



Universidade Federal do ABC

Universidade Federal do ABC

Pós-graduação em Engenharia Elétrica

# Aplicações de Conversores Estáticos de Potência

---

José L. Azcue, Prof. Dr.

- ✓ *Acionamento do Motor de Indução Trifásico*
  - ✓ *Controle por orientação de campo (FOC)*
  - ✓ *Controle direto de torque (DTC)*

# Introdução

**O Motor de Indução Trifásico (MIT)** é usado largamente em aplicações industriais, por sua **simplicidade na construção**, **confiabilidade**, **robustez** e **baixo custo**.

- Em comparação com os motores de corrente contínua, podem ser usados em ambientes perigosos por não apresentarem **problemas associados ao faiscamento**.
- Capacidade de **resposta rápida do torque**.
- Capacidade de **resposta rápida da velocidade** (devido à baixa inercia).

**Os motores CC** são mais fáceis de controlar

- Apresentam alto desempenho com um controle relativamente simples.
- O controle do torque e fluxo é **desacoplado naturalmente**.

# Introdução

## Acionamento do MIT

### Controle Escalar

- Controle da **magnitude** da **corrente/tensão** e a **frequência** baseado no **modelo em regime permanente** (ignora os transitórios)
  - **Para acionadores de baixo desempenho**
- Implementação relativamente simples
- Acoplamento inerente entre o torque e o fluxo (ambos são funções da tensão e frequência)
- Resposta lenta
- Facilmente propenso à instabilidade

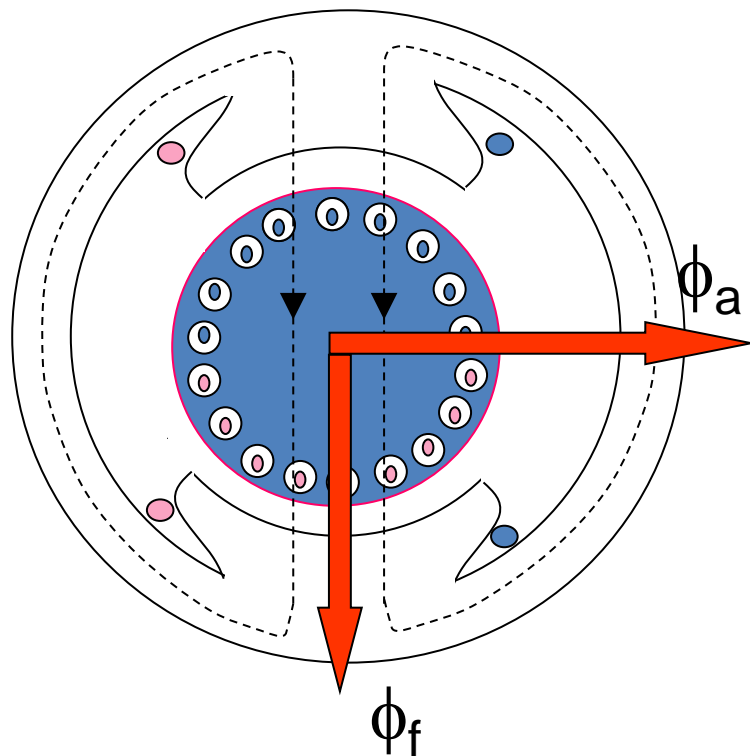
### Controle Vetorial ou Controle por Campo Orientado

- controle da **magnitude e fase** de **correntes e tensões** baseados no **modelo dinâmico** (comportamento em regime transitório e permanente)
  - **Para acionadores de alto desempenho**
- Implementação relativamente complexa
- Controle desacoplado do torque e fluxo (similar aos acionadores CC)
- Adequado para uma variedade muito ampla de aplicações.

# Controle por orientação de campo (FOC)

1. Princípios básicos
2. Controle por orientação de campo - indireto
3. Controle por orientação de campo - direto

# Princípios básicos do motor CC



- Correntes entrando
- Correntes saindo

Mantendo o **fluxo constante** ( $\phi_f$ ), pode-se **controlar** o torque controlando a **corrente de armadura** ( $I_a$ ).

$$T_e = K \cdot \phi_f \cdot I_a$$

$I_a$  e  $\phi_f$  são **sempre perpendiculares** e portanto desacoplados. Então:

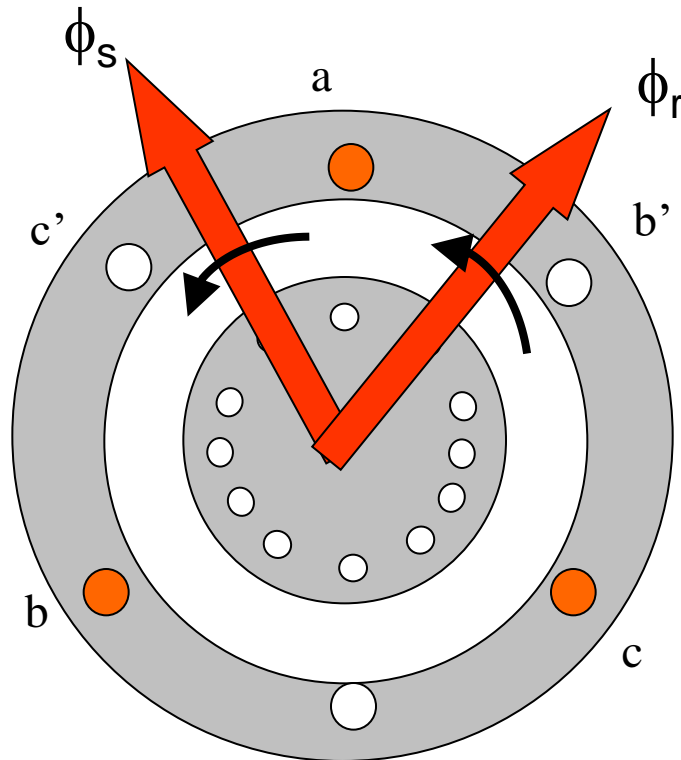
$$T_e = K \cdot \phi_f \cdot I_a$$

$$T_e = K_1 \cdot I_f \cdot I_a \cdot \sin(90^\circ)$$

$$T_e = K_1 \cdot I_f \cdot I_a$$

$I_a$ ,  $I_f$ ,  $\phi_a$  e  $\phi_f$  são **vetores espaciais**.

# Princípios Básicos do Motor de Indução



Corrente de estator produz  
O **fluxo do estator**.

O **fluxo do estator** induz  
uma **FEM** que gera uma  
corrente no Rotor que por  
sua vez gera o **fluxo do rotor**.

A interação entre o fluxo do  
estator e rotor gera o  
**torque eletromagnético**.

O ângulo espacial entre os  
fluxos varia com a carga e  
velocidade.

# Modelo Dinâmico do Motor de Indução

Modelo dinâmico do motor de indução trifásico no sistema de referência arbitrário.

$$\vec{v}_s = R_s \vec{i}_s + p \vec{\lambda}_s + j \omega \vec{\lambda}_s$$

$$\vec{v}_r = R_r \vec{i}_r + p \vec{\lambda}_r + j(\omega - \omega_r) \vec{\lambda}_r$$

$$p = d/dt$$

$$\vec{\lambda}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r$$

$$\vec{\lambda}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s$$

$$L_r = L_{lr} + L_m$$

$$L_s = L_{ls} + L_m$$

Todas as grandezas estão referidas ao lado do estator.

Equação do Torque:

$$\frac{J}{P} p \omega_r = T_e - T_L$$
$$T_e = \frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j \vec{\lambda}_s \vec{i}_s^*) = -\frac{3P}{2} \operatorname{Re}(j \vec{\lambda}_r \vec{i}_r^*)$$

P = pares de pólos

# Torque Eletromagnético: MIT e Motor CC

Torque eletromagnético:

$$T_e = \frac{3}{2} P \bar{\Psi}_s \times \bar{\mathbf{i}}_s$$

O em função do fluxo do rotor (para comparação com o torque do motor CC)

$$T_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r \times \bar{\mathbf{i}}_s$$

Então, se o ângulo entre  $\bar{\Psi}_s$  (ou  $\bar{\Psi}_r$ ) e  $\bar{\mathbf{i}}_s$  é ajustado em  $90^\circ$ , então o MIT se comporta como um **motor CC**

$$T_e = k' I_f I_a = k |\bar{\Psi}_f| |\bar{\mathbf{i}}_a| \sin 90^\circ = k (\bar{\Psi}_f \times \bar{\mathbf{i}}_a)$$



# Princípios do Controle por Orientação de Campo

- Se o ângulo entre  $\bar{\Psi}_s$  (ou  $\bar{\Psi}_r$ ) e  $\bar{i}_s$  é ajustado em  $90^\circ$ , ENTÃO o MIT se comportara como um motor CC.

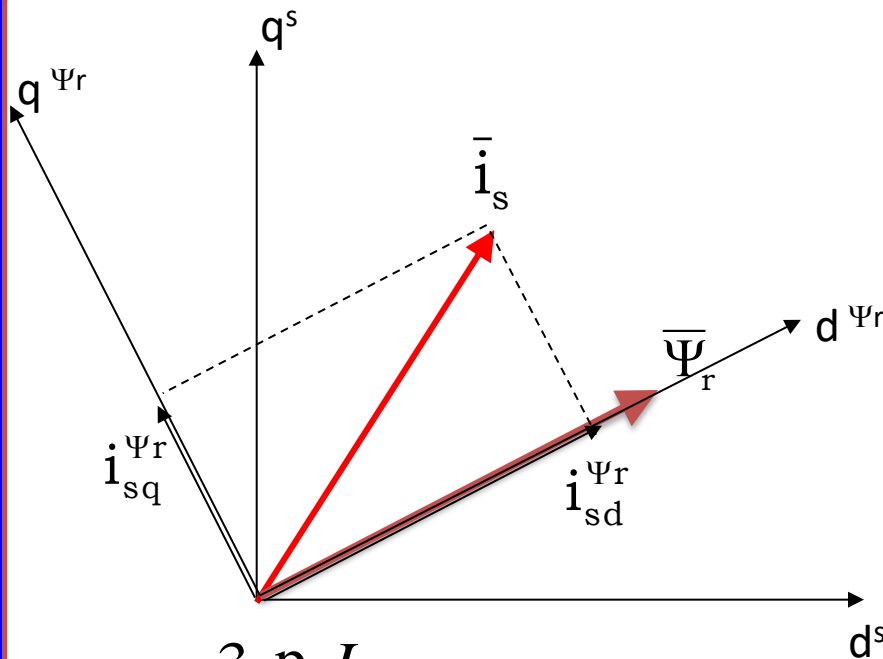
Isto é possível através da orientação (alinhamento) do sistema de referência  $dq$  com  $\bar{\Psi}_r$  ou  $\bar{\Psi}_s$

**Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor**

**Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Estator**

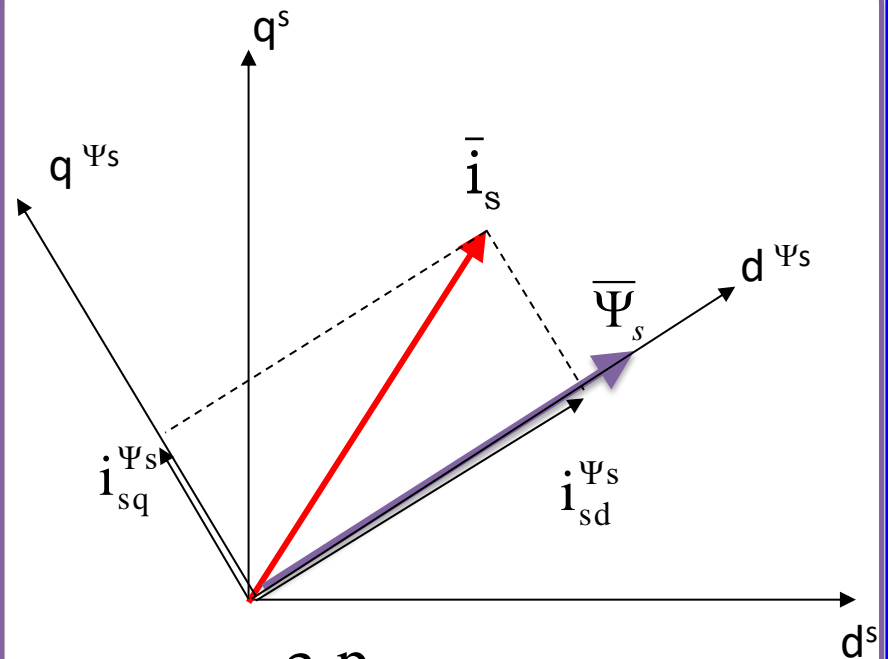
# Princípios do Controle por Orientação de Campo

## Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor



$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd})$$

## Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Estator



$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd})$$

# Princípios do Controle por Orientação de Campo

Torque Eletromagnético

$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{\bar{\Psi}_s \times \bar{i}_s}{2} = \frac{3p}{2} \mathcal{Re}\{ j \bar{\Psi}_s \bar{i}_s^* \}$$

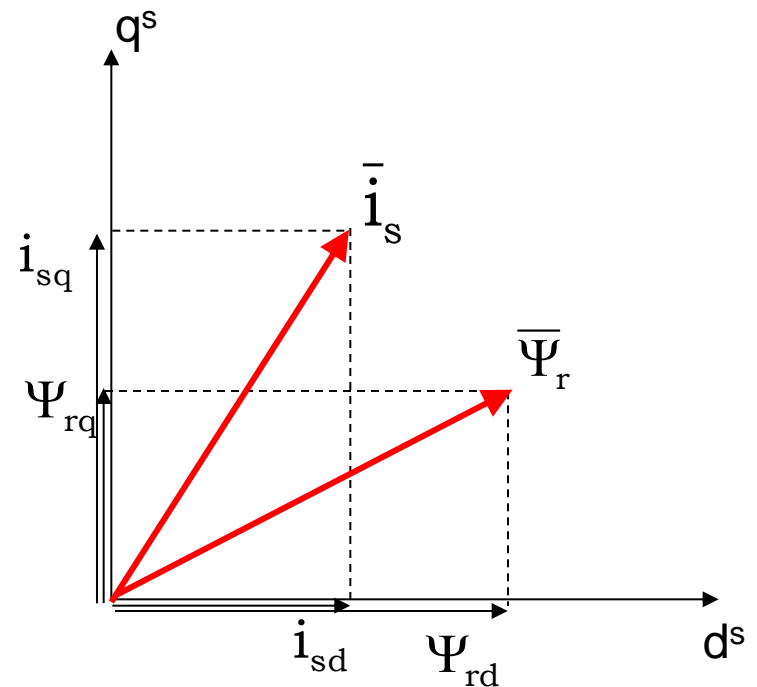
$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{L_m}{L_r} \bar{\Psi}_r \times \bar{i}_s$$

$p$  = número de pólos

# Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

Torque no sistema de  
referência estacionário

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} \dot{i}_{sq} - \psi_{rq} \dot{i}_{sd})$$



# Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

No referencial alinhado com o fluxo do rotor

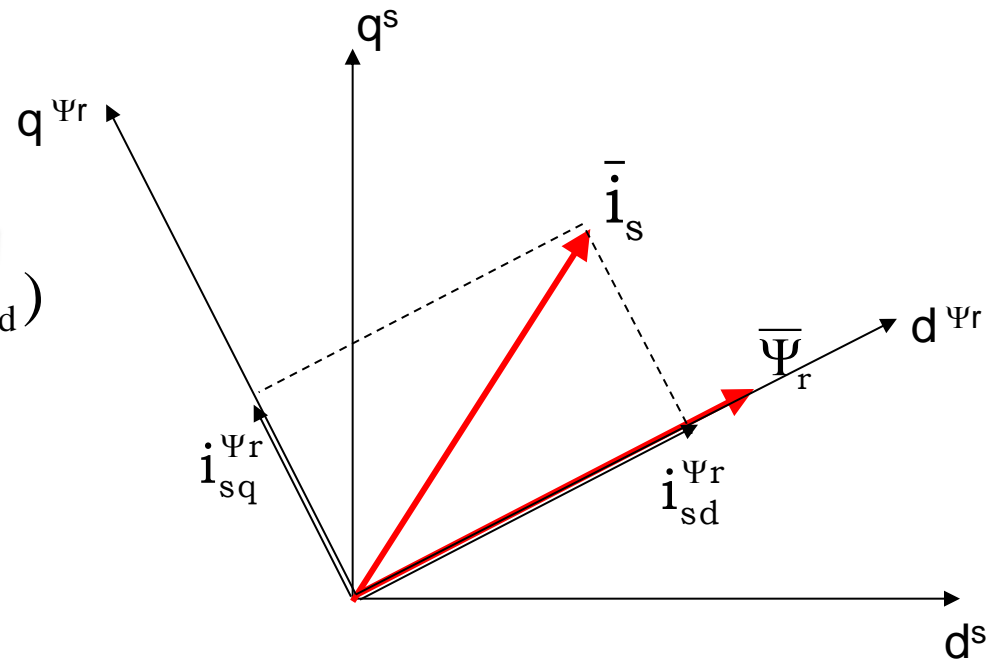
$$\psi_{rd}^{\Psi_r} = |\bar{\Psi}_r|$$

$$\psi_{rq}^{\Psi_r} = 0$$

Torque no sistema de  
referência girante

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} (\psi_{rd} i_{sq} - \psi_{rq} i_{sd})$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{2} \frac{L_m}{L_r} \psi_r i_{sq}^{\Psi_r}$$



# Controle de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

Para implementar o FOC alinhado com o fluxo do rotor é necessário **conhecer a posição do fluxo do rotor**.

## (i) FOC - Indireto

Se obtém o **ângulo do fluxo do rotor** através da velocidade síncrona ( $\omega_{\psi r} = \omega_r + \omega_{slip}$ )

Tensão no rotor

$$0 = R_r \bar{i}_r^g + \frac{d\bar{\psi}_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \bar{\psi}_r^g$$

Fluxo no rotor

$$\bar{\psi}_r^g = L_r \bar{i}_r^g + L_m \bar{i}_s^g$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \bar{\psi}_r^g - \frac{L_m R_r}{L_r} \bar{i}_s^g + \frac{d\bar{\psi}_r^g}{dt} + j(\omega_g - \omega_r) \bar{\psi}_r^g$$

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \psi_r - \frac{L_m R_r}{L_r} (i_{sd}^{\psi r} + j i_{sq}^{\psi r}) + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_{slip}) \psi_r$$

# FOC - Indireto

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \psi_r - \frac{L_m R_r}{L_r} (i_{sd}^{\psi_r} + j i_{sq}^{\psi_r}) + \frac{d\psi_r}{dt} + j(\omega_{slip}) \psi_r$$

componente d  
da tensão do rotor  
(real)

componente q  
da tensão do rotor  
(imaginário)

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \psi_r - \frac{L_m R_r}{L_r} i_{sd}^{\psi_r} + \frac{d\psi_r}{dt}$$

$$0 = -\frac{L_m R_r}{L_r} i_{sq}^{\psi_r} + (\omega_{slip}) \psi_r$$

$$i_{sd}^{\psi_r *} = \frac{\psi_r^*}{L_m}$$

Eq. (1)

$$(\omega_{slip}) = \frac{L_m R_r}{\psi_r^* L_r} i_{sq}^{\psi_r}$$

$$(\omega_{slip}) = \frac{R_r}{L_r} \frac{i_{sq}^{\psi_r *}}{i_{sd}^{\psi_r *}}$$

Eq. (2)

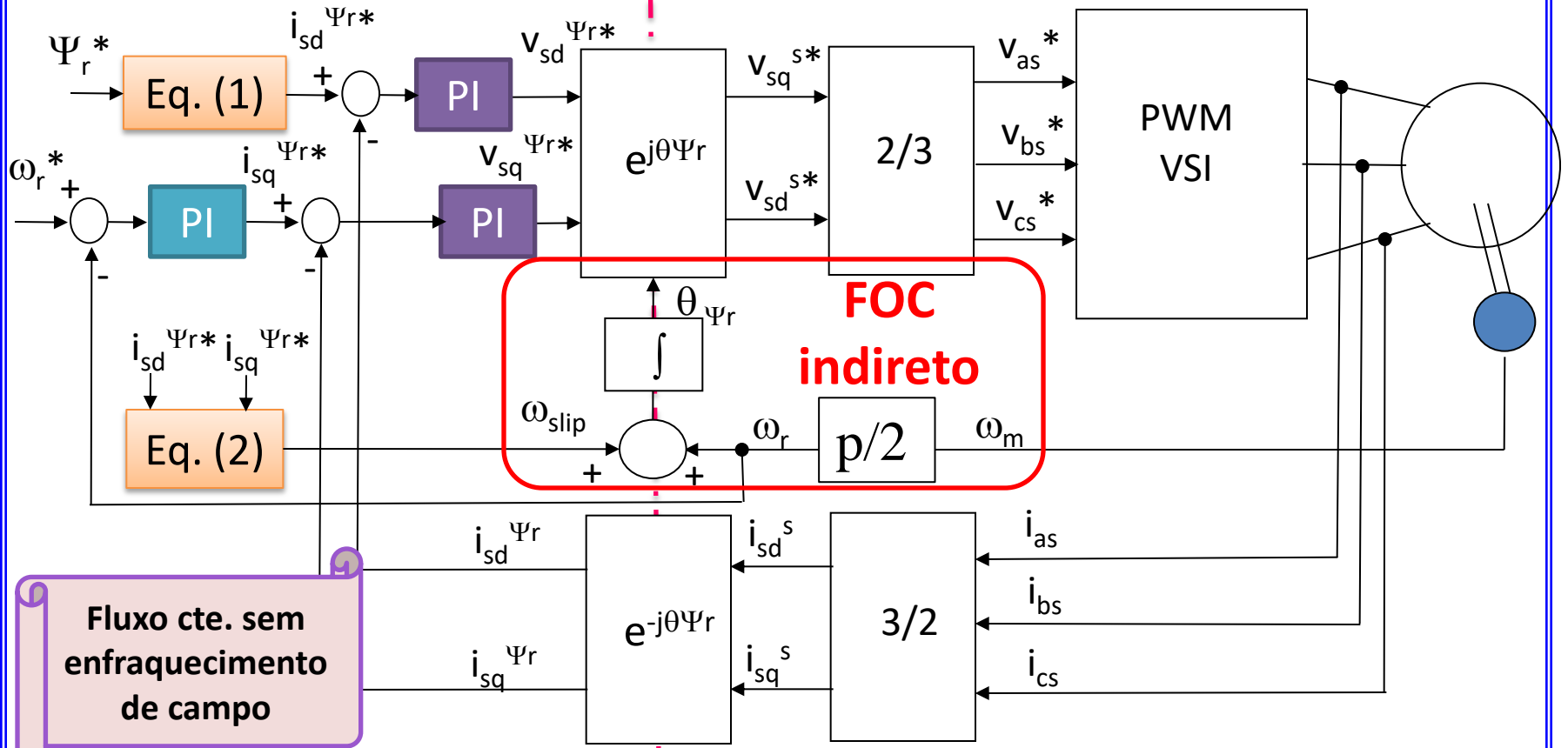
$$i_{sq}^{\psi_r *} = \frac{4T_e^*}{3p\psi_r} \frac{L_r}{L_m}$$

Eq. (3)

# Controle Indireto de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor



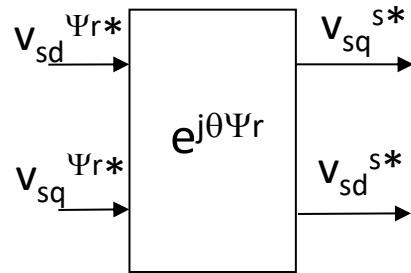
Referencial girante ( $d^{\Psi_r} q^{\Psi_r}$ ) | Referencial estacionário ( $d^s q^s$ )





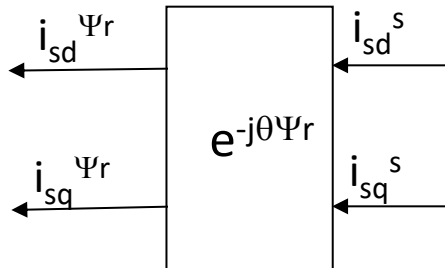
# Controle Indireto de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

- Transformação  $d^{\Psi_r}q^{\Psi_r} \rightarrow d^s q^s$  (Transf. Inversa de Park)



$$\begin{bmatrix} x_{sd}^s \\ x_{sq}^s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\Psi_r} & -\sin \theta_{\Psi_r} \\ \sin \theta_{\Psi_r} & \cos \theta_{\Psi_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sd}^{\Psi_r} \\ x_{sq}^{\Psi_r} \end{bmatrix}$$

- Transformação  $d^s q^s \rightarrow d^{\Psi_r} q^{\Psi_r}$  (Transf. de Park)



$$\begin{bmatrix} x_{sd}^{\Psi_r} \\ x_{sq}^{\Psi_r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta_{\Psi_r} & \sin \theta_{\Psi_r} \\ -\sin \theta_{\Psi_r} & \cos \theta_{\Psi_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{sd}^s \\ x_{sq}^s \end{bmatrix}$$

# Controle Direto de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

## (ii) FOC - Direto

O ângulo do rotor é obtido através da medição direta ou utilizando o modelo do fluxo (através de um estimador).

O **fluxo do estator** pode ser estimado através de:

$$\psi_{sdq}^s = \int \left( v_{sdq}^s - R_s i_{sdq}^s \right) + \psi_{sdq}^s(0) \quad \text{Eq. (4)}$$

E o **fluxo do rotor** pode ser estimado através de:

$$\Psi_{rdq}^s = \frac{L_r'}{L_m} \left( \Psi_{sdq}^s - \sigma L_s i_{sdq}^s \right) \quad \text{Eq. (5)}$$

# Controle Direto de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor

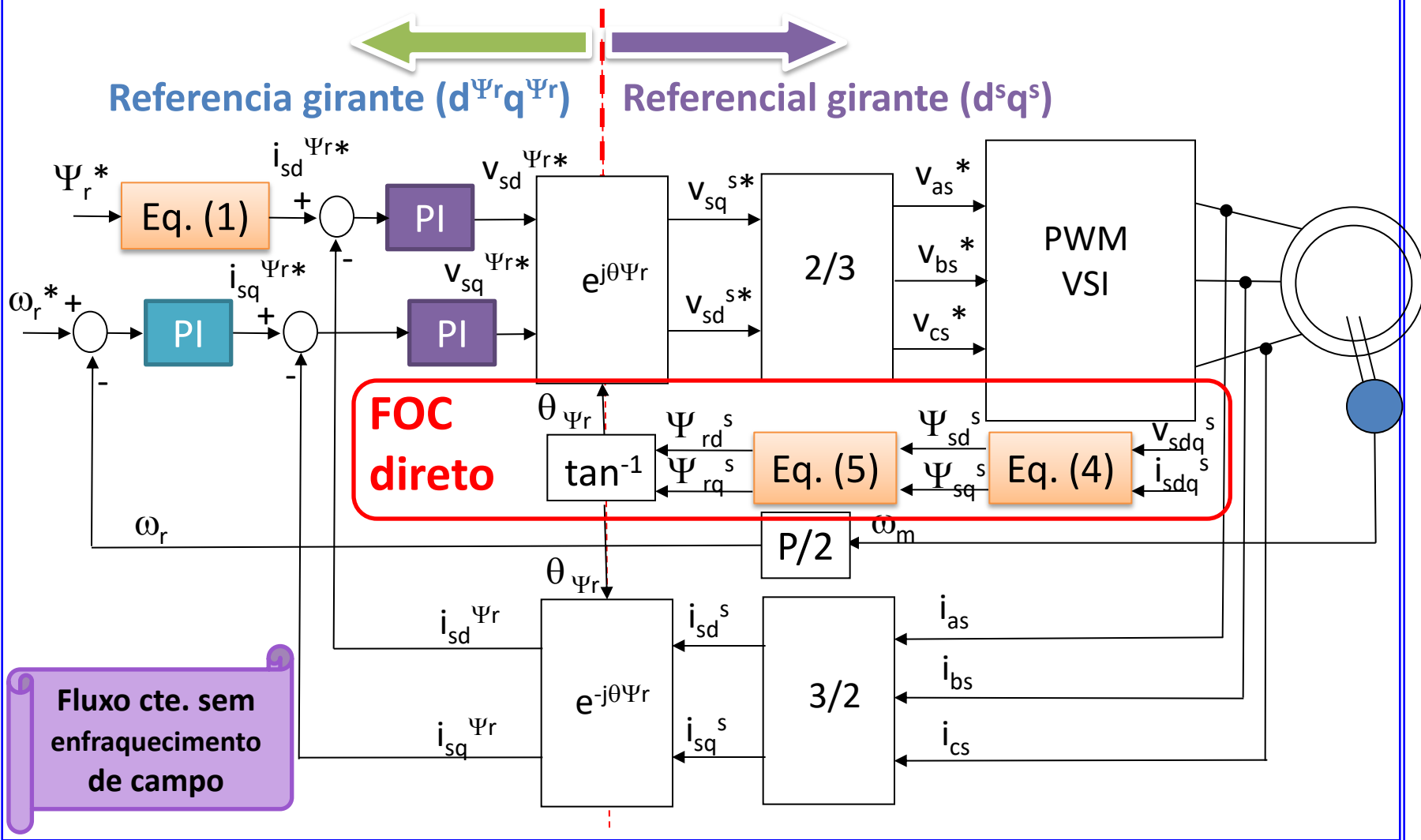
Outra forma de estimar o **fluxo do rotor**, considere a expressão para a tensão no rotor:

$$0 = \frac{R_r}{L_r} \bar{\psi}_r^s - \frac{L_m}{L_r} R_r \bar{i}_s^s + \frac{d\bar{\psi}_r^s}{dt} - j\omega_r \bar{\psi}_r^s \quad \text{No sistema de referência estacionário}$$

$$\bar{\psi}_r^s = \int \left( \frac{L_m}{L_r} R_r \bar{i}_s^s - \frac{R_r}{L_r} \bar{\psi}_r^s + j\omega_r \bar{\psi}_r^s \right) dt$$

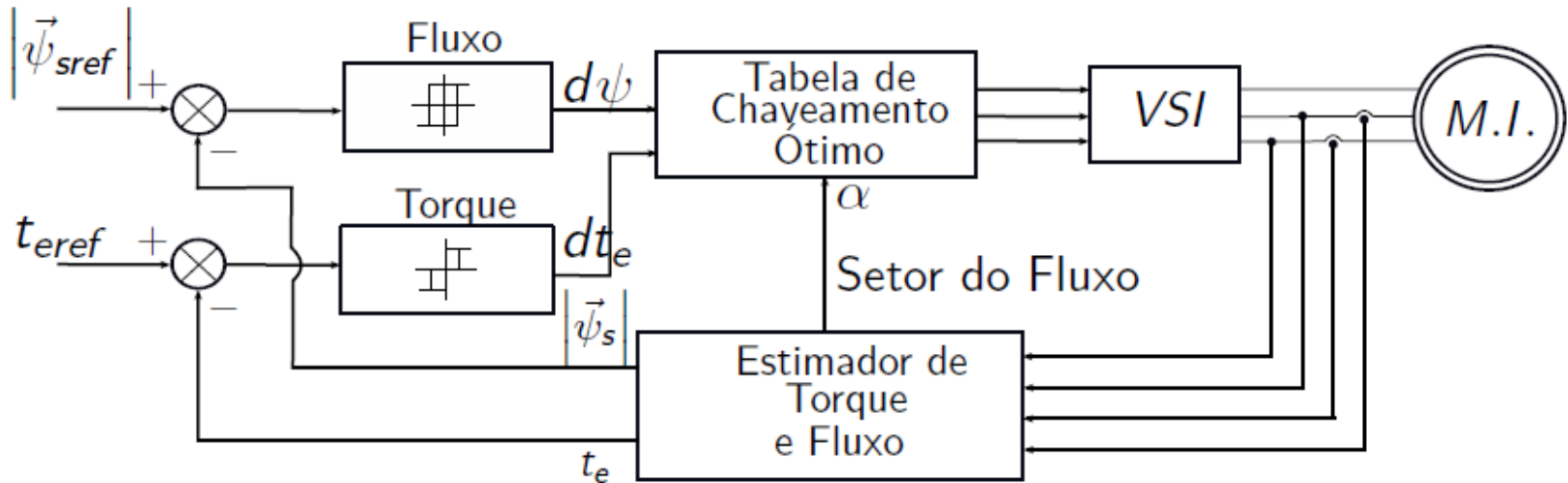
$$\Rightarrow \theta_\psi = \tan^{-1} \left( \frac{\psi_{rq}}{\psi_{rd}} \right) \quad \Rightarrow \psi_r = \sqrt{\psi_{rd}^2 + \psi_{rq}^2}$$

# Controle Direto de Campo Orientado pelo Fluxo do Rotor



# Controle Direto de Torque (DTC)

# Controle Direto de Torque (DTC)



- Controle do fluxo do estator e do torque eletromagnético dentro da **banda de histerese**.
- Seleção apropriada do vetor de tensão baseado na demanda de fluxo e de torque.

# Princípios Básicos do DTC

Como os vetores de tensão controlam o **fluxo**?

Como os vetores de tensão controlam o **torque**?

# Princípios Básicos do DTC

Equações dinâmicas do motor de indução trifásico no sistema de referência estacionário.

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + \frac{d\vec{\psi}_s}{dt}$$

$$\vec{u}_r = R_r \vec{i}_r + \frac{d\vec{\psi}_r}{dt} - j\omega_r \vec{\psi}_r$$

$$\vec{\psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_m \vec{i}_r$$

$$\vec{\psi}_r = L_r \vec{i}_r + L_m \vec{i}_s$$

$$t_e = \frac{3}{2} P \frac{L_m}{L_r L_s \sigma} \vec{\psi}_r \times \vec{\psi}_s$$



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto do fluxo

✓ Da equação para a tensão do estator

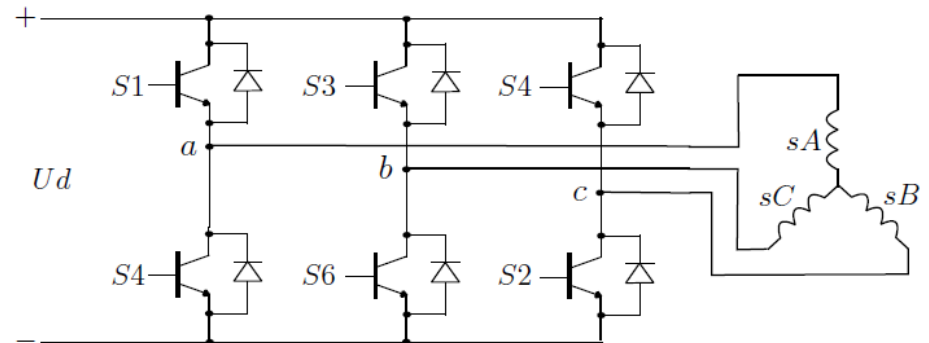
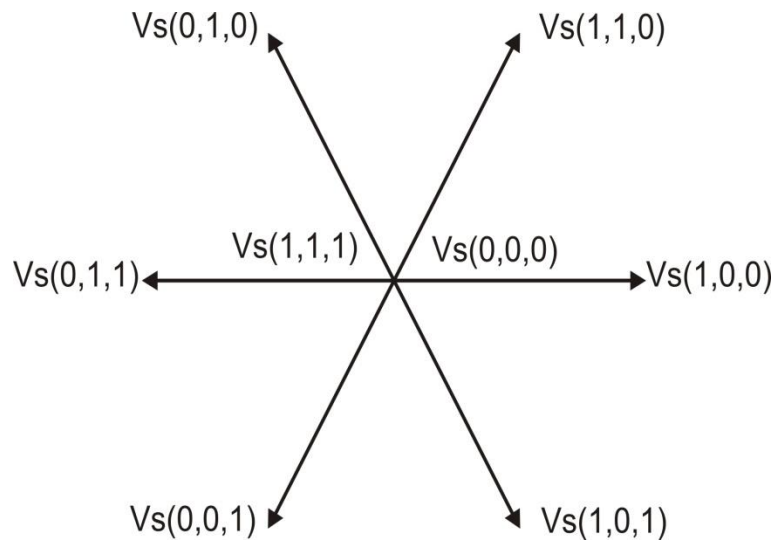
$$\frac{d\bar{\psi}_s}{dt} = \bar{u}_s - R_s \bar{i}_s$$

✓ Desprezando a queda de tensão na resistência do estator

$$\Delta\bar{\psi}_s \approx \bar{u}_s \Delta t$$

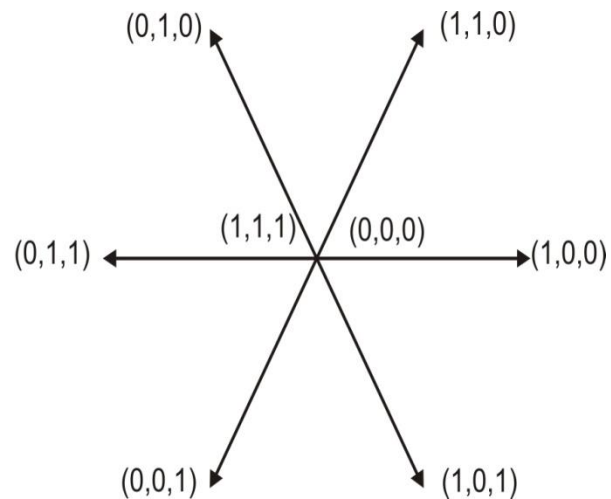
# Princípios Básicos do DTC

Vetores de tensão para o inversor de tensão (VSI)



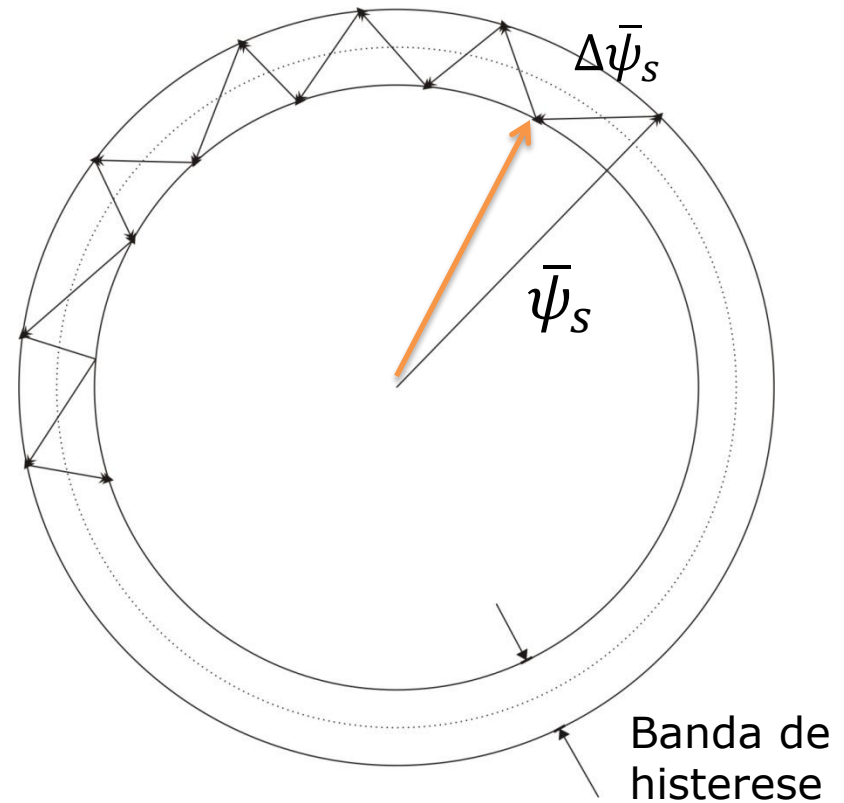
# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto do fluxo



*Vetores de tensão*

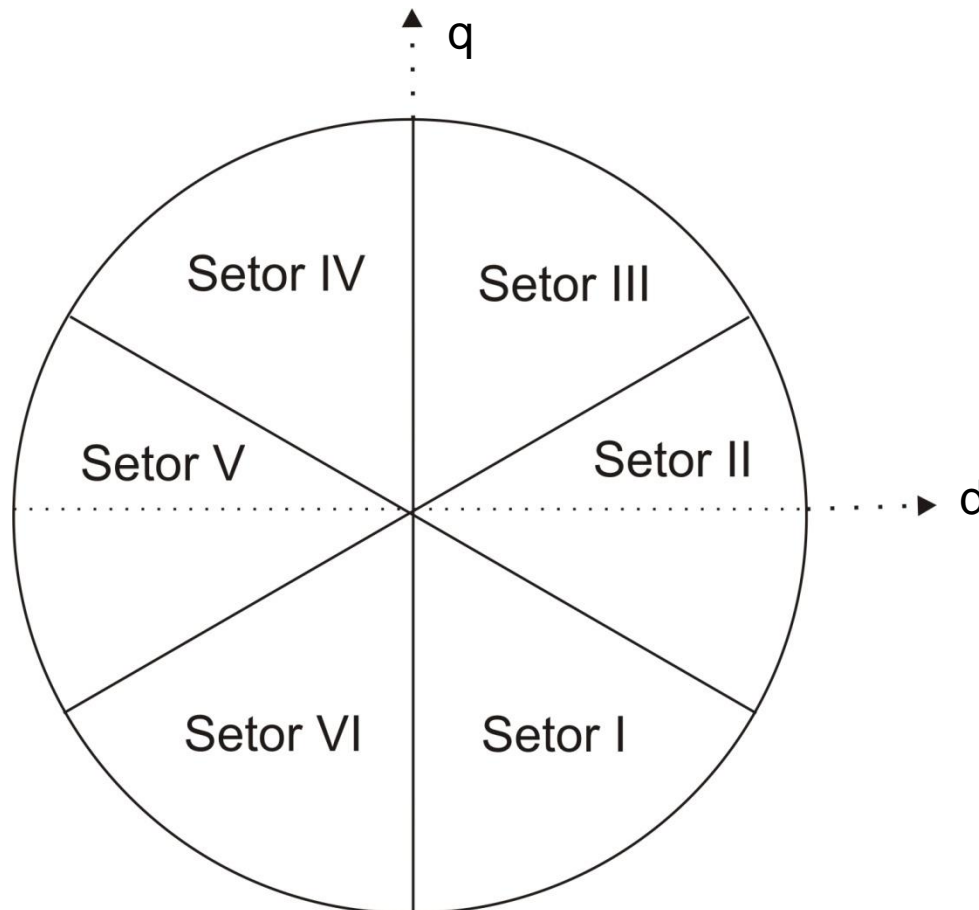
## *Lugar geométrico do fluxo*



Banda de histerese

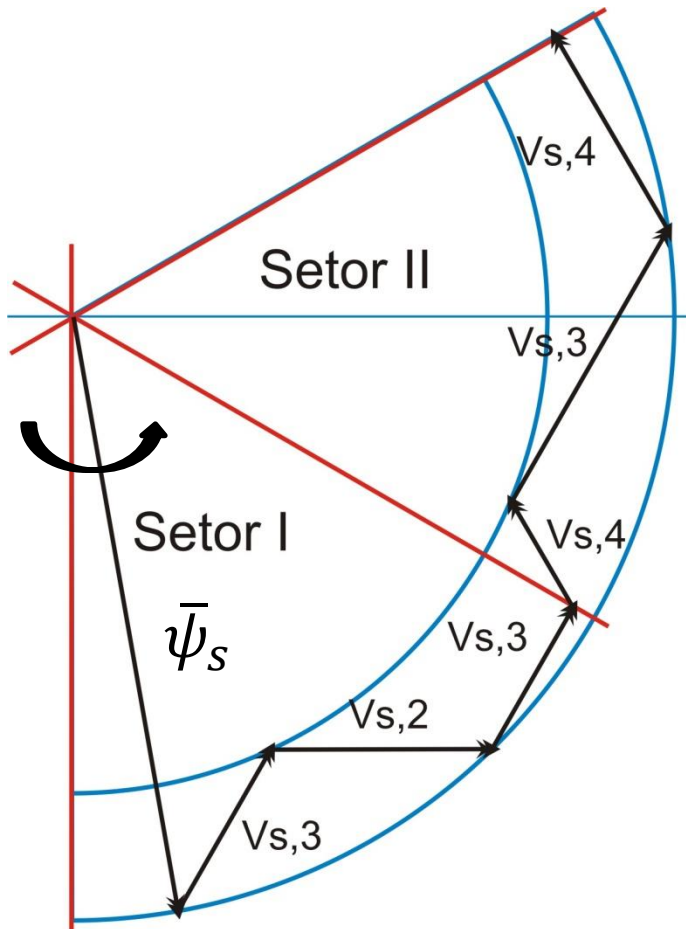
# Princípios Básicos do DTC

*Divisão em setores do lugar geométrico do fluxo*



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto de Fluxo



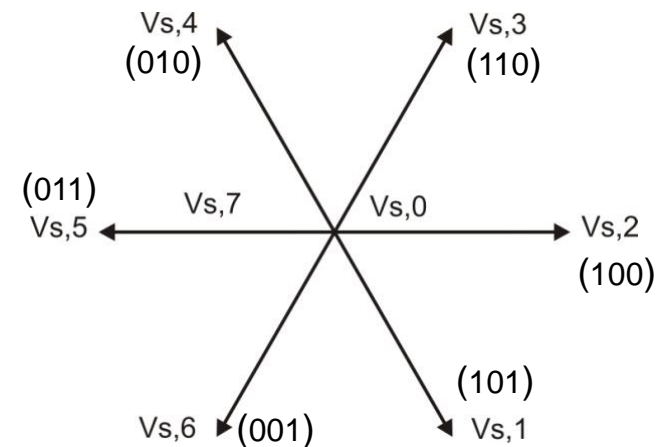
Vetor de tensão  $V_{s,2}$  e  $V_{s,3}$  no setor I

Vetor de tensão  $V_{s,3}$  e  $V_{s,4}$  no setor II

Se o fluxo se encontra no setor  $k$ -ésimo

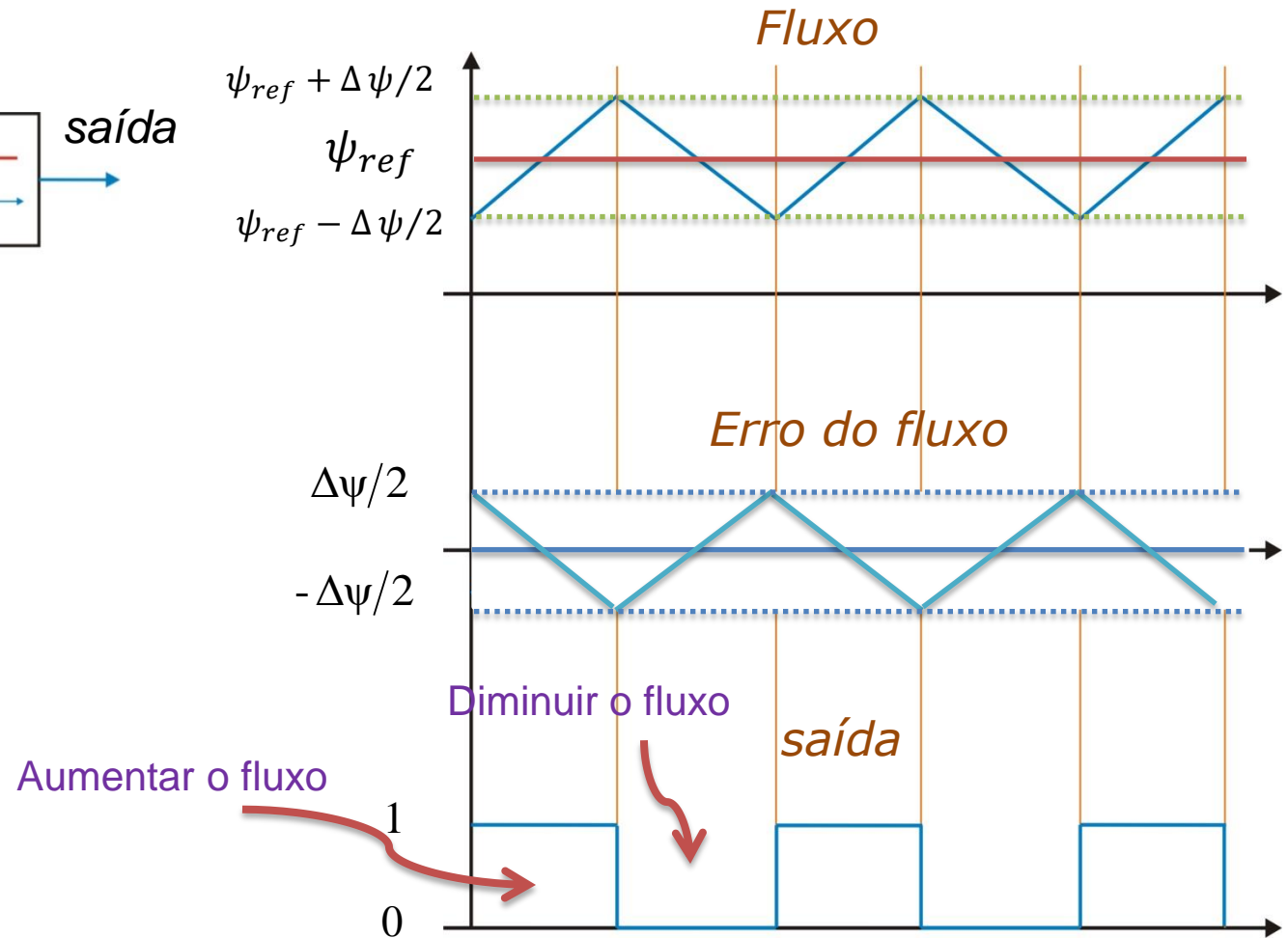
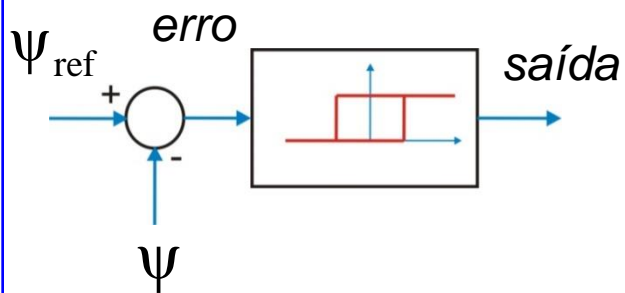
O vetor de tensão  $k+1$  aumenta o fluxo

O vetor de tensão  $k+2$  diminui o fluxo



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto de fluxo



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto de torque

Torque eletromagnético do motor de indução

$$t_{em} = \frac{3 p}{2} \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \psi_s \psi_r \sin(\theta_{sr})$$

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r}$$

# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto de torque

Pode-se mostrar que:

$$\bar{\psi}_r^r = \frac{L_m/L_s}{1 + p\sigma\tau_r} \bar{\psi}_s^r$$

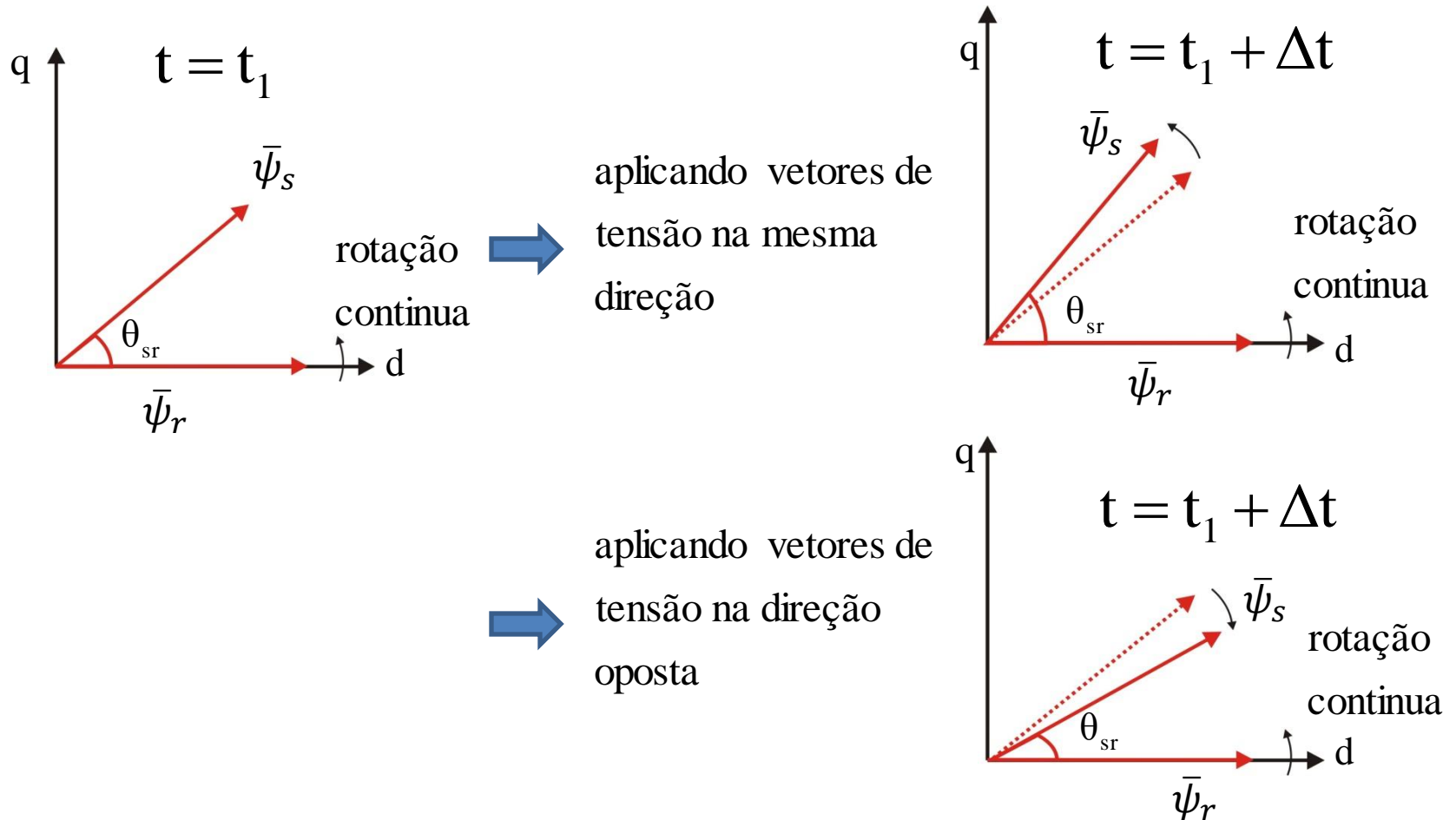
O fluxo do rotor segue o fluxo do estator com uma constante de tempo

$$\sigma \cdot \tau_r$$



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto do torque



# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto do torque

São considerados três casos:

**CASO 1:** vetores de tensão ativa – mesma direção

- ❑ O fluxo do estator **umenta** ou **diminui**.
- ❑ O ângulo aumenta → **O torque aumenta**.

# Princípios Básicos do DTC

## **CASO 2:** vetores de tensão nula

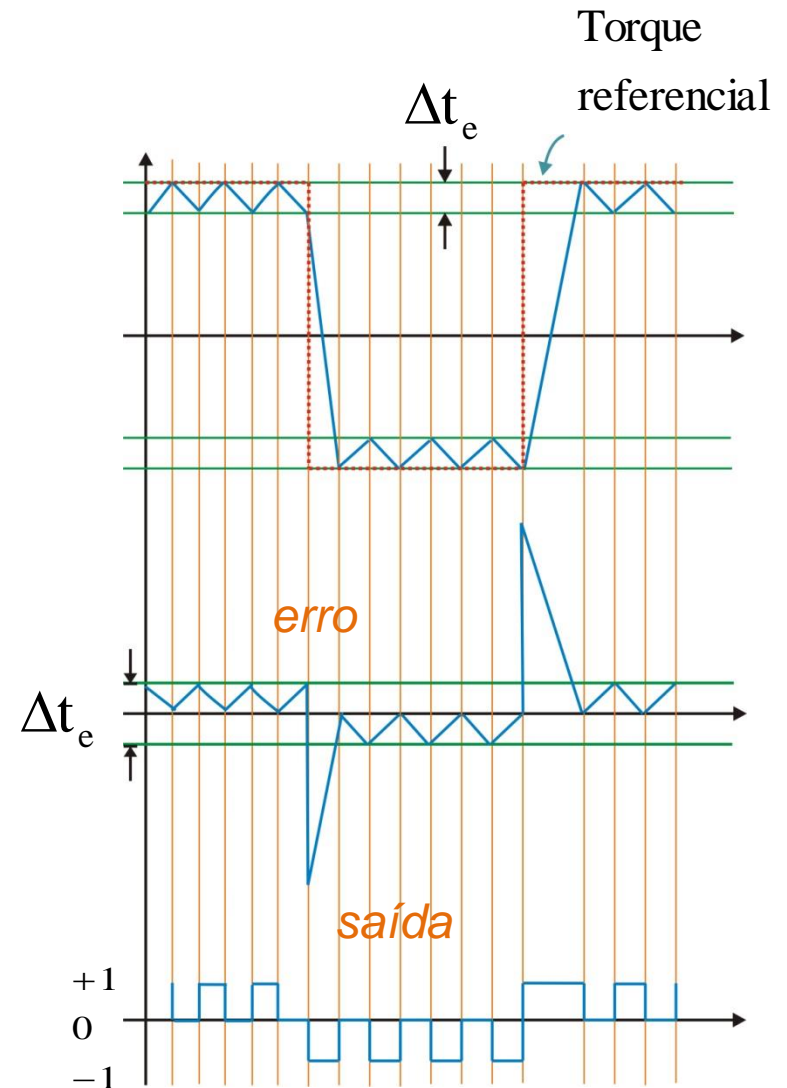
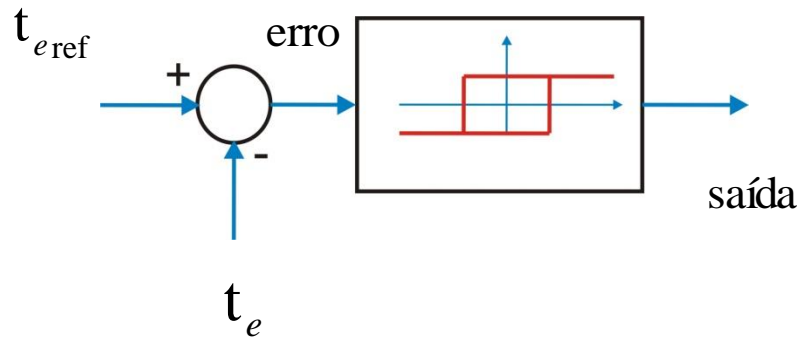
- ❑ O fluxo do estator se detém.
- ❑ O ângulo diminui → O torque diminui.

## **CASO 3:** vetores de tensão ativa – direção oposta

- ❑ O fluxo do estator aumenta ou diminui.
- ❑ O ângulo diminui rapidamente → O torque diminui rapidamente.

# Princípios Básicos do DTC

## Controle direto de torque



# Princípios Básicos do DTC

Como consequência da limitação do fluxo e do torque dentro das bandas de histerese se obtêm o desacoplamento entre o controle do torque e do fluxo

# Princípios Básicos do DTC

Tabela de chaveamento otimizada

$d\psi$	$dT_{em}$	S (I)	S (II)	S (III)	S (IV)	S (V)	S (VI)
Incrementar fluxo (1)	1	100	110	010	011	001	101
	0	000	111	000	111	000	111
	-1	001	101	100	110	010	011
Diminuir fluxo (0)	1	110	010	011	001	101	100
	0	111	000	111	000	111	000
	-1	011	001	101	100	110	010

# Estimação do torque e do fluxo

Uma estimativa precisa assegura uma operação adequada e estabilidade.

Foram propostos vários métodos:

- Modelo de tensão.
- Modelo de corrente.
- Observador de malha fechada.

# Estimação do fluxo

Modelo de tensão-fluxo do estator:

$$\bar{\psi}_s = \int (\bar{u}_s - R_s \bar{i}_s) dt$$

## Problemas

Variação da resistência do estator



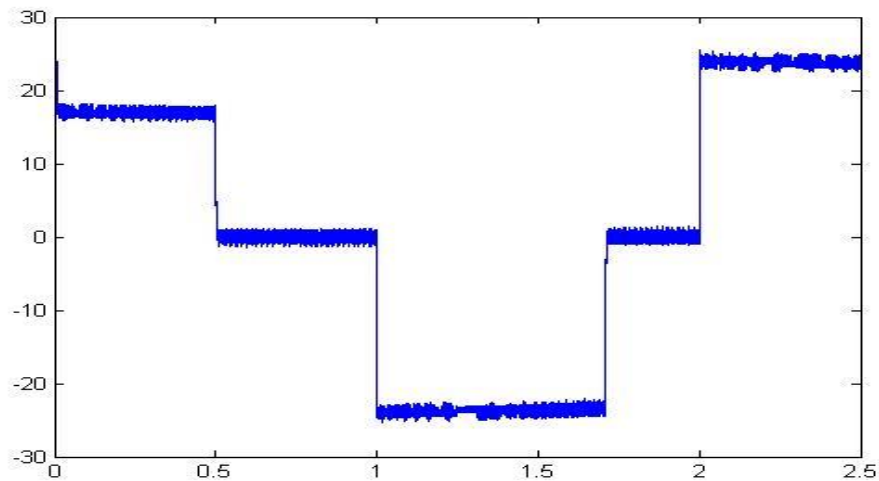
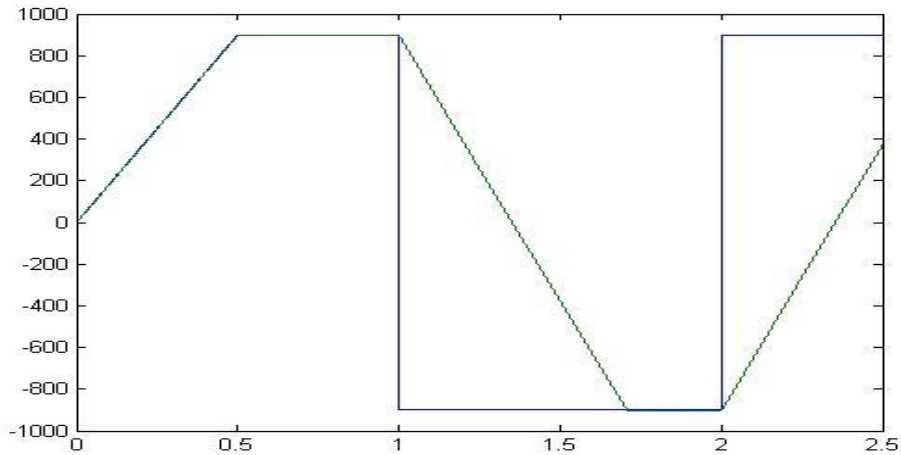
# Estimação do torque

No sistema de referência estacionário

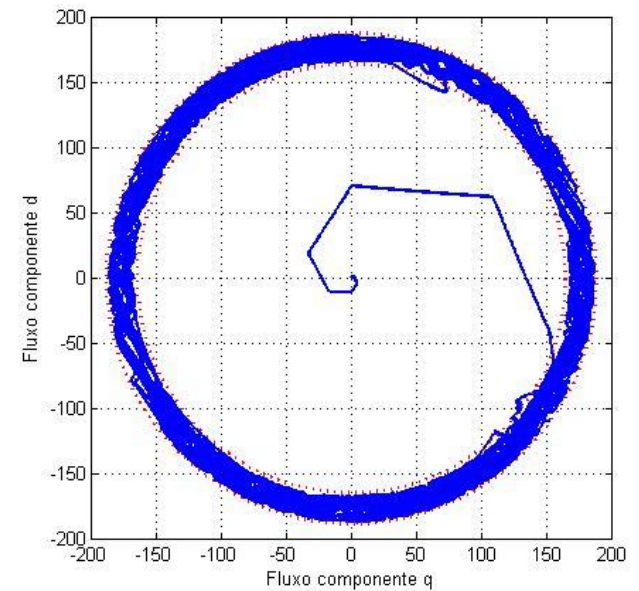
$$T_e = \frac{3p}{2} \frac{1}{2} \bar{\psi}_s \times \bar{i}_s$$

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\psi_{sd} i_{sq} - \psi_{sq} i_{sd})$$

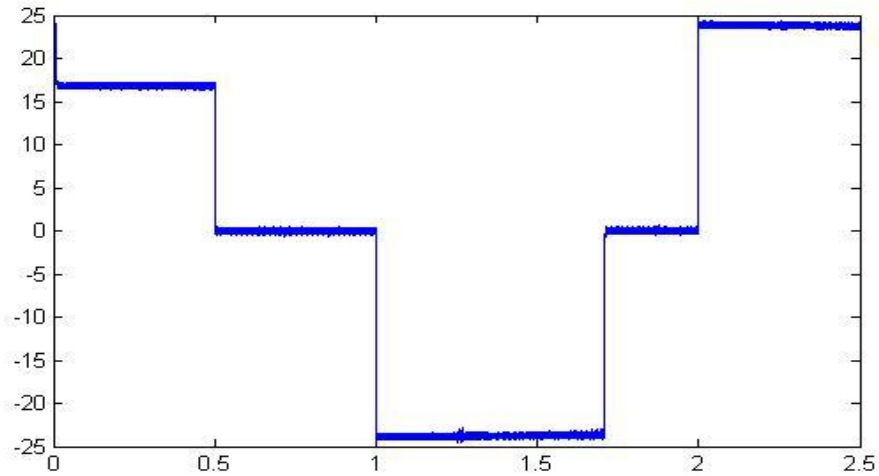
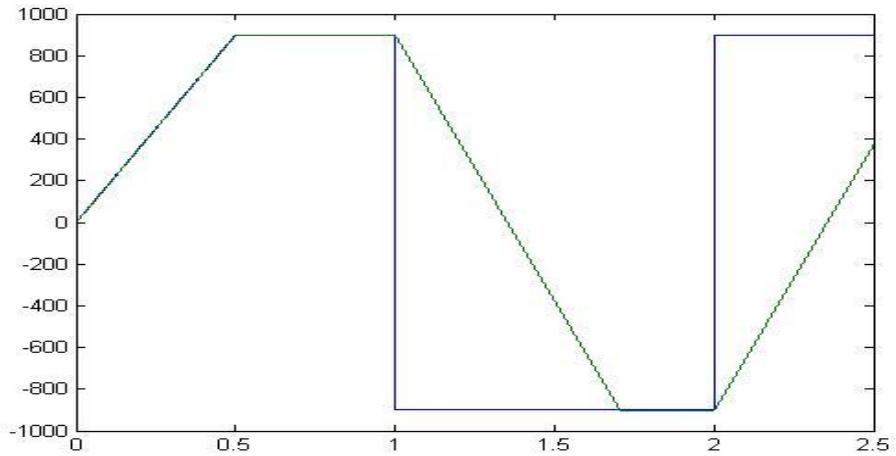
# Simulação



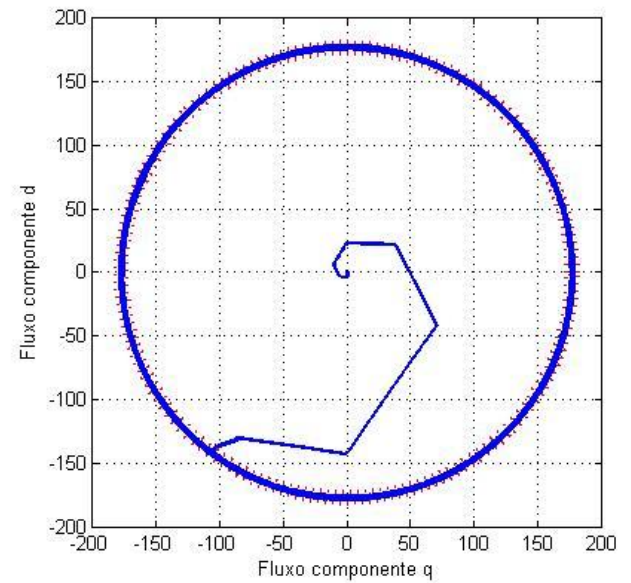
Histerese  
Torque e fluxo 10%



# Simulação



Histerese  
Torque e fluxo 1%



# Referências Bibliográficas

1. BIM, E., Máquinas Elétricas e Acionamento, 3a Edição, Elsevier Editora Ltda., 2014.
2. Nik R. N. Idris, Notas de aula da disciplina “Electrical Drives”, <http://encon.fke.utm.my/rumzi.html>
3. RASHID, M.H. Eletrônica de Potência - Circuitos, Dispositivos e Aplicações. Ed. São Paulo: Makron Books, 1999.
4. MOHAN, N.; UNDELAND, T.M.; ROBBINS, W.P. Power Electronics: Converters Applications and Design 2. Ed. New York: Editora John Wiley & Sons, 1995.
5. I. Takahashi, T. Noguchi, “A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor”, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. IA-22, No 5 Sept/Oct 1986.
6. *prof. M.Kaliamoorthy* , Notas de aula da disciplina “Solid State Drives”, disponível em [kaliasgoldmedal.yolasite.com](http://kaliasgoldmedal.yolasite.com) (Acessado em março 2017)