



Universidade Federal do ABC

Universidade Federal do ABC
Pós-graduação em Engenharia Elétrica

Aplicações de Conversores Estáticos de Potência

José L. Azcue, Prof. Dr.

✓ *Filtros Ativos de Potência*

Filtros Ativos de Potência

O Filtro Ativo de Potência (FAP) foi proposto na década de 1970.

Funções:

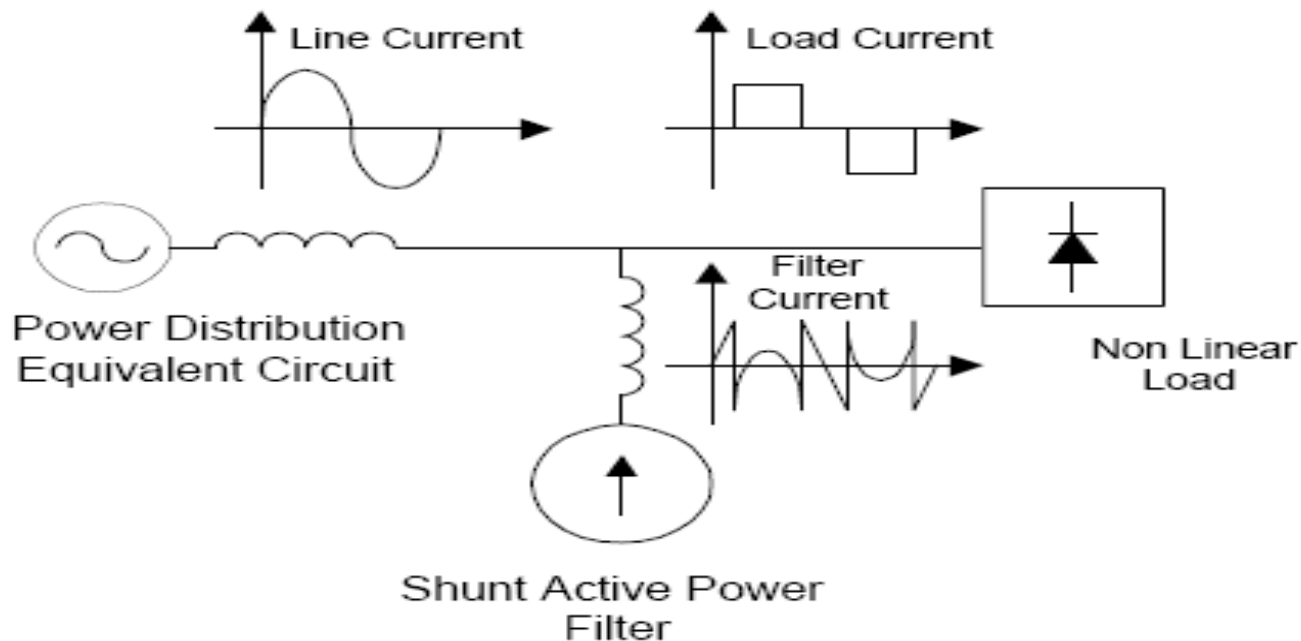
- Compensar harmônicas de corrente e/ou tensão.
- Compensar reativos.
- Compensar tensões ou correntes de sequência negativa.
- Regulação de tensão, etc.

Filtros Ativos de Potência

- ❑ O FAP consiste de um inversor com um circuito de controle de chaveamento.
- ❑ O inversor gera os harmônicos de compensação desejados baseado no algoritmo de chaveamento fornecido pelo controlador.

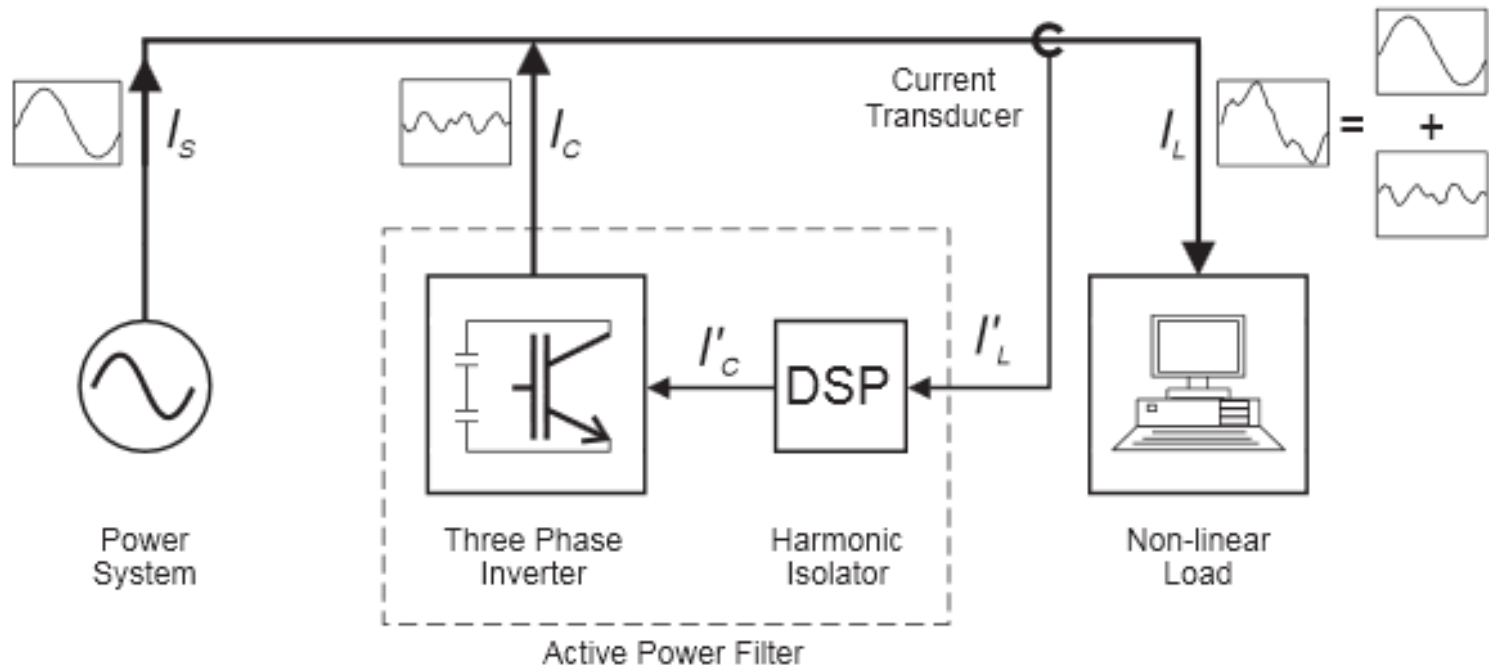
Filtros Ativos de Potência

- ❑ O FAP injeta corrente harmônica requerida pela carga não linear e faz com que a corrente no lado da fonte seja puramente sinusoidal.



Filtros Ativos de Potência

Diagrama unifilar do FAP



Classificação dos Filtros Ativos de Potência

Classificação baseado no tipo de conversor

- ❑ Estrutura em ponte do inversor fonte de tensão (*Voltage Source Inverter - VSI*)
- ❑ Estrutura em ponte do inversor fonte de corrente (*Current Source Inverter - CSI*)

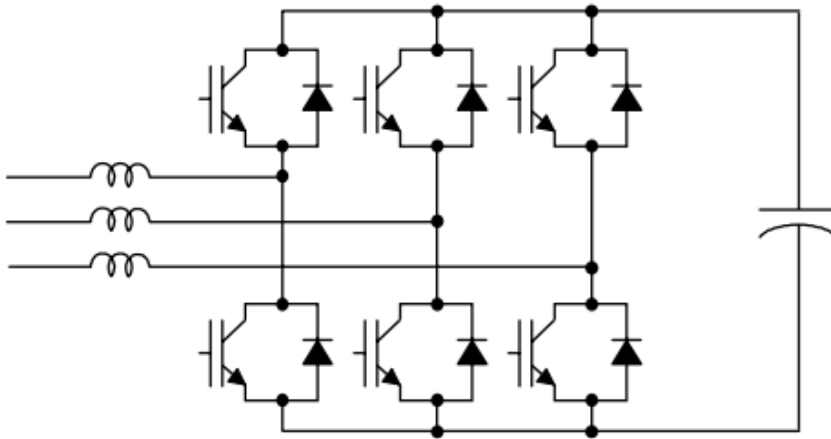
Classificação baseado na topologia

- ❑ Filtro Ativo de Potência (FAP) paralelo (shunt)
- ❑ FAP serie
- ❑ Condicionador unificado (UPQC): FAP paralelo + FAP serie
- ❑ Filtro ativo hibrido: filtro ativo + filtro passivo

Classificação baseado no sistema de alimentação

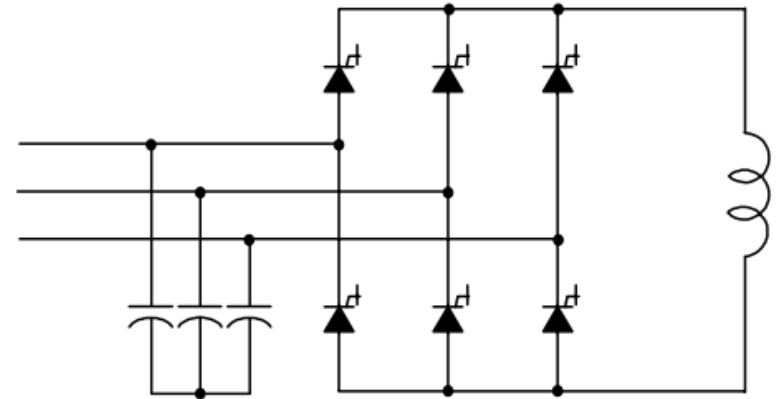
- ❑ FAP de 2 fios
- ❑ FAP de 3 fios
- ❑ FAP de 4 fios

Classificação baseada no tipo de conversor



VSI

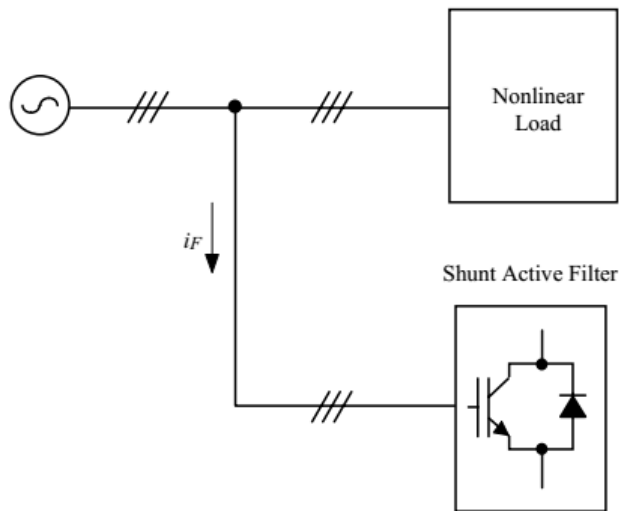
- ❖ Autossuficiente de tensão contínua
- ❖ Leve, barato
- ❖ Expansível para configuração em multinível



CSI

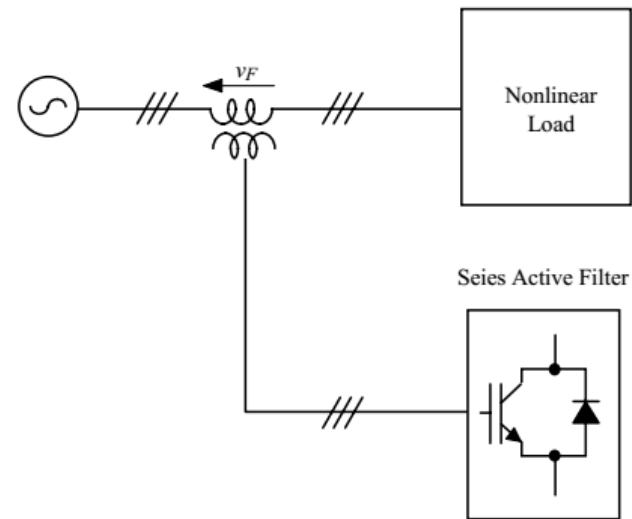
- ❖ Frequência de chaveamento restrita
- ❖ Perdas elevadas
- ❖ Não pode ser usada em configuração multinível

Classificação baseada na topologia



Paralelo ou de derivação (Shunt)

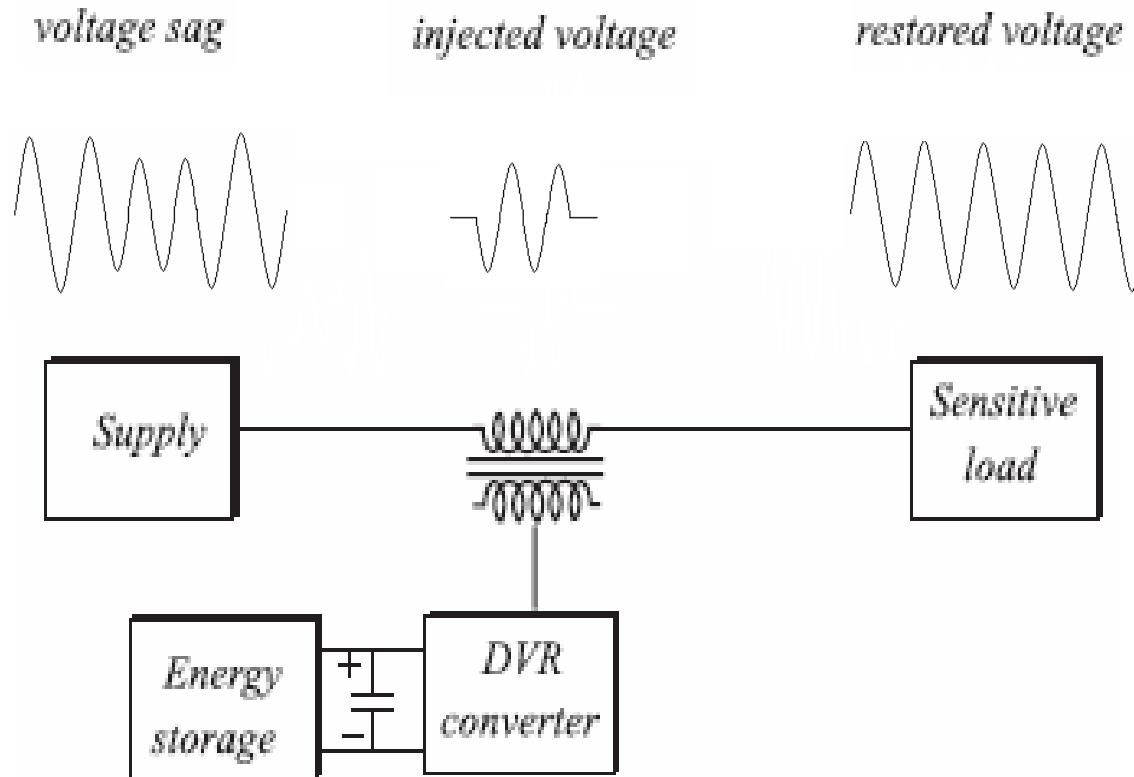
- ❖ Elimina harmônicas de corrente
- ❖ Compensa potência reativa
- ❖ Capaz de Balancear correntes desbalanceadas



Serie

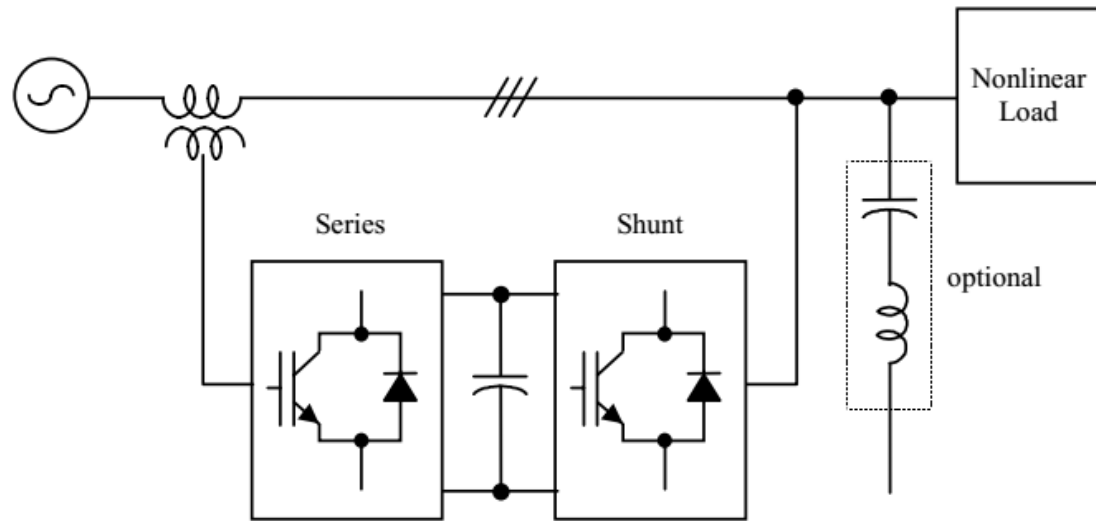
- ❖ Elimina harmônicas de tensão
- ❖ Capaz de Balancear e regular a tensão nos terminais da carga
- ❖ minimiza a distorção da tensão de alimentação de uma carga

Exemplo: FAP série - DVR



Conceito de Restaurador Dinâmico de Tensão (do inglês, *Dynamic Voltage Restorer (DVR)*)

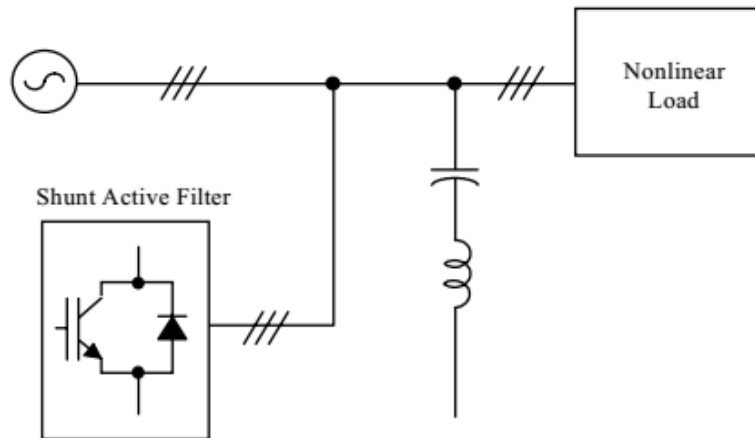
Filtro Ativo Híbrido



Condicionador unificado: Unified Power Quality Conditioner (UPQC)

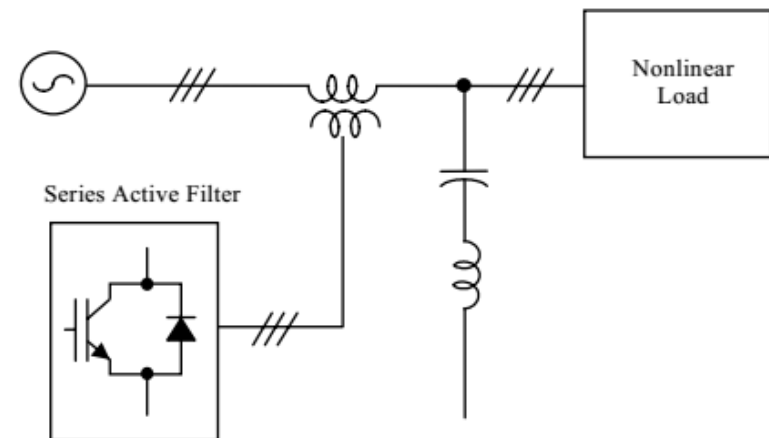
- ❖ **Elimina harmônicas de tensão e corrente**
- ❖ **Regulação de tensão e balanceamento de corrente**
- ❖ **Também conhecido como “FAP universal”**
- ❖ **Custo elevado e controle relativamente complexo**

Filtro Ativo Híbrido



Combinação paralela: FAP paralelo e filtro passivo paralelo

- ❖ Cancelamento de harmônicas
- ❖ Compartilhamento ótimo é necessário
- ❖ Solução Comercial



Híbrido: FAP serie e filtro passivo paralelo

- ❖ Atenuação de harmônicas
- ❖ Baixa potência

Classificação baseada no sistema de alimentação

FAP de 2 fios

- ❖ Cargas não lineares monofásicas, tais como aplicações domésticas
- ❖ Aplicações de menor potência nominal

FAP de 3 fios

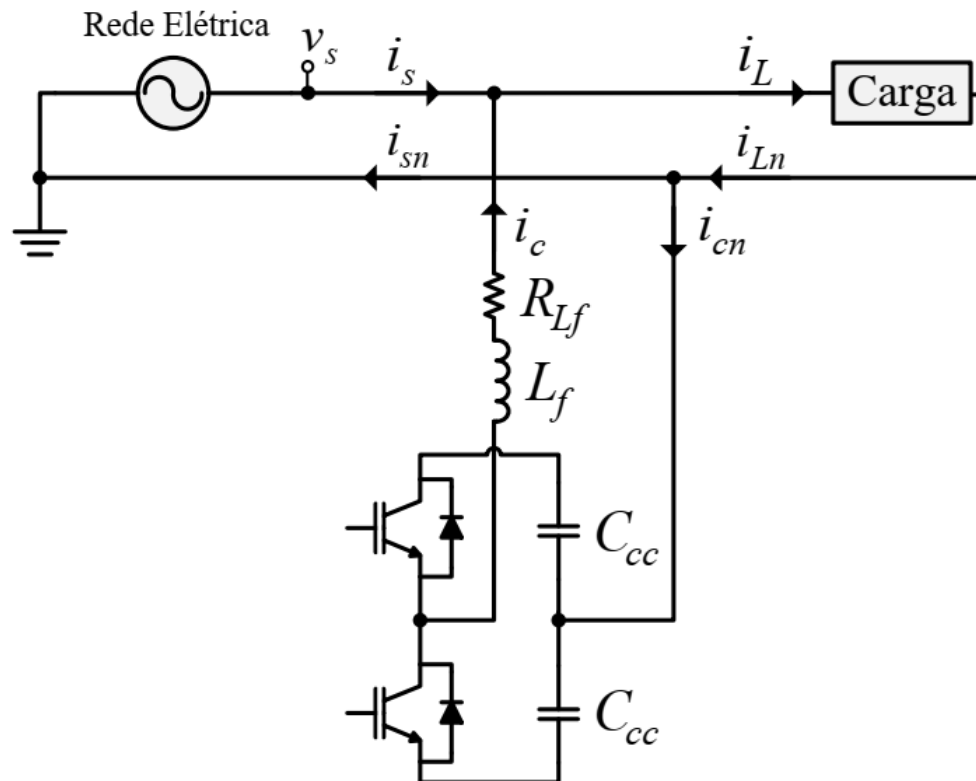
- ❑ Cargas não lineares sem neutro como acionadores de velocidade variável (ASD - *Adjustable Speed Drives*)

FAP de 4 fios

- ❖ Cargas não lineares monofásicas alimentadas a partir de sistemas de 4 fios, tais como computadores e iluminação industrial
- ❖ Elimina a corrente desbalanceada e excessiva no neutro

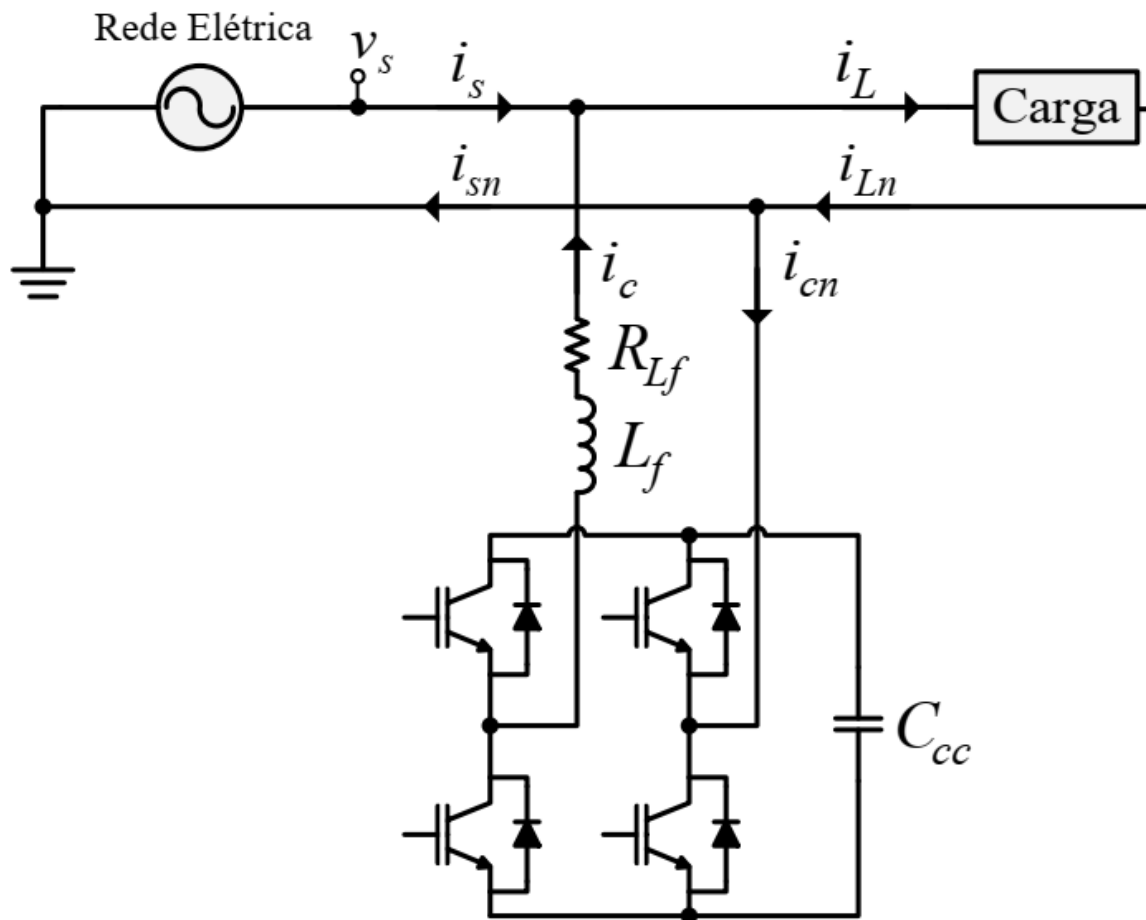
FAPP monofásico meia ponte

Além de controlar a corrente, existe a necessidade de controlar a tensão total do barramento e o desequilíbrio entre as tensões dos capacitores.



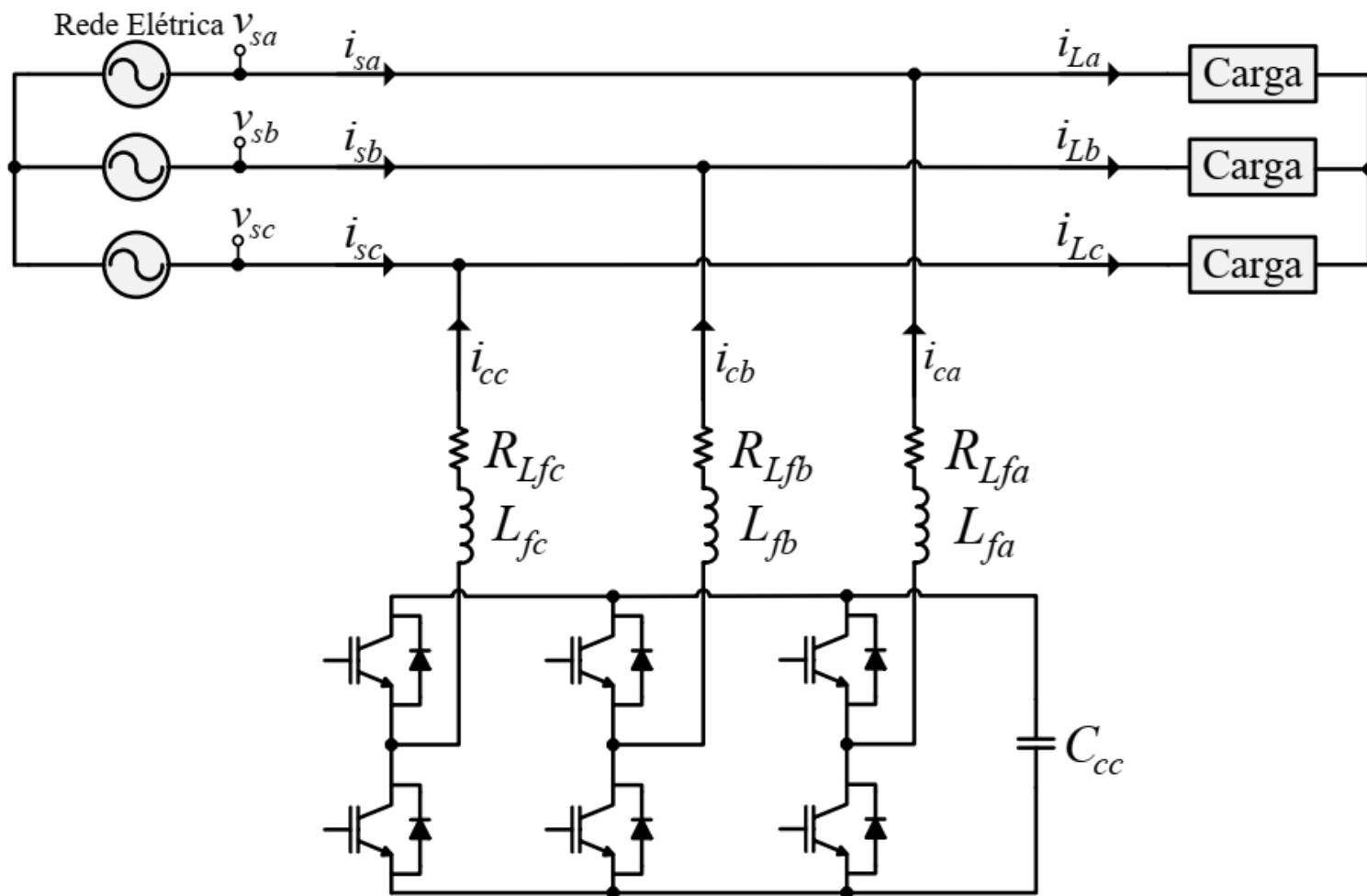
FAPP monofásico ponte completa

Controle da tensão do barramento CC mais simples.



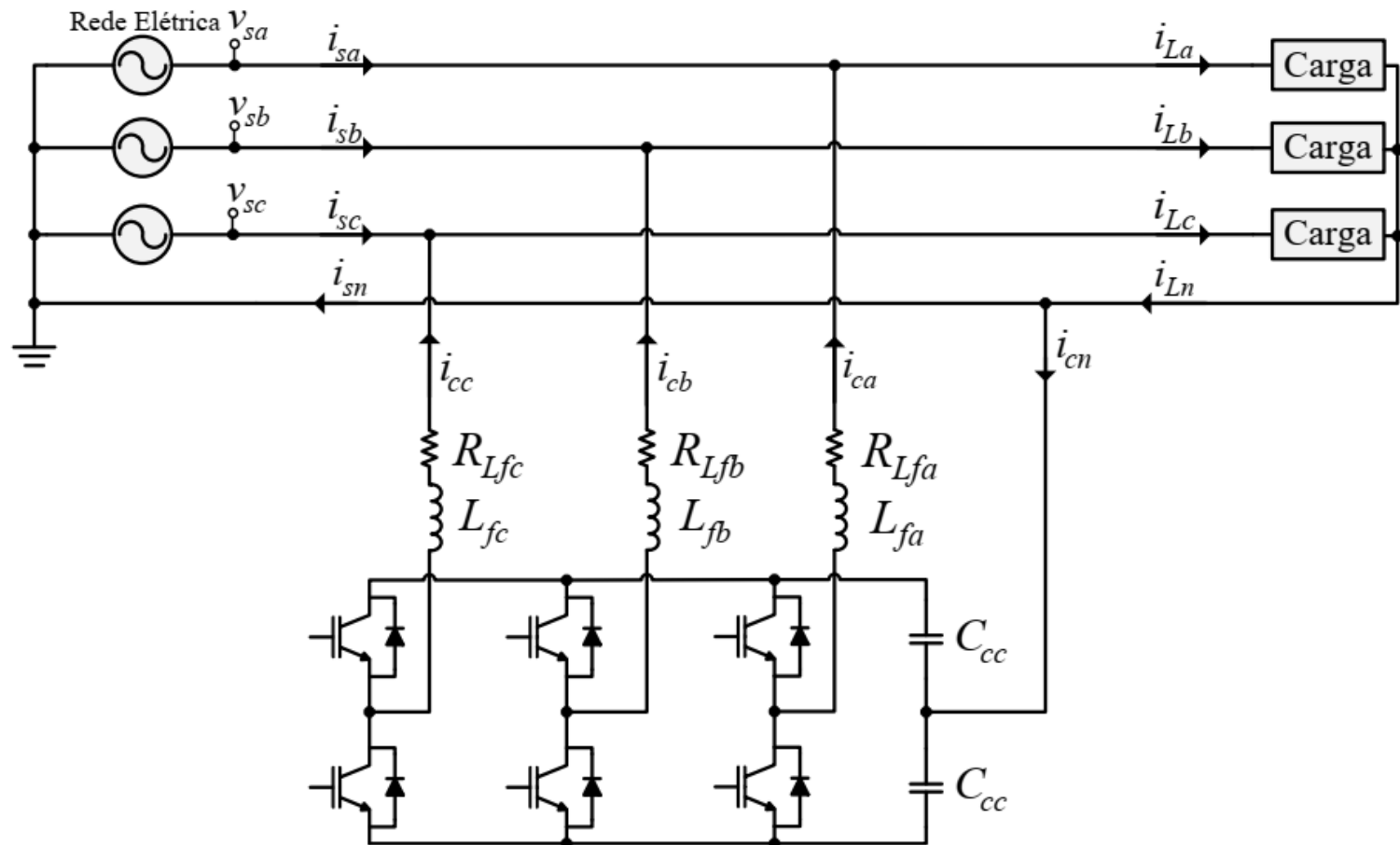
FAPP trifásico a três-fios

Solução para cargas de maior potência



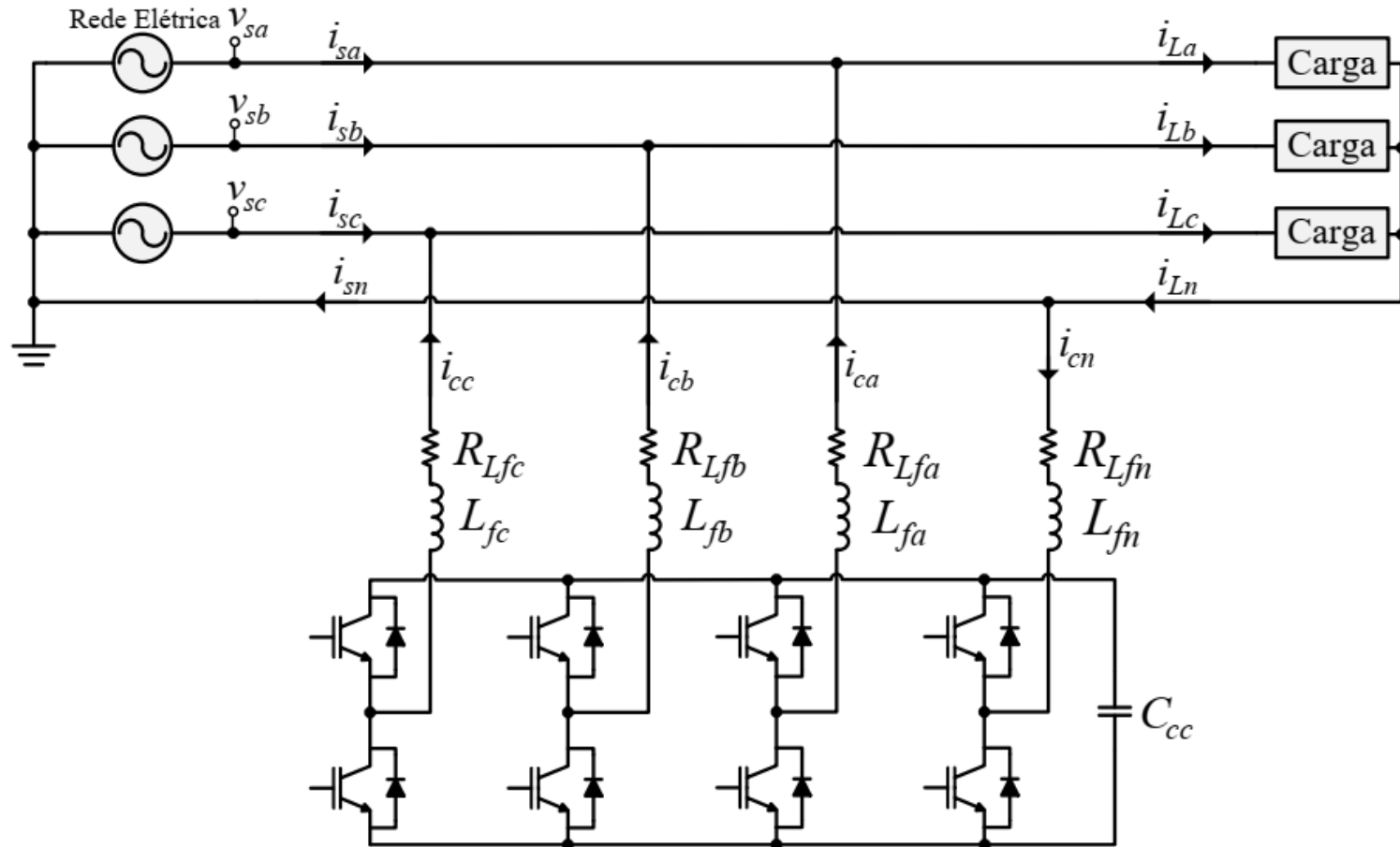
FAPP de 4 fios com ponto médio capacitivo

Utilizado em aplicações de menor potência nominal, porque toda a corrente do neutro flui através do capacitor do barramento CC.



FAP paralelo de 4 fios

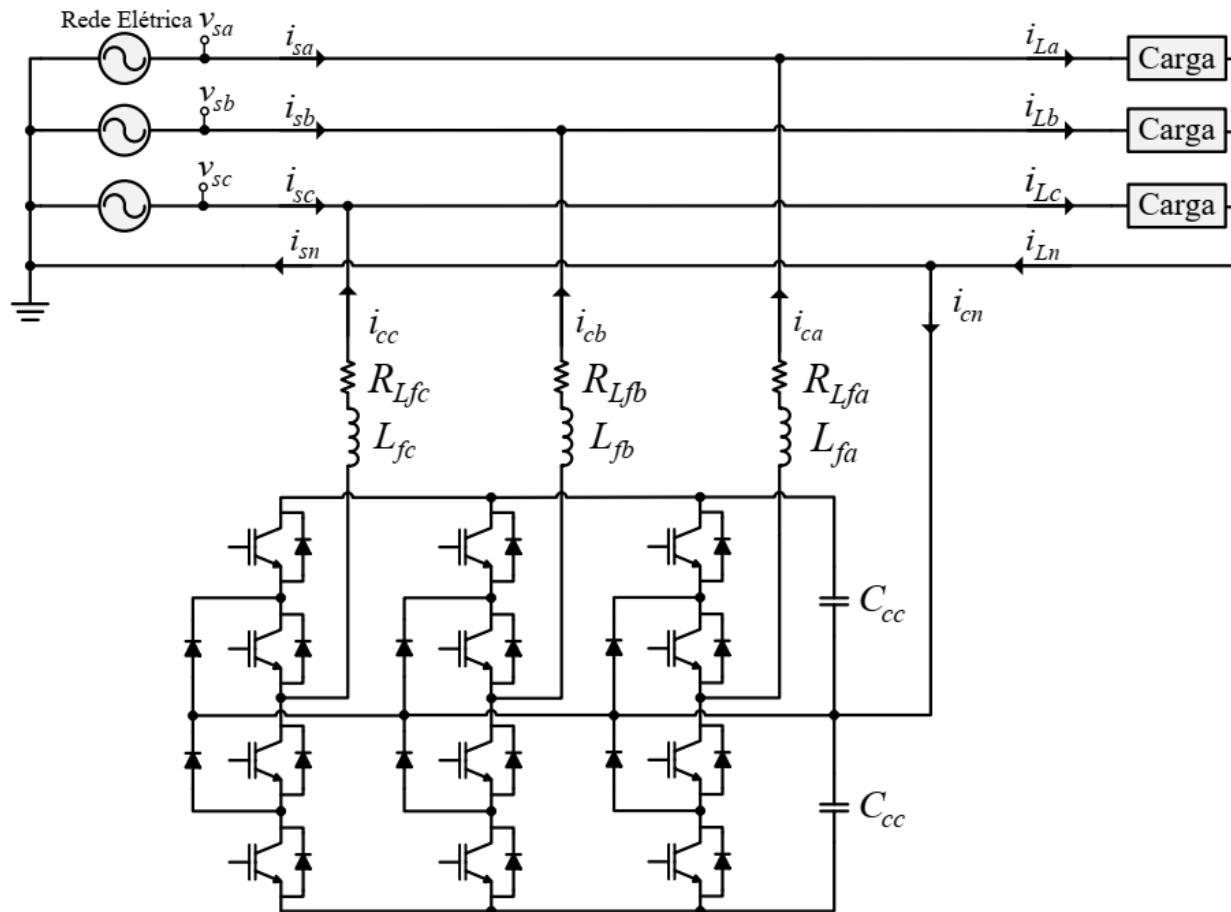
O quarto braço é utilizado para estabilizar o neutro do FAP



FAPP de 4 fios topologia NPC

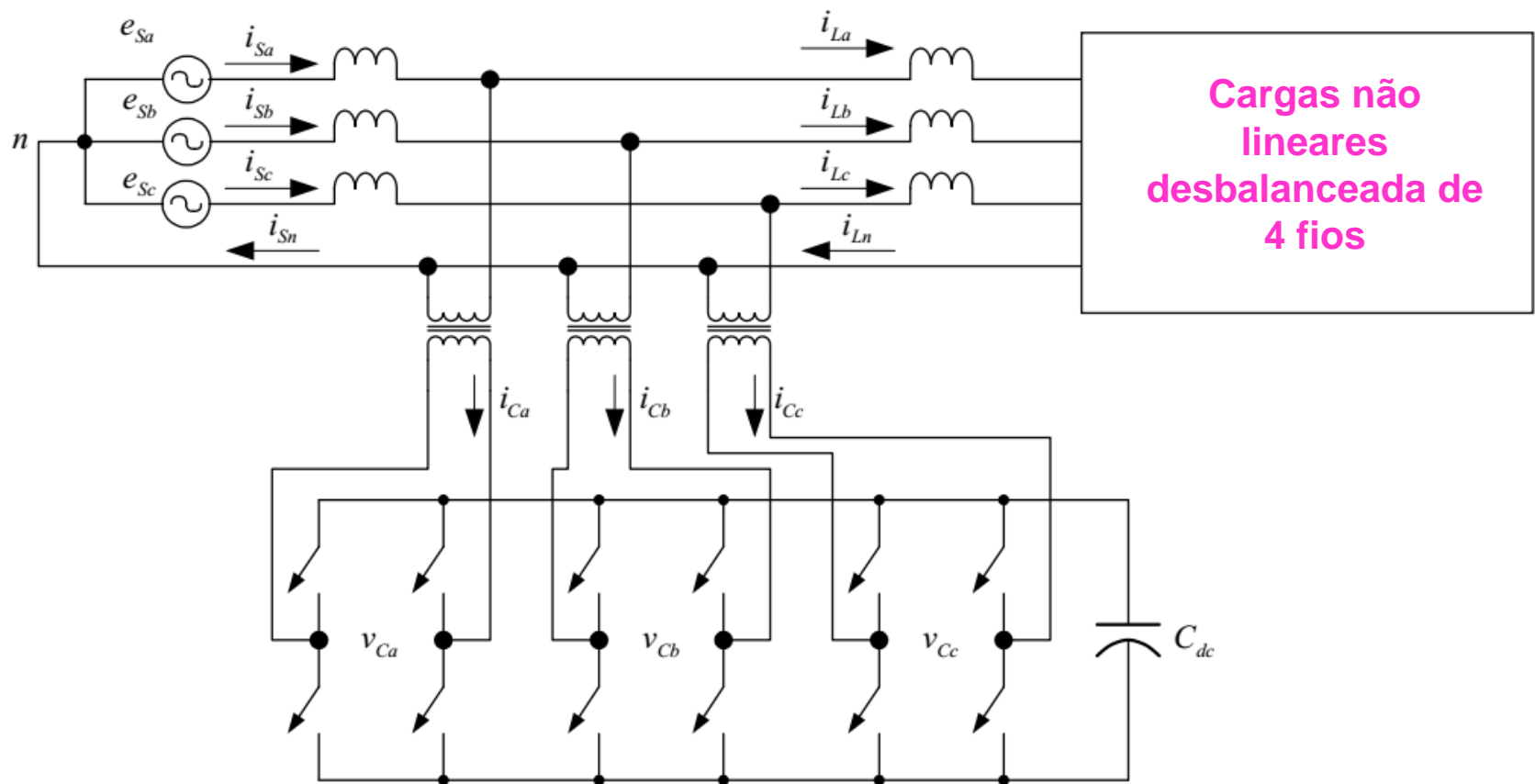
Necessidade do balanceamento da tensão dos capacitores.

Mais adequados para aplicações de medias e altas potências.



FAPP de 3 pontes e 4 fios

- ❑ Bastante comum
- ❑ Aprimora a confiabilidade dos FAPs



Estratégias de Controle para o FAP

Primeiro Estágio: Condicionamento de Sinais

- Sistema de aquisição com CT e PT, amplificadores isoladores.
- Monitorar, medir e armazenar: THD, fator de potência, potência ativa/reactiva, etc.

Segundo Estágio: Determinação do Sinal de Compensação

- Nível de corrente e/ou tensão
- No domínio da frequência:
 - Baseado na transformada de Fourier
 - Alto custo computacional

Estratégias de Controle para o FAP

Segundo Estágio: Determinação do Sinal de Compensação

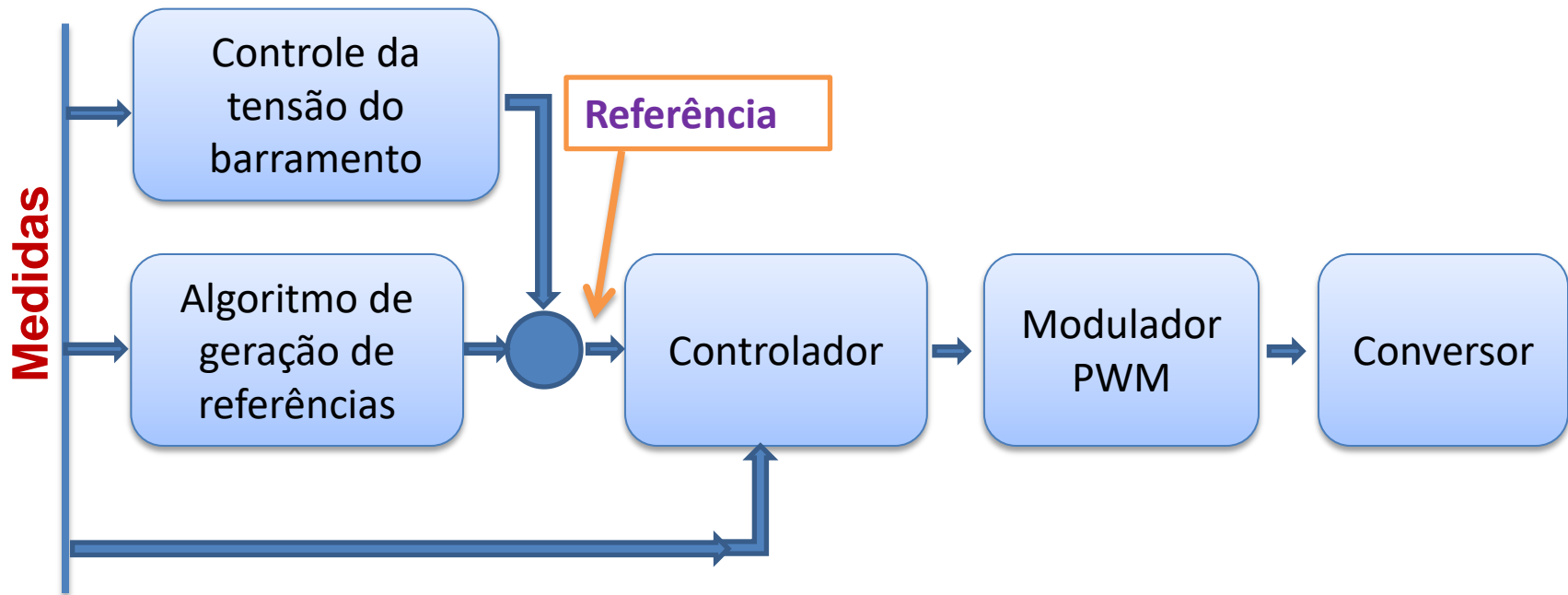
- No domínio do tempo:
 - Baseado na derivação instantânea
 - Teoria pq, método do sistema de referência síncrono dq, método do filtro notch, etc.

Terceiro Estágio: Geração do sinal de acionamento

- Histerese, PWM, SVPWM, modos deslizantes, lógica *fuzzy*, etc.

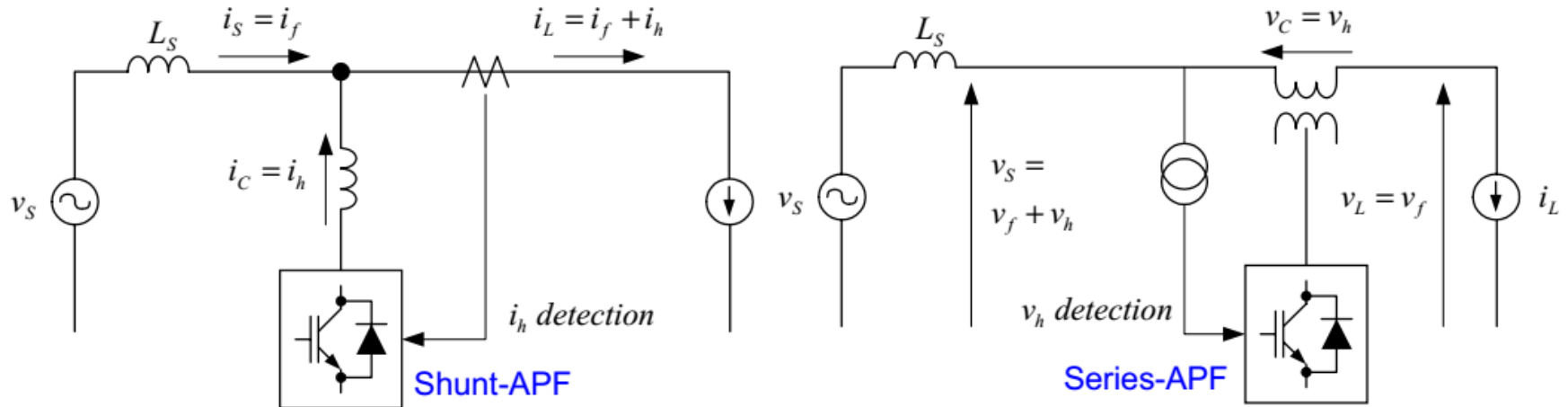
Princípios de Operação do FAP

Implementação do FAP



Princípios de Operação do FAP

Filtro Ativo como "Supressor de harmônicos"



Detecção dos harmônicos de corrente

e

Método de controle de corrente

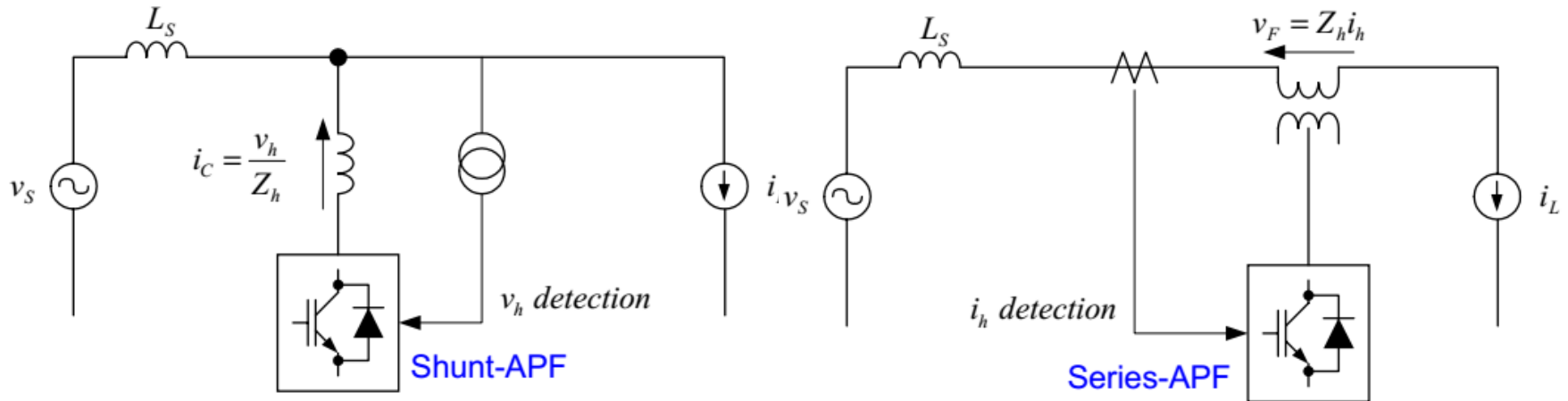
Detecção dos harmônicos de tensão

e

Método de controle de tensão

Princípios de Operação do FAP

Filtro Ativo como "Amortecedor harmônico"



**Detecção dos harmônicos de
tensão**

e

Método de controle de corrente

**Detecção dos harmônicos de
corrente**

e

Método de controle de tensão

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

Pela teoria pq são definidos, para o sistema trifásicos de 4 fios, duas potências instantâneas (p_0 e p) e uma potência imaginária (q), isto é:

$$\hat{S} = \hat{v}\hat{i}^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta)$$

$$\hat{S} = \underbrace{(v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta)}_p + j \underbrace{(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta)}_q$$

$$\begin{bmatrix} p_0 \\ p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_0 & 0 & 0 \\ 0 & v_\alpha & v_\beta \\ 0 & v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix}$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$$

$$q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$$

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

Transformações $\alpha - \beta$

Tensões

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}$$

Correntes

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

No caso de um sistema trifásico de 4 fios

$$p_{3\phi} = v_a \cdot i_a + v_b \cdot i_b + v_c \cdot i_c$$

$$p_{3\phi} = v_\alpha \cdot i_\alpha + v_\beta \cdot i_\beta + v_0 \cdot i_0$$

$$p_{3\phi} = p_{\alpha\beta} + p_0$$

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

É possível obter as correntes, utilizando

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

E pode ser expandido da seguinte forma

$$\begin{bmatrix} i_{\alpha} \\ i_{\beta} \end{bmatrix} = \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ 0 \end{bmatrix} + \frac{1}{v_{\alpha}^2 + v_{\beta}^2} \begin{bmatrix} v_{\alpha} & v_{\beta} \\ v_{\beta} & -v_{\alpha} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 0 \\ q \end{bmatrix}$$

$$\triangleq \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}$$

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

As correntes i_α e i_β podem ser decompostas em suas parcelas ativa ($i_{\alpha p}$ e $i_{\beta p}$) e reativa ($i_{\alpha q}$ e $i_{\beta q}$), isto é:

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \end{bmatrix}$$

Sendo que:

$$i_{\alpha p} = \frac{v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

$$i_{\beta p} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} p$$

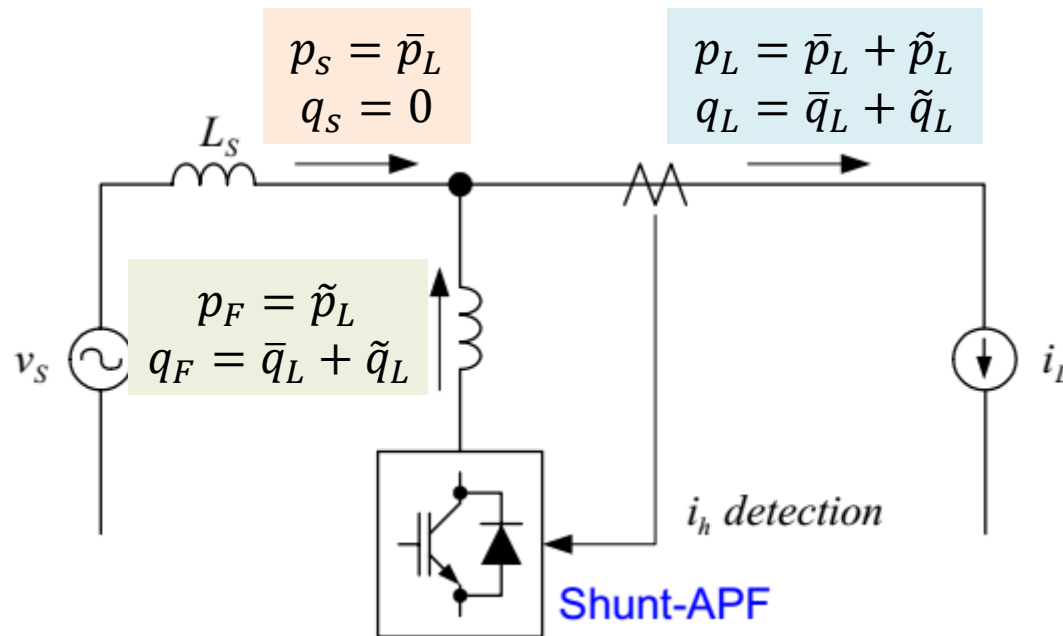
+

$$i_{\alpha q} = \frac{v_\beta}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

$$i_{\beta q} = \frac{-v_\alpha}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} q$$

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

FAP Paralelo



\bar{p}_L - Valor médio da potência ativa instantânea, corresponde à energia por unidade de tempo que é transferida da fonte para a carga.

\tilde{p}_L - Valor oscilatório da potência ativa instantânea, corresponde à energia que é trocada entre a fonte e a carga.

Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

As correntes de referência, se

$$p = \bar{p} + \tilde{p}$$

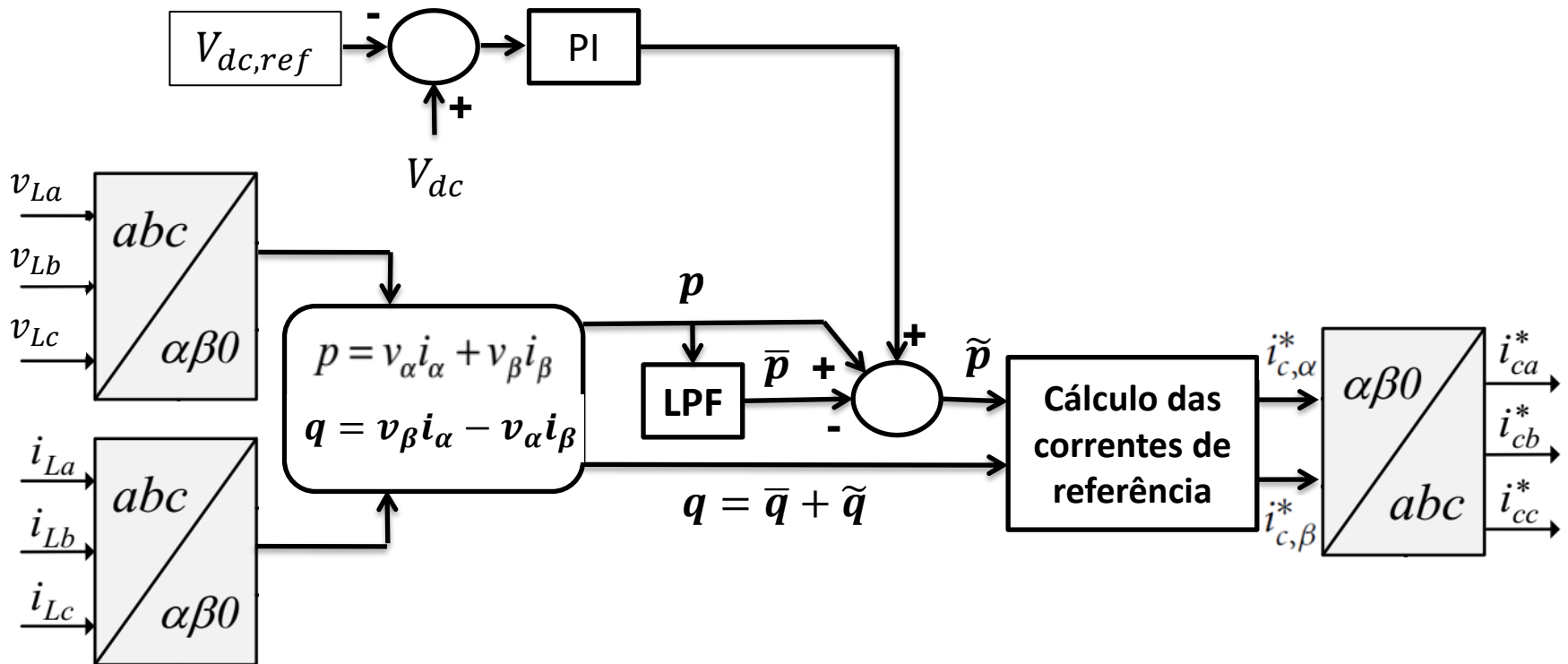
$$q = \bar{q} + \tilde{q}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \cdot \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \tilde{p}_L \\ \bar{q}_L + \tilde{q}_L \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} i_{c,a}^* \\ i_{c,b}^* \\ i_{c,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix}$$

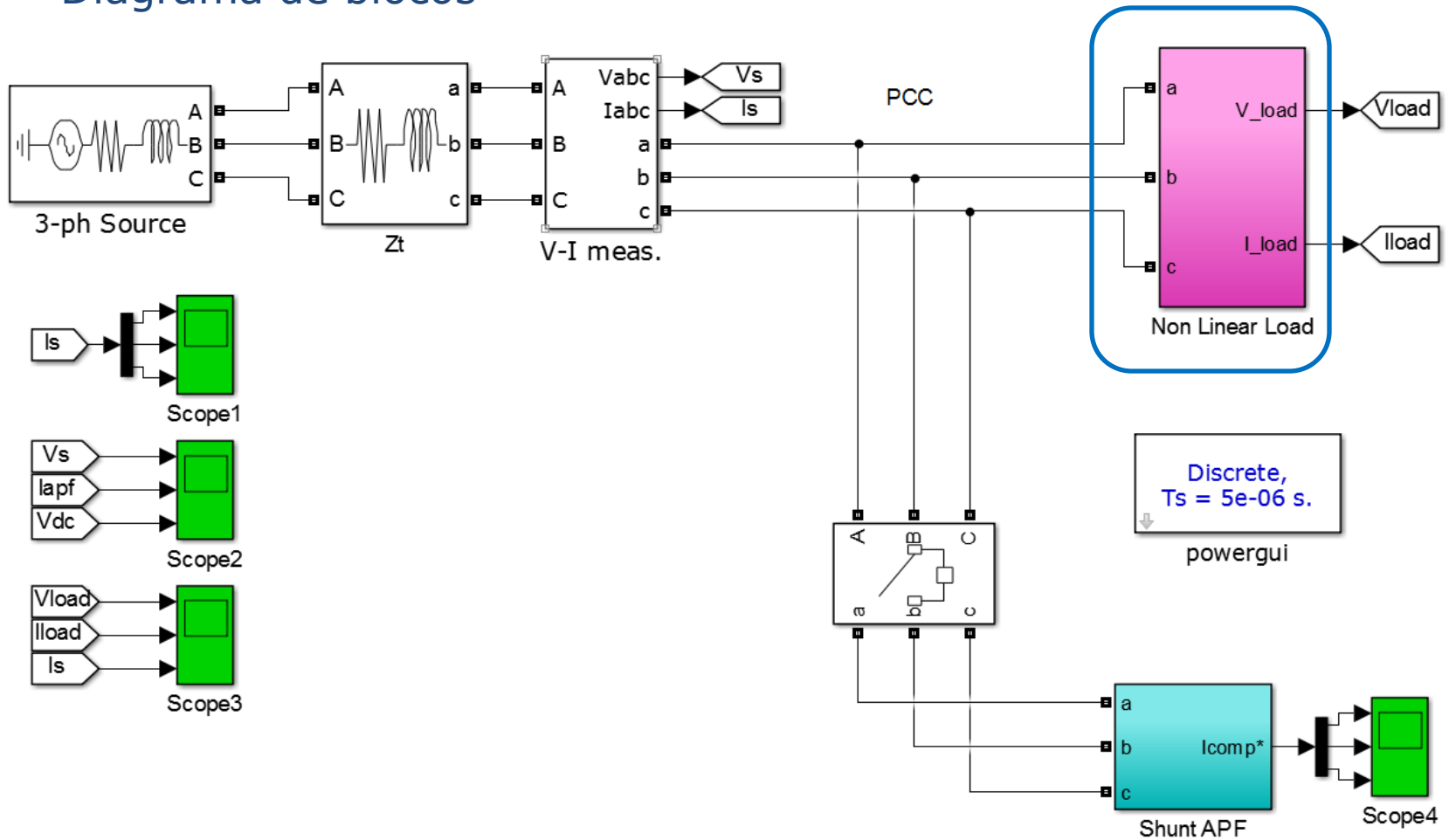
Controle Baseado na Teoria de Potência Instantânea

Diagrama de blocos



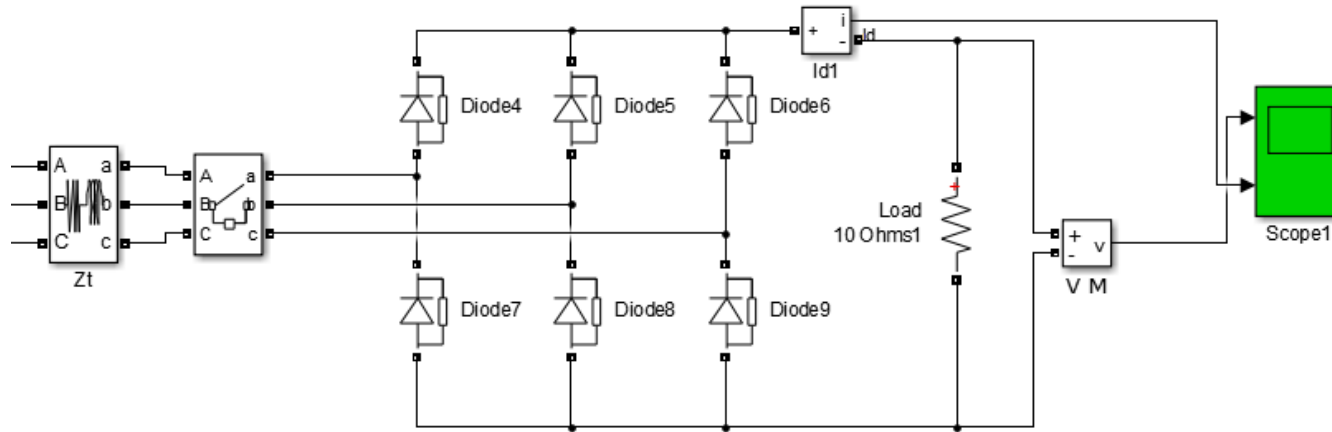
Simulação

Diagrama de blocos



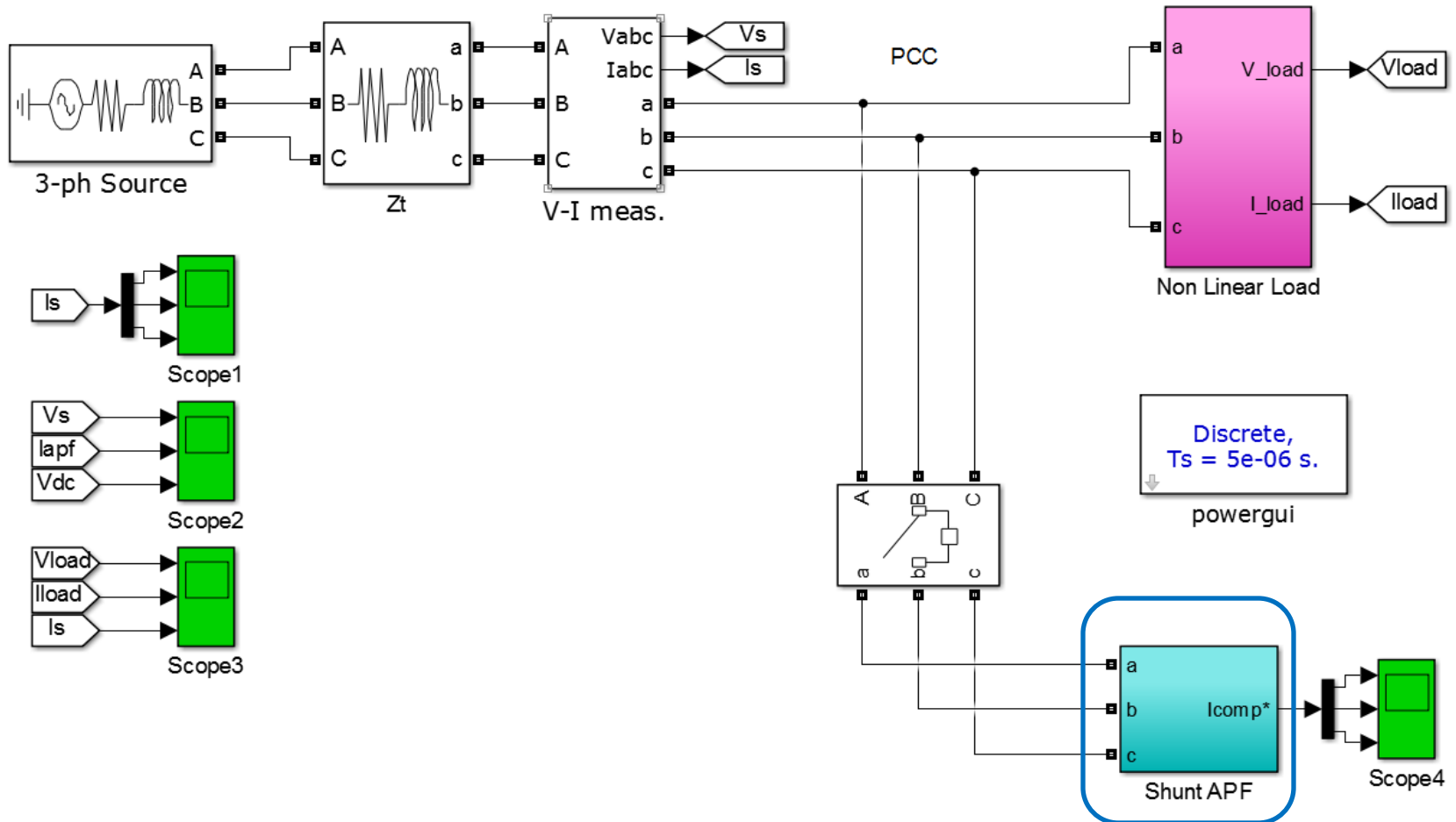
Simulação

Carça não linear



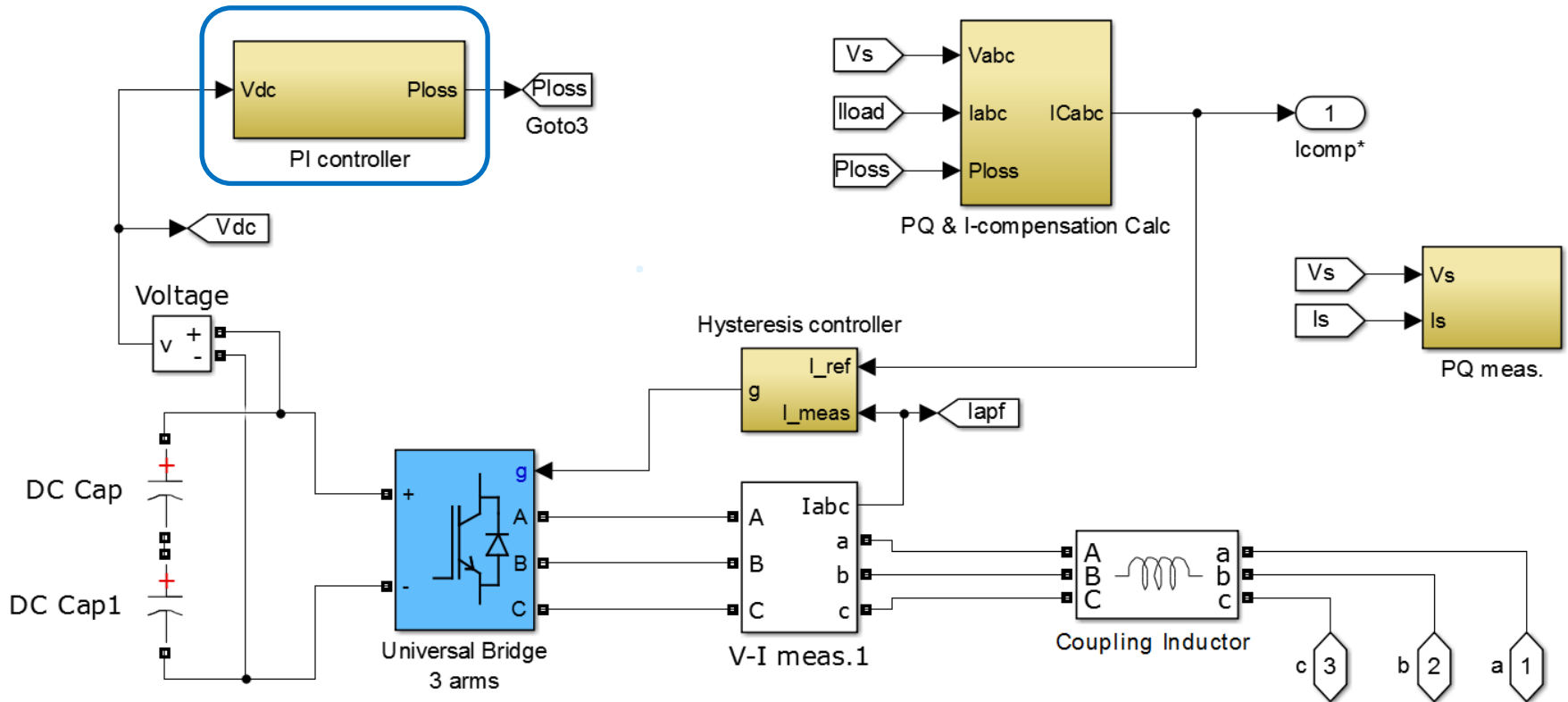
Simulação

Diagrama de blocos



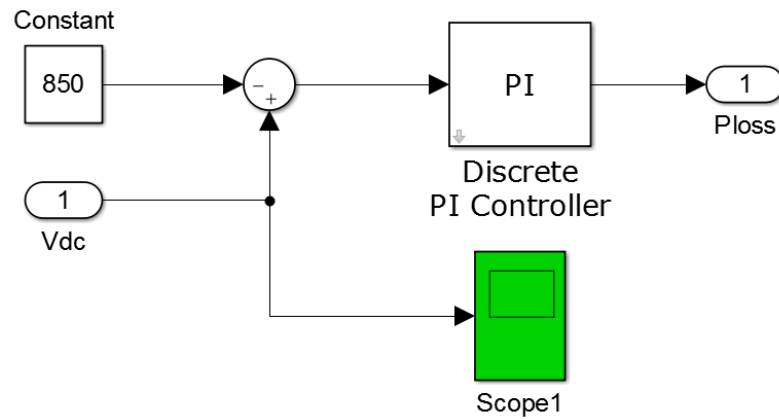
Simulação

Diagrama de blocos



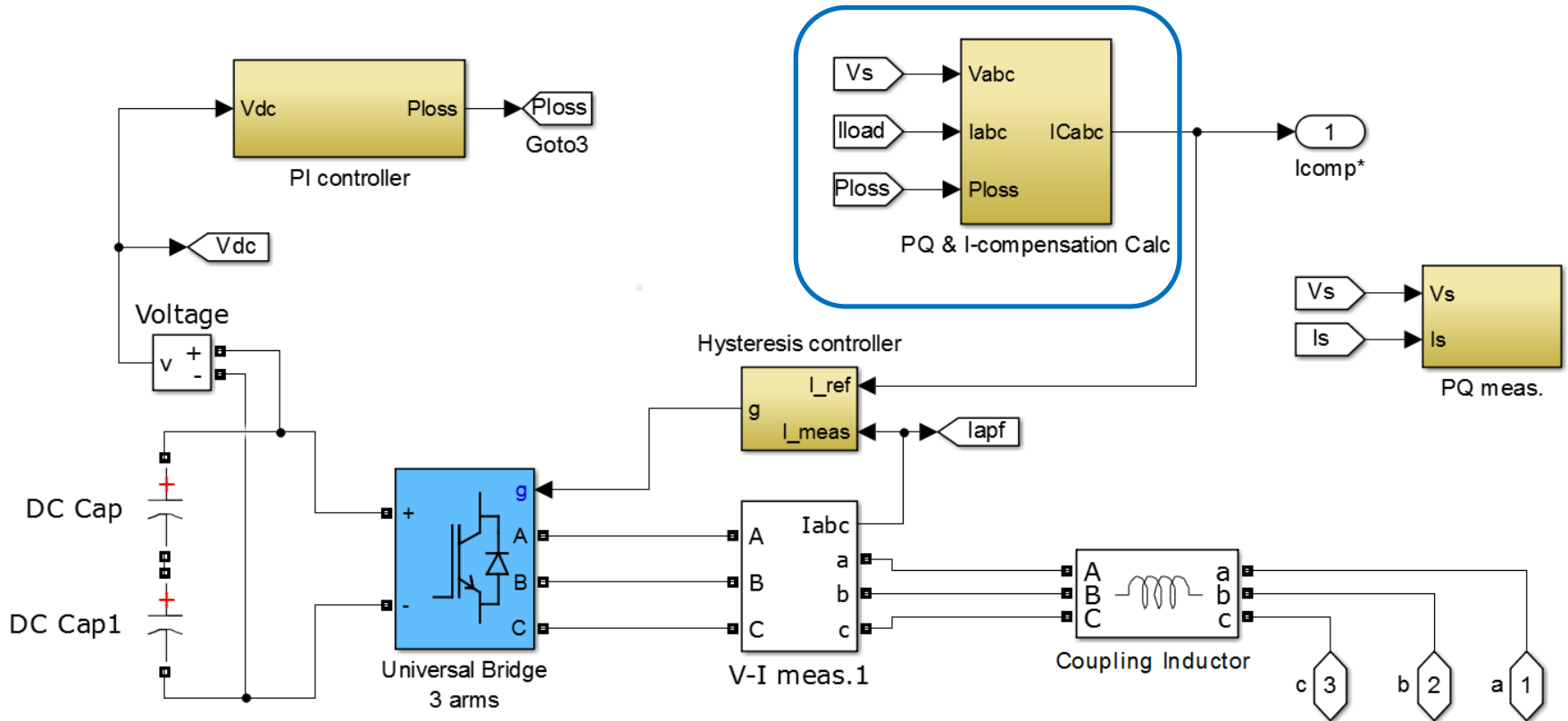
Simulação

Controle da tensão do barramento CC



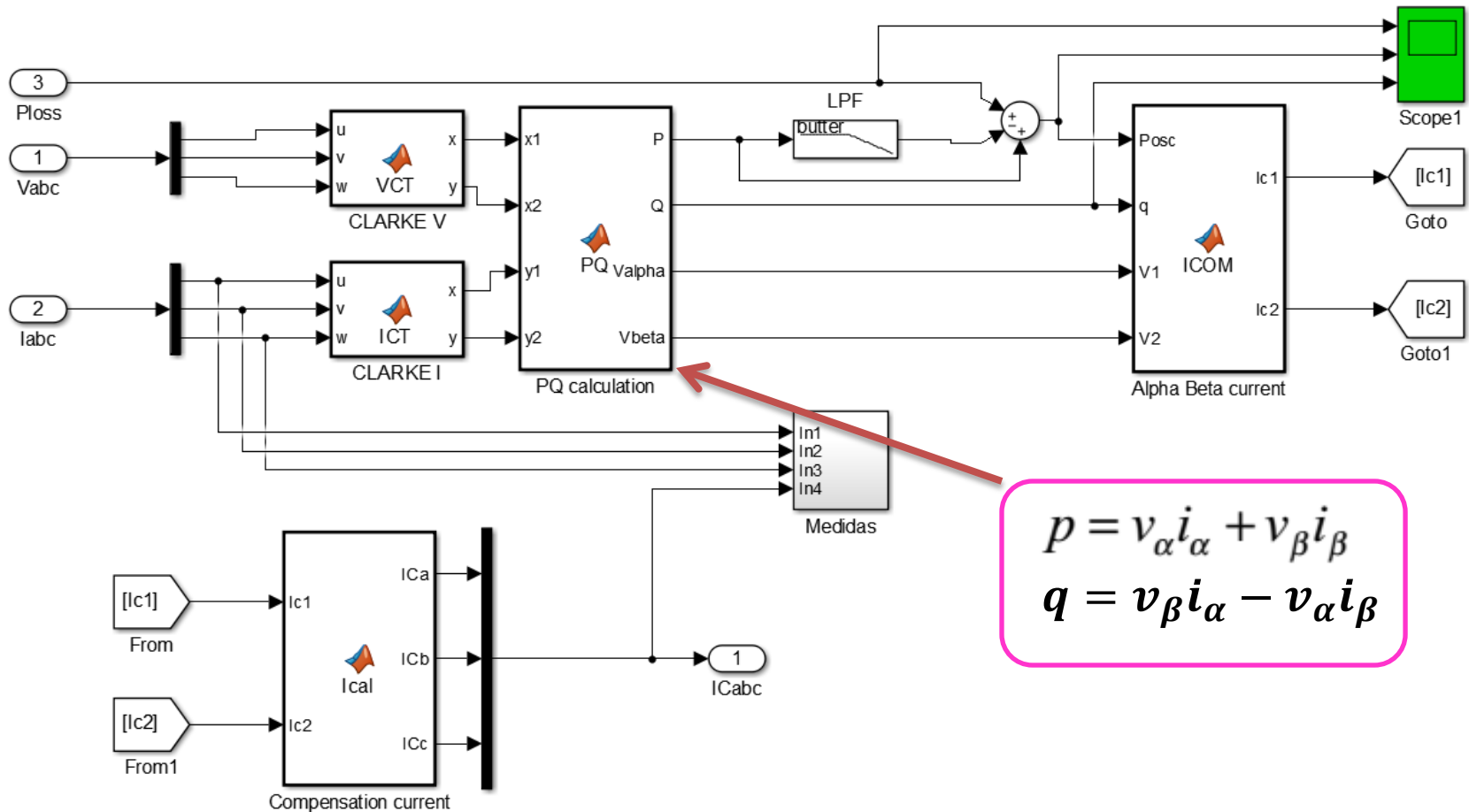
Simulação

Diagrama de blocos



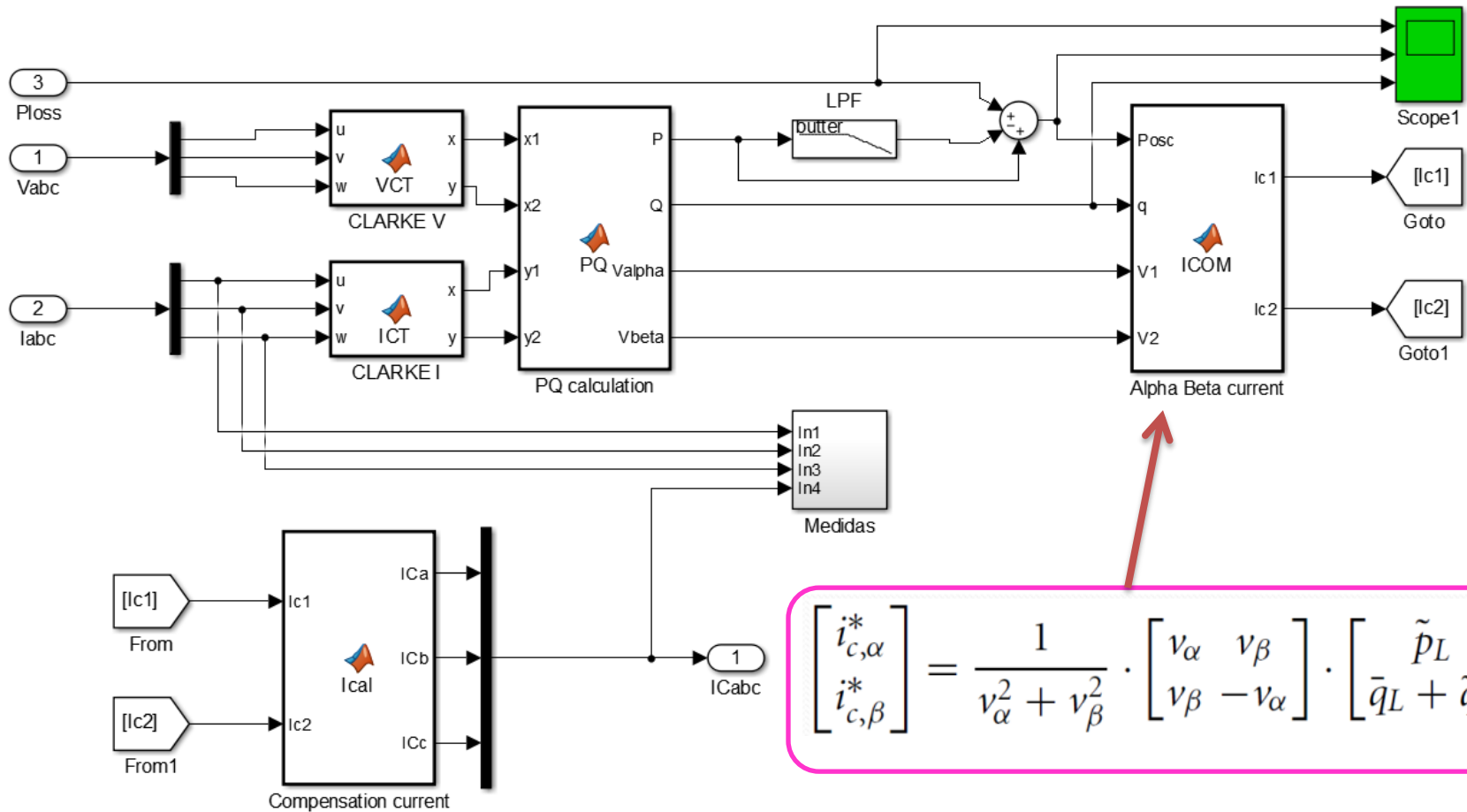
Simulação

Cálculo das correntes de referência



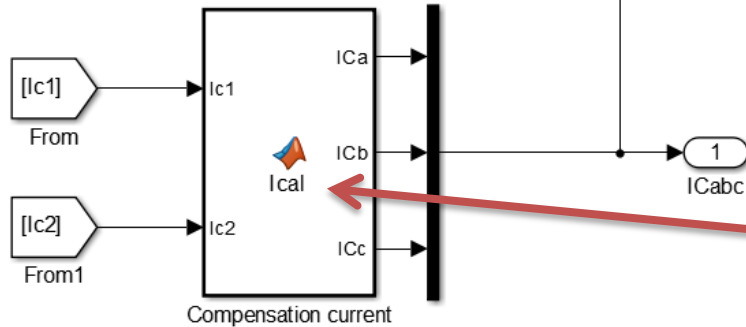
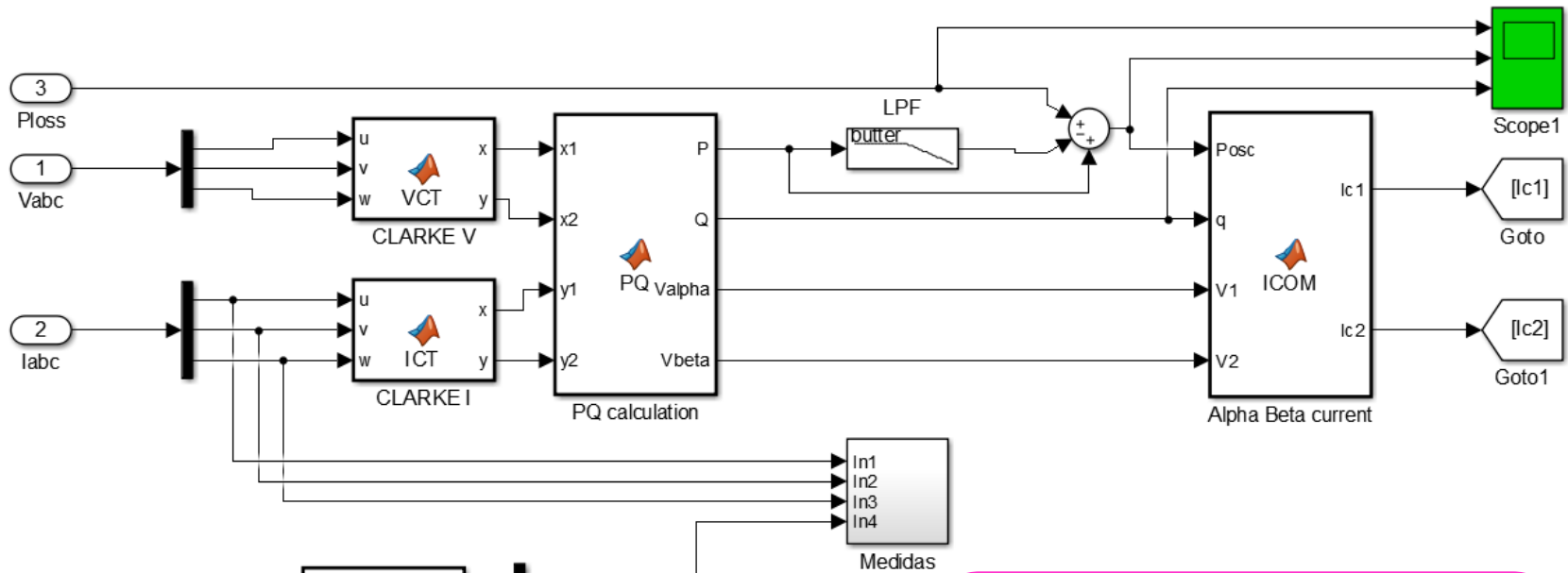
Simulação

Cálculo das correntes de referência



Simulação

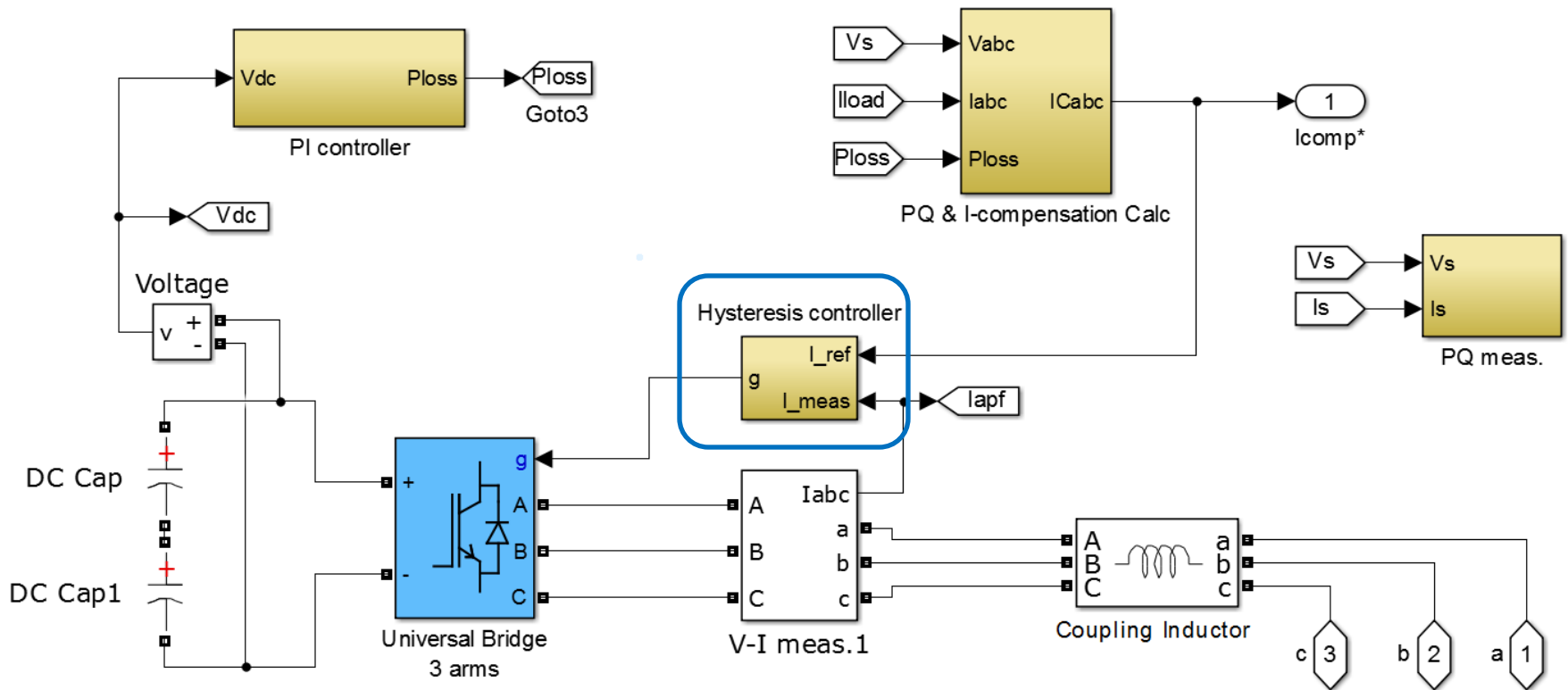
Cálculo das correntes de referência



$$\begin{bmatrix} i_{c,a}^* \\ i_{c,b}^* \\ i_{c,c}^* \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{c,\alpha}^* \\ i_{c,\beta}^* \end{bmatrix}$$

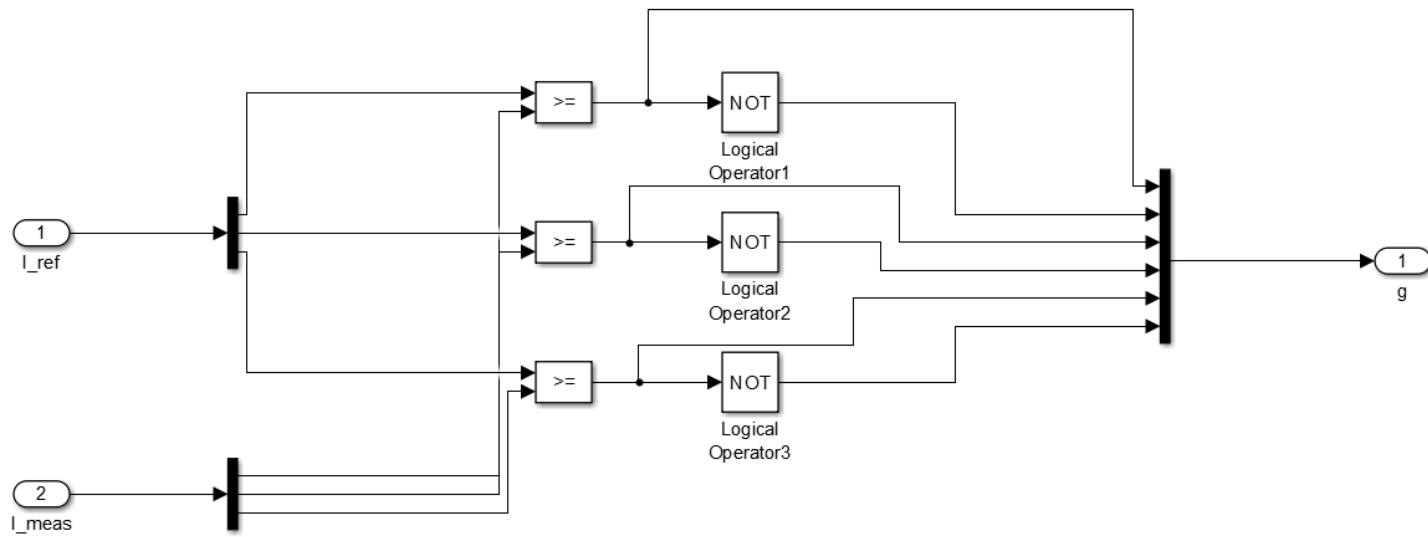
Simulação

Diagrama de blocos

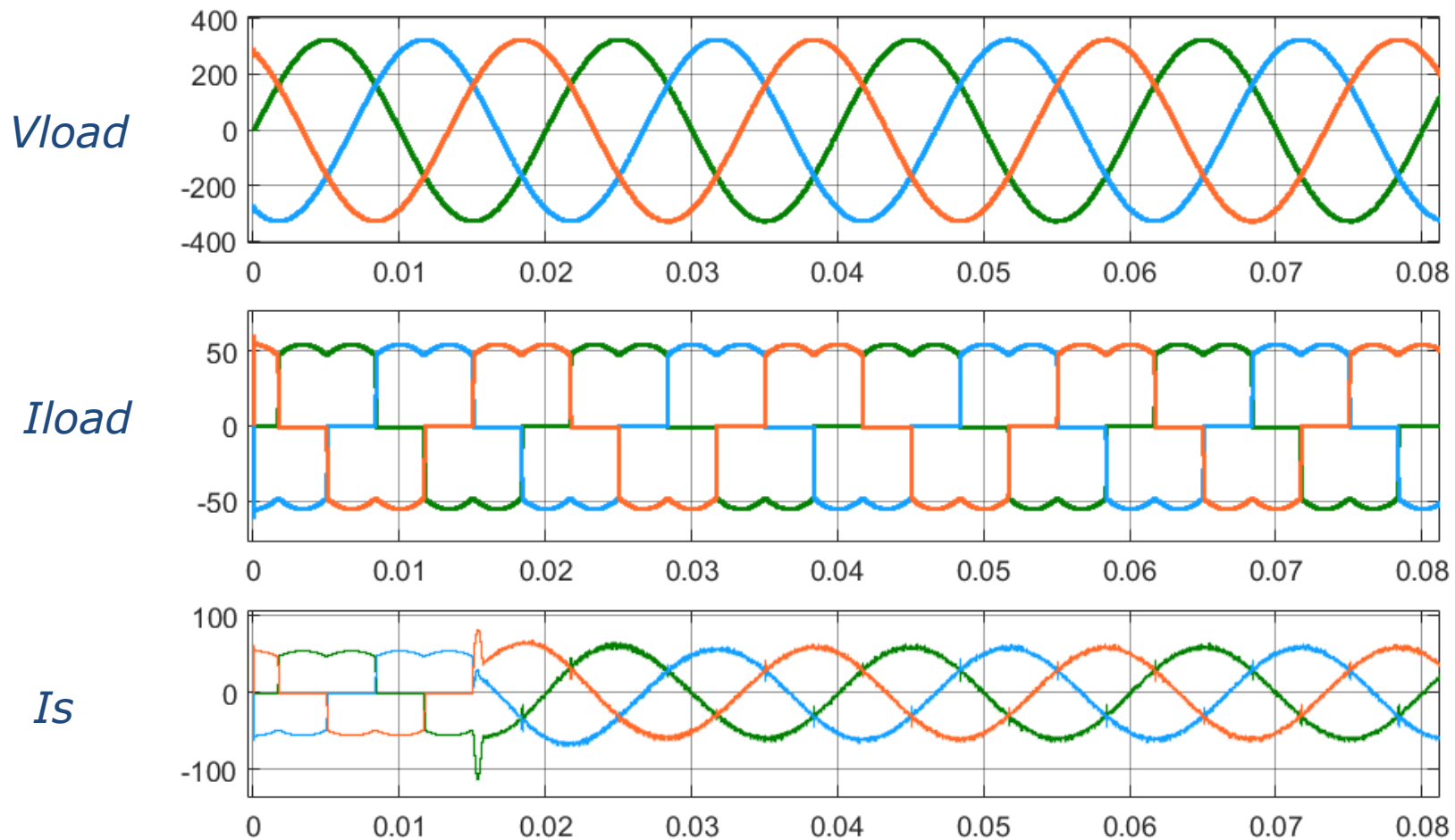


Simulação

Controle de corrente por histerese

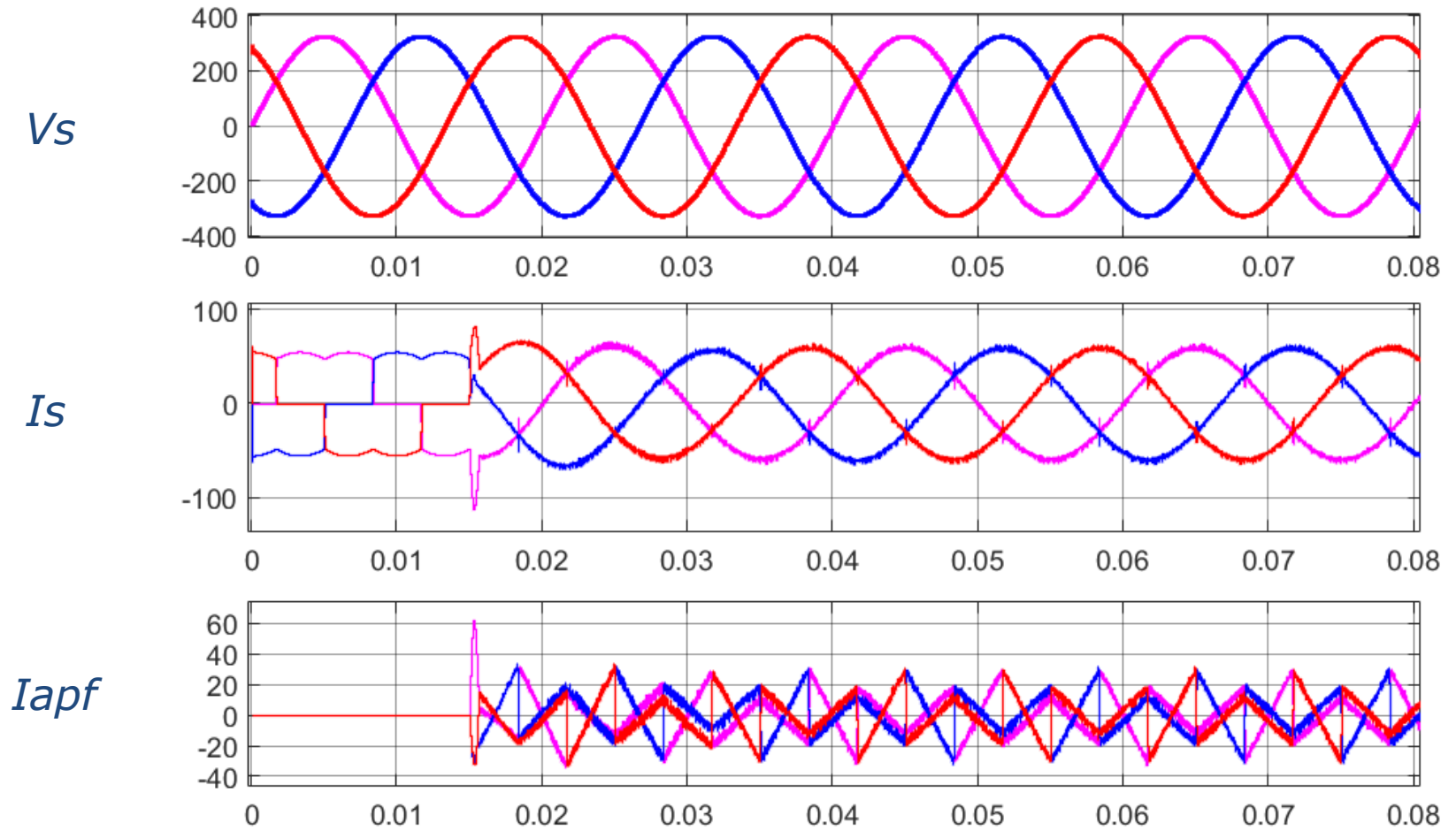


Simulação



Offset=0

Simulação



Referências Bibliográficas

1. Park Ki-Won “A Review of ACTIVE POWER FILTERS“, Apresentação, 2001.
2. M. Mezaroba; C. Rech; Correção do fator de potência, slides de disciplina, Universidade do Estado de Santa Catarina, UDESC.
3. I. Barbi; Correção ativa do fator de potência, apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, ago 2015.
4. J.A. Pomilio, Pré-reguladores de Fator de Potência, apostila de disciplina, UNICAMP, jan 2007.
<http://www.dsce.fee.unicamp.br/~antenor/>
5. Akagi, H. Watanabe, E. Aredes, M.; Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning, Wiley-IEEE Press, 2007.
6. CAMPANHOL, L. B. G.; Filtro Ativo De Potência Paralelo Utilizando Inversores Monofásicos Full-Bridge Aplicado Em Sistemas Trifásicos A Quatro-Fios, dissertação de mestrado, UTFPR, 2012.