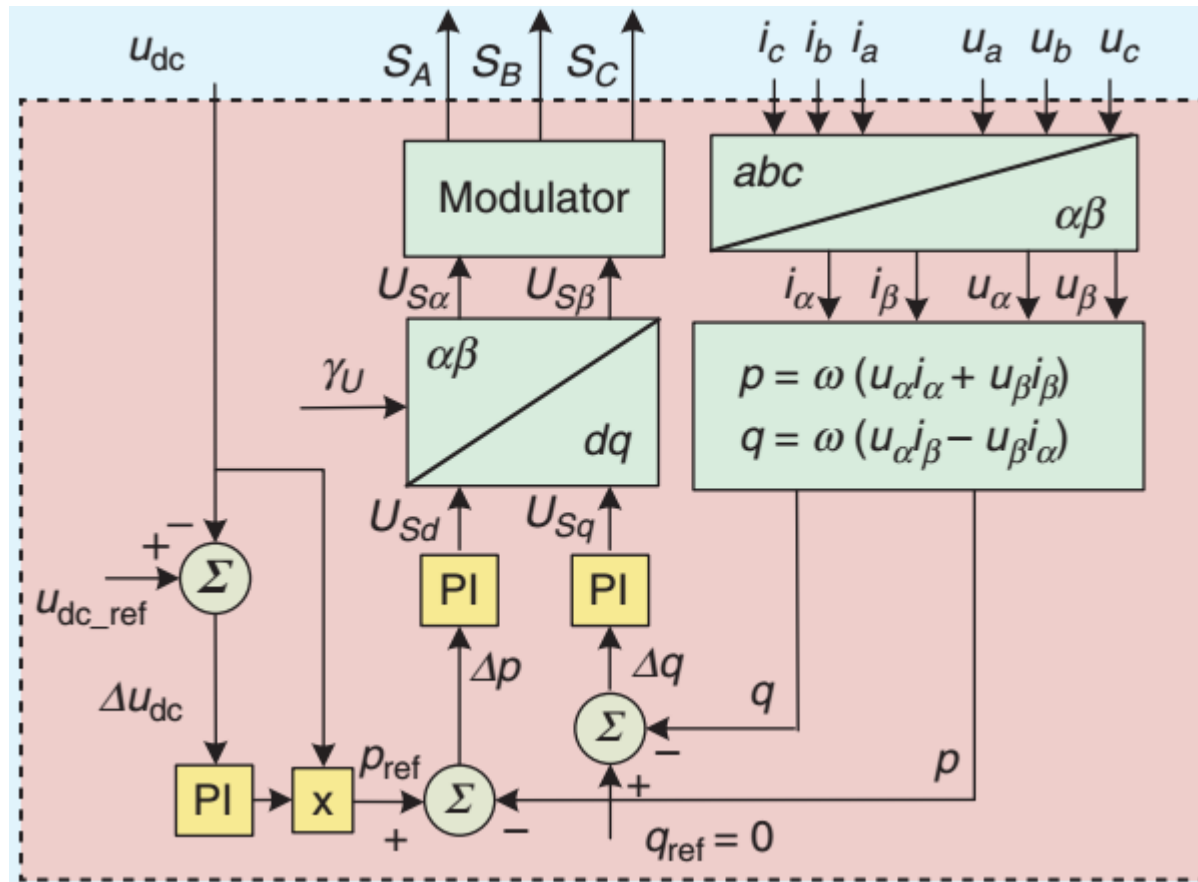
Controle orientado pela tensão no sistema de **referência síncrono** [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



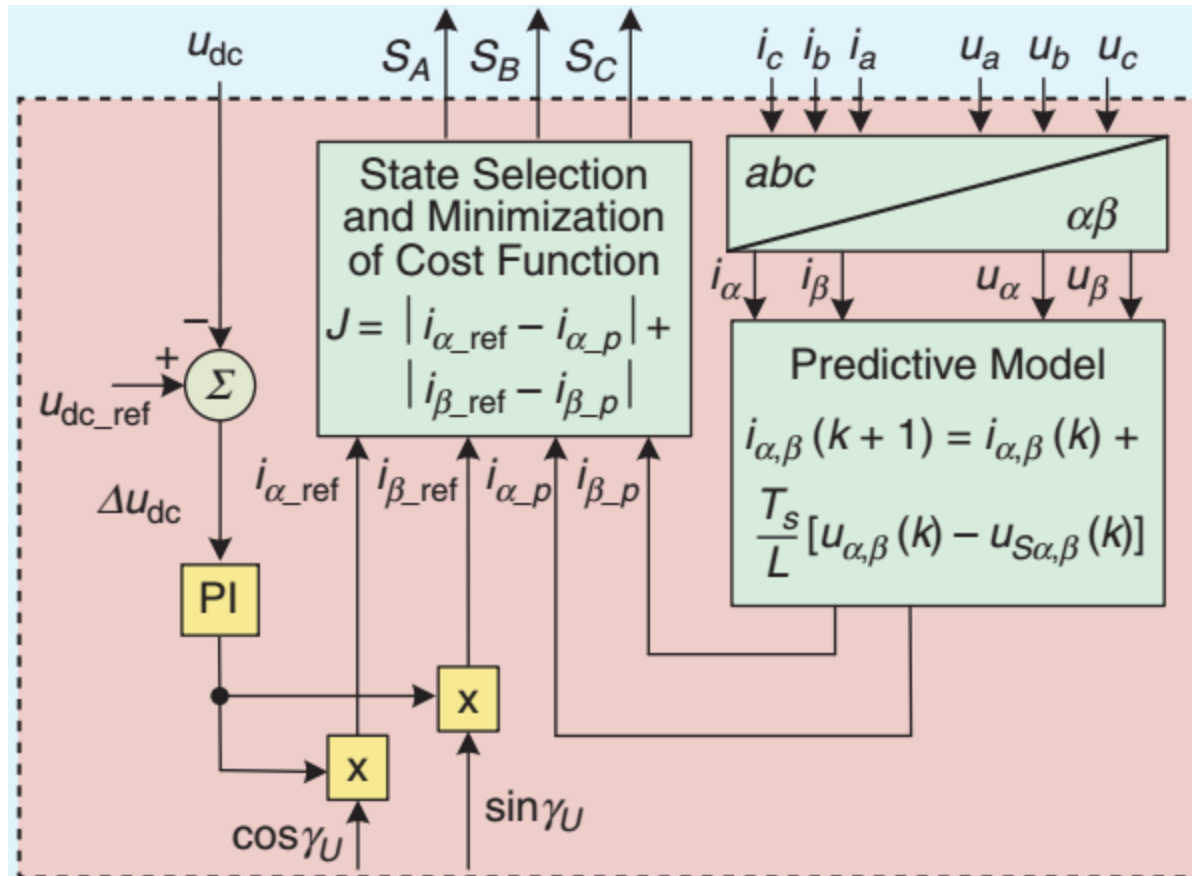
Controle orientado pela tensão no sistema de referência estacionário [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



Controle direto de potência com modulação por vetores espaciais [3]

# Sistema Fotovoltaico Conectado à Rede Elétrica



Controle preditivo baseado no modelo [3]



# Referências Bibliográficas

1. G. Abad; J. López; M.A. Rodríguez; L. Marroyo; G. Iwanski; Doubly Fed Induction Machine, Wiley, 2011.
2. Paolo Tenti, Alessandro Costabeber, "Smart micro-grids: properties, trends and local control of energy sources", slides da apresentação na UNICAMP, 2012.
3. E. Romero-Cadaval, B. Francois, M. Malinowski and Q. C. Zhong, "Grid-Connected Photovoltaic Plants: An Alternative Energy Source, Replacing Conventional Sources," in *IEEE Industrial Electronics Magazine*, vol. 9, no. 1, pp. 18-32, March 2015.
4. RASHID, M.H. Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações. Ed. São Paulo: Makron Books, 1999.
5. MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. Power Electronics: Converters Applications and Design 2. Ed. New York: Editora John Wiley & Sons, 1995.
6. D.N.S. Freitas, "Controlo de um Inversor Monofásico para Ligação à Rede de um Gerador Síncrono de Ímanes Permanentes", dissertação de mestrado, IPB, Portugal, 2013.
7. S. Samerchur, S. Premrudeepreechacharn, Y. Kumsuwun and K. Higuchi, "Power control of single-phase voltage source inverter for grid-connected photovoltaic systems," *2011 IEEE/PES Power Systems Conference and Exposition*, Phoenix, AZ, 2011, pp. 1-6.
8. A. Chatterjee and K. B. Mohanty, "A nested control strategy for single phase power inverter integrating renewable energy systems in a microgrid," *2016 National Power Systems Conference (NPSC)*, Bhubaneswar, India, 2016, pp. 1-6.
9. F. E. Aamri, H. Maker, A. Mouhsen and M. Harmouchi, "A new strategy to control the active and reactive power for single phase grid-connected PV inverter," *2015 3rd International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, Marrakech, 2015, pp. 1-6.
10. Jose Rodriguez, Patricio Cortes; Predictive Control of Power Converters and Electrical Drives; Wiley-IEEE Press; 2012.