

# 1 Teoria Aplicada em Filtros Ativos para Sistemas Elétricos

## 1.1 Potência Ativa, Reativa e Fator de Potência

Para entender melhor a definição de potência em circuitos elétricos, antes é necessário entender alguns conceitos utilizados no desenvolvimento matemático para a interpretação das grandezas físicas envolvidas. Ao longo da história, várias teorias foram abordadas e importantes trabalhos são reconhecidamente aceitos para detalhar de melhor maneira tanto casos específicos quanto generalistas no enfoque à relação de tensão e corrente de um circuito elétrico. Todo esse estudo deu origem à Teoria da Potência, a qual vem sendo estudada até os dias de hoje para o aprofundamento e elaboração de novos conceitos para explicar fenômenos de transferência de energia em circuitos elétricos [1].

A Teoria da Potência tem o intuito de avaliar a troca de energia entre fonte de potência elétrica e a carga sob o ponto de vista das características da tensão e corrente em seus terminais [2]. Esse estudo tem por finalidade aferir o fator de potência, a qual é um parâmetro intrínseco ao circuito e depende apenas das características da carga, independentemente da fonte.

Ainda na avaliação de troca de energia entre os elementos do circuito, o estudo da Teoria da Potência tem por finalidade prover informações a respeito da eficiência na troca de energia entre fontes e cargas. A eficiência na troca de potência em circuitos é avaliada segundo a corrente que circula pelo mesmo. Esse conceito afere a mínima corrente necessária para transferir uma quantidade de energia num determinado espaço de tempo dada uma tensão específica [2]. O fator de potência está intimamente ligado à eficiência na troca de energia, sendo que, em circuitos a qual seu valor é baixo, uma alta parcela da corrente é incapaz de gerar trabalho na saída do sistema. A consequência da presença de uma corrente excedente circulante é dada pela sobrecarga da fonte, aumento das perdas nos condutores e degradação da qualidade de energia, sendo esta última discutida na seção ???. Nessa seção é demonstrada que a incidência de correntes com distorção harmônica eleva a potência extraída da fonte para uma determinada carga ativa do sistema e, com isso o fator de potência é degradado, fazendo com que seu valor seja diminuído. Por esta razão, será mostrado que para o caso onde o fator de potência é unitário tem-se que a há plena eficiência na troca de energia entre fontes e cargas.

Dentre as principais grandezas a serem estudadas na Teoria da Potência elenca-se

a potência ativa e aparente. É conhecido que, na operação de um circuito elétrico, nem toda a corrente proveniente de uma fonte de tensão é convertida em trabalho por unidade de tempo. Nesse contexto aplica-se a definição de potência ativa, a qual é a corrente que efetivamente é transferida de uma fonte para a carga de maneira a gerar trabalho na saída do sistema. Há também a potência aparente, que é definida como a potência que é gerada por uma fonte de energia e que circula pelo sistema na forma de corrente elétrica, sem ser convertida em trabalho na saída do sistema. Esse contexto pode-se estender para o entendimento para qualidade de energia de um sistema

Para o estudo a seguir sobre a definição de potência, é necessário antes ter conhecimento de alguns conceitos matemáticos. Dentre esses conceitos, tem-se a determinação de valores eficazes de funções. Dada uma função qualquer no domínio do tempo  $f(t)$ , periódica cujo o período é dado por  $T$ , a formulação matemática para obter seu valor eficaz recai segundo a norma Euclidiana [1], dada pela seguinte equação:

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T f(t)^2 dt} \quad (1.1)$$

### 1.1.1 Circuitos Sinusoidais Monofásicos

Dada uma função  $f(t)$  sinusoidal com a frequência angular  $\omega t$  e amplitude cujo valor de pico é dado por  $F_p$ , tem-se que o valor eficaz de  $f(t)$  é dada segundo a equação:

$$F_{ef} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [F_p \cos(\omega t + \phi)]^2 dt} = \frac{1}{\sqrt{2}} F_p \quad (1.2)$$

Dessa forma, tem-se que o valor de pico de uma função sinusoidal é  $\sqrt{2}$  vezes maior que o valor eficaz. Cabe enfatizar que a determinação desse valor é independente da frequência angular da função.

De forma a melhor entender os conceitos da Teoria da Potência, é exposto um exemplo de modo a evidenciar a base com os conceitos que serão apresentados no entendimento do problema da qualidade de energia. O sistema considerado é estabelecido da forma mais simples para o estudo da transferência de potência, ou seja, considera-se um sistema monofásico, com fonte de tensão sinusoidal, alimentando uma carga linear e operando em regime permanente. Tal sistema pode ser visto na Figura 1. Com essas características definidas, espera-se que a forma de onda da corrente também apresente uma forma sinusoidal, com amplitude e defasagem distintas em relação à tensão. Isso ocorre devido a carga ser linear, a qual é explicada detalhadamente na seção ???. Com

isso, define-se as equações da tensão e corrente segundo as expressões 1.3 e 1.4, respectivamente.

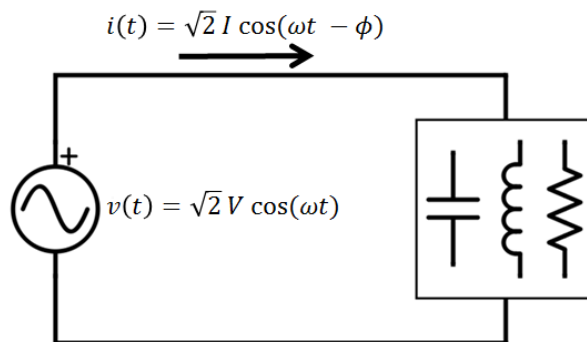


FIGURA 1 – Circuito monofásico, linear e operando em regime permanente

$$v(t) = \sqrt{2} V \cos(\omega t) \quad (1.3)$$

$$i(t) = \sqrt{2} I \cos(\omega t - \phi) \quad (1.4)$$

A potência instantânea em um circuito monofásico é definida segundo a equação 1.5.

$$\begin{aligned} p(t) &= v(t)i(t) \\ &= 2 V \cos(\omega t) I \cos(\omega t - \phi) \\ &= VI[\cos(\phi) + \cos(2\omega t - \phi)] \\ p(t) &= VI \cos(\phi)[1 + \cos(2\omega t)] + VI \sin(\phi) \sin(2\omega t) \end{aligned} \quad (1.5)$$

A equação 1.5 pode ser dividida em dois termos variantes no tempo: o primeiro é dado por

$$VI \cos(\phi)[1 + \cos(2\omega t)] \quad (1.6)$$

E o segundo por:

$$VI \sin(\phi) \sin(2\omega t) \quad (1.7)$$

Por definição, a potência ativa é definida pelo valor médio da equação 1.6, ou seja, pela expressão 1.8. Já a potência reativa é definida pelo valor de pico da equação 1.7, ou

também pela expressão 1.9.

$$P = VI \cos \phi \quad (1.8)$$

$$Q = VI \sin \phi \quad (1.9)$$

Uma rápida análise nas equações 1.6 e 1.7 trazem importantes considerações a respeito do modo de operação de um circuito monofásico, senoidal e linear. Primeiramente pode-se observar que a equação 1.6 é oscilatória e apresenta valores sempre positivos. A porção de potência ativa pode ser interpretada como a que proporciona o fluxo de energia proveniente da fonte para ser transformada em trabalho na carga. Essa consideração é válida para potência ativa visto que seu valor nunca é negativo. Ainda, por ser oscilatória, define-se como valor médio a transferência de potência da fonte para carga.

Por outro lado, a equação 1.7 apresenta um valor senoidal centrado em zero. Sua interpretação demonstra que a carga hora age como consumidora, hora age como fornecedora de potência. No caso em que a carga é linear esse efeito é causado pela inserção de elementos armazenadores de energia no circuito, como indutores e capacitores. A potência reativa é dada por não ser transformada em trabalho na saída do sistema, entretanto existe uma parcela da corrente que flui pelo circuito intrinsecamente ligado à esta potência.

As formas de onda que ilustram um caso específico dado por um sistema linear com tensão e correntes senoidais, com esta última defasada com relação à primeira, são mostradas na Figura 2. O gráfico superior apresenta a tensão, a corrente e a potência instantânea, que é obtida pela multiplicação de  $v(t)$  por  $i(t)$ . O gráfico inferior apresenta as formas de onda das expressões 1.6 e 1.7, além da potência instantânea. Aqui cabe observar também os valores de  $P$  e  $Q$ . Outra observação importante é o fato de a potência instantânea apresentar valores negativos em alguns intervalos de tempo. Durante esse intervalo tem-se que a carga está entregando potência para a fonte.

Além da concepção dos conceitos estabelecidos anteriormente sobre as potências  $P$  e  $Q$  existe outro parâmetro crucial no estabelecimento da Teoria da Potência de forma a integrar esses valores previamente estabelecidos. A concepção de potência aparente é dada como sendo a potência total fornecida pelo gerador e presente nas linhas de transmissão. De forma geral, tem-se que a definição de potência aparente é dada pela multiplicação dos valores eficazes da tensão e corrente, respectivamente, ou seja:

$$S = V I \quad (1.10)$$

Considerando agora o estudo específico onde o sistema é composto por uma fonte



FIGURA 2 – Circuito real monofásico

de tensão senoidal alimentando uma carga linear, pode-se ainda obter a expressão de potência aparente como sendo expressa através dos valores de  $P$  e  $Q$ . Analisando as equações 1.8 e 1.9 observa-se que estas estão defasadas em 90 graus. Com isso, pode-se obter o valor de potência aparente segundo a equação 1.11.

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{(VI \cos \phi)^2 + (VI \sin \phi)^2} = VI \quad (1.11)$$

Outra forma de obter o mesmo resultado é através da utilização de fasores para representar  $S$  em relação à  $P$  e  $Q$ . Definindo  $\dot{V}$  e  $\dot{I}$  como sendo os valores fasoriais da tensão e corrente de um sistema, tem-se que a potência aparente é escrita segundo a equação 1.12.

$$\mathbf{S} = \dot{V} \dot{I}^* = P + jQ = VI \cos \phi + jVI \sin \phi \quad (1.12)$$

O módulo  $\mathbf{S}$  leva à mesma expressão definida em 1.11. Considerando o plano imaginário encontrado a partir da utilização das grandezas fasoriais, podem-se expressar graficamente as potências do circuito linear operando em regime permanente através do triângulo de cargas representadas no plano imaginário.

O fator de potência é um parâmetro utilizado como forma de quantificar a eficiência na transmissão de potência entre componentes geradoras e consumidoras de um sistema. O fator de potência representa a relação entre a potência que necessariamente é utilizada na transferência de energia em um determinado instante de tempo entre a fonte e a carga

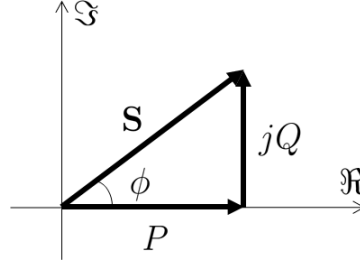


FIGURA 3 – Triângulo de potências

com o total de potência que percorre o sistema. A expressão que define o fator de potência é apresentado na equação 1.13. Os possíveis valores de  $\lambda$  estão contidos entre 0 e 1, ou seja,  $0 \leq \lambda \leq 1$ . Isto ocorre visto que  $S$  é uma função de  $P$ , e a relação  $S = \sqrt{P^2 + Q^2} \geq P$  é observada.

$$\lambda = \frac{P}{S} \quad (1.13)$$

Como forma de obter a plena eficiência na transmissão de potência, o fator de potência deve ser unitário, o que implica que  $Q = 0$ . Dessa maneira garante-se que toda a energia da fonte geradora é transformada em trabalho na saída do sistema, ou ainda, a fonte enxerga a carga como sendo composta por resistências apenas.

### 1.1.2 Circuitos Não Sinusoidais Monofásicos

Inserido no estudo da Teoria da Potência, a presença de distorções harmônicas em circuitos elétricos introduz novas condições que promovem o aumento da potência aparente e, conseqüentemente, degrada o fator de potência. Os primeiros estudos sobre este tema foi desenvolvido no final do século XIX [1, 3] com a verificação da relação com distorção harmônica e potência aparente. Dentre os trabalhos conseguintes, a principal contribuição foi dada por Budeanu na década de 20 [4], a qual propôs tratar a Teoria da Potência de sistemas não senoidais através do domínio da frequência com a série de Fourier. A proposta de Budeanu foi abordar a corrente e a tensão através da série de Fourier, ou seja, considerando a tensão e corrente como uma série de funções sinusoidais com frequências e amplitude distintas. Essa consideração trouxe a definição de valor eficaz para uma forma de onda não senoidais de tensão e corrente segundo a equação 1.14 [1].

$$V = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} V_h^2}; \quad I = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2} \quad (1.14)$$

Os parâmetros  $V_h$  e  $I_h$  denotam os valores eficazes das funções sinusoidais da h-

ésima harmônica. O desenvolvimento do conceito de  $V$  e  $I$  da equação 1.14 com a definição de potência aparente da equação 1.10 traz a introdução de um novo parâmetro, denominada de potência harmônica ou de distorção, cuja variável é  $D$ . Como ocorre na equação 1.11, pode-se definir a potência aparente através dos valores  $P$ ,  $Q$  com a introdução de  $D$ . Sendo assim, segundo Budeanu a potência aparente de uma função não senoidal é definida segundo a equação 1.15 [1, 3].

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (1.15)$$

Este conceito foi largamente aceito e utilizado ao longo de décadas, visto que traz uma maneira de explicar a lacuna do aumento da potência aparente em circuitos não senoidais com a introdução da potência de distorção  $D$  na definição do conceito de potência aparente [1]. Entretanto a teoria de Budeanu não é mais aceita de modo geral visto que existe várias deficiências nessa teoria [1, 3, 5]. Tais deficiências advêm da proposta de Budeanu, a qual traz interpretações errôneas das definições de potência, além de que estas não possuem nenhum atributo da qual podem relacionar o fenômeno de potência em circuitos não senoidais. Na teoria de Budeanu para circuitos não senoidais, a diminuição da potência reativa não preserva o conceito da diminuição da perda da linha para uma mesma transferência de energia [1, 3]. Outra deficiência dessa teoria é que está não traz nenhuma informação útil necessária no desenvolvimento de métodos para compensar a distorção. Além disso, os valores encontrados na teoria de Budeanu não são suficientes para prover informações relacionadas à distorção harmônica [3, 5]. Por esses motivos, a teoria introduzida por Budeanu, apesar de ser utilizado por muitos engenheiros, foi excluído da norma IEEE 1459 em sua recente revisão de 2010 [1].

Outro estudo proposto na mesma época e de forma independente à Budeanu foi feito por Stanislaw Fryze. Este focou seu estudo na Teoria da Potência no domínio do tempo e, apesar de apresentar algumas limitações, é suficientemente completa para o entendimento da questão da potência para o desenvolvimento de uma proposta a qual utilizaria compensadores para tratar de componentes de corrente indesejadas nas linhas do sistema.

Segundo Fryze, em sinais periódicos e com forma de onda qualquer pode-se basear a Teoria da Potência fundamentalmente na decomposição da corrente provida pela fonte entre componente ativa e reativa [3]. Considerando um sistema cuja corrente entregue pela fonte é definida por  $i(t)$ , pode-se decompor esta nas parcelas de  $i_p(t)$  e  $i_q(t)$ , sendo a primeira a componente ativa e a segunda a componente reativa da corrente, ou seja:

$$i(t) = i_p(t) + i_q(t) \quad (1.16)$$

Para definir a parcela da corrente ativa do sistema, é necessário primeiro entender o conceito de potência ativa para circuitos periódicos com forma de onda qualquer. O conceito de potência ativa do sistema com essas características é definido segundo o valor médio da potência instantânea, como mostra a equação 1.17, sendo que potência instantânea é definida pela multiplicação da tensão e corrente, representadas por  $v(t)$  e  $i(t)$ , respectivamente.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t) dt \quad (1.17)$$

A proposta de Fryze com a definição de corrente  $i(t)$  como a composição de componentes  $i_p$  e  $i_q$  foi a introdução de um conceito de condutância equivalente no sistema de modo a requerer apenas a parcela da corrente ativa  $i_p$  da fonte de tensão. A interpretação de tal condutância equivalente representa uma carga puramente resistiva, a qual para uma mesma tensão absorve a mesma potência ativa da carga realmente utilizada. A definição da corrente ativa, juntamente com a inclusão da condutância equivalente é dada a seguir [1]:

$$i_p(t) = \frac{P}{V^2} v(t); \quad G_P = \frac{P}{V^2} \implies i_p(t) = G_P v(t) \quad (1.18)$$

Utilizando equações 1.16 e 1.18 e realizando o produto interno entre as correntes ativas e reativas tem-se:

$$\begin{aligned} \langle i_p, i_q \rangle &= \frac{1}{T} \int_0^T i_p(t)i_q(t) dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T i_p(t)[i(t) - i_p(t)] dt \\ &= \frac{1}{T} \int_0^T \frac{P}{V^2} v(t)i(t) - \left( \frac{P}{V^2} v(t) \right)^2 dt \\ \langle i_p, i_q \rangle &= \frac{1}{T} \left[ \frac{P}{V^2} \int_0^T v(t)i(t) dt - \frac{P^2}{V^4} \int_0^T v(t)^2 dt \right] = 0 \end{aligned} \quad (1.19)$$

Isso leva a uma característica importante sobre a ortogonalidade apresentada entre  $i_p$  e  $i_q$ . Por serem ortogonais, a seguinte implicação é válida:

$$I^2 = I_p^2 + I_q^2 \quad (1.20)$$

Ainda, Fryze definiu o valor da potência reativa como sendo o produto dos valores eficazes da tensão e da corrente reativa, ou seja,  $Q = VI_q$ . Com essa relação e pela propriedade da ortogonalidade entre  $i_p(t)$  e  $i_q(t)$ , tem-se que a relação  $S^2 = P^2 + Q^2$ , tal



qual apresentada na equação 1.11, é válida para a teoria de Fryze.

Com sua teoria, Fryze foi capaz de quantificar o total de energia não útil que percorre o sistema na forma de corrente reativa. Com isso foi possível a introdução da ideia de compensadores ativos, visto que se tem conhecimento da parcela da corrente a qual deve ser anulada [1]. Entretanto sua teoria possui algumas limitações quanto à interpretação da corrente reativa, visto que não é possível classificar as características dos distúrbios presentes na corrente, além de que a definição de potência ativa proposto pela condutância equivalente não necessariamente é observada como de fato potência útil [3].

## 1.2 Potência Instantânea Utilizando a Teoria PQ em Circuitos Trifásicos

A potência instantânea utilizando a teoria P-Q é um conceito que utiliza de artifícios matemáticos para definir uma série de parâmetros presentes em circuitos elétricos trifásicos. A base da teoria consiste no estudo das tensões e correntes no domínio do tempo sem que haja restrição quanto ao balanceamento do sistema, à forma de onda e ainda podendo ser aplicada em regime transitório. Além disso, esta teoria pode ser utilizada tanto para circuitos trifásicos a três fios, quanto em circuitos a quatro fios com a presença de neutro. Uma das propostas concebida na utilização dessa teoria é a determinação das correntes circulantes do sistema as quais não transferem potências úteis à carga, fazendo desta uma poderosa ferramenta para ser utilizada no desenvolvimento de compensadores ativos para mitigar o efeito da circulação de potências não úteis do sistema. Com isso é possível conceber a eliminação de harmônicos, a compensação de reativos, ou mesmo a eliminação de desbalanços [6, 7].

Inicialmente tal teoria foi desenvolvida por Akagi [8], a qual definiu as tensões e correntes de um sistema trifásico como sendo valores instantâneos quantificados em espaços vetoriais  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{i}$ , respectivamente. Porém, em seu desenvolvimento inicial foi proposto a transformação do espaço vetorial nas coordenadas  $abc$ , a qual é definida pelo sistema de referência estacionário cujas tensões e correntes são defasadas em  $120^\circ$  entre si, para as coordenadas  $\alpha\beta 0$ , a qual o sistema de referência estacionário é dado ortogonalmente entre si [7]. Outra forma de tratar a definição de potência instantânea é trabalhando diretamente com o espaço vetorial nas coordenadas  $abc$ , sendo que as propriedades do sistema independem das coordenadas e são válidas tanto para o caso em que as definições são aplicadas em  $abc$  como em  $\alpha\beta 0$ .

### 1.2.1 Transformação de Coordenadas

A teoria da potência instantânea PQ desenvolvida inicialmente por Akagi [8] emprega a transformação das coordenadas de um sistema com fases  $abc$  para coordenadas  $\alpha\beta 0$ . O emprego dessa abordagem traz implicações de modo a poder introduzir sistemas trifásicos mais genéricos com a presença de sequência 0. Os resultados apresentados nessa abordagem apresentam as mesmas propriedades e interpretações de potência instantânea nas coordenadas  $abc$ , ou seja, estas independem do sistema de coordenada a qual é aplicada a teoria [9].

#### 1.2.1.1 Transformada de Clarke

A transformação de coordenadas das tensões instantâneas referenciadas no sistema  $abc$  para tensões instantâneas referenciadas no sistema  $\alpha\beta 0$  é feita através da aplicação da transformada de Clarke. Primeiramente considera-se que um sistema trifásico seja composto por tensões de fase  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  deslocadas em ângulo por  $120^\circ$  ( $2\pi/3$ ) entre si. Desse modo, utilizando a equação 1.21 obtém-se as novas tensões instantâneas  $v_\alpha$  e  $v_\beta$ , cujo ângulo de defasagem entre as tensões no eixo  $\alpha$  e  $\beta$  é dado por  $90^\circ$  ( $\pi/2$ ).

$$\begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} \quad (1.21)$$

Ainda, por apresentar uma matriz invertível, é possível transformar um sistema referenciado em coordenadas  $\alpha\beta 0$  para  $abc$ . Para a transformada inversa a relação a seguir é utilizada:

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_0 \\ v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} \quad (1.22)$$

Do mesmo modo que ocorre nas tensões, a transformada de coordenada também pode ser feita para a corrente. Uma propriedade importante observada nessa transformação é que esta pode ser utilizada independentemente à forma da corrente, ou seja, esta pode conter conteúdo harmônico que a transformação ainda é válida. Sendo assim a

equação 1.23 pode ser utilizada.

$$\begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (1.23)$$

Já a transformada inversa de coordenadas para a corrente é dada segundo a equação 1.24

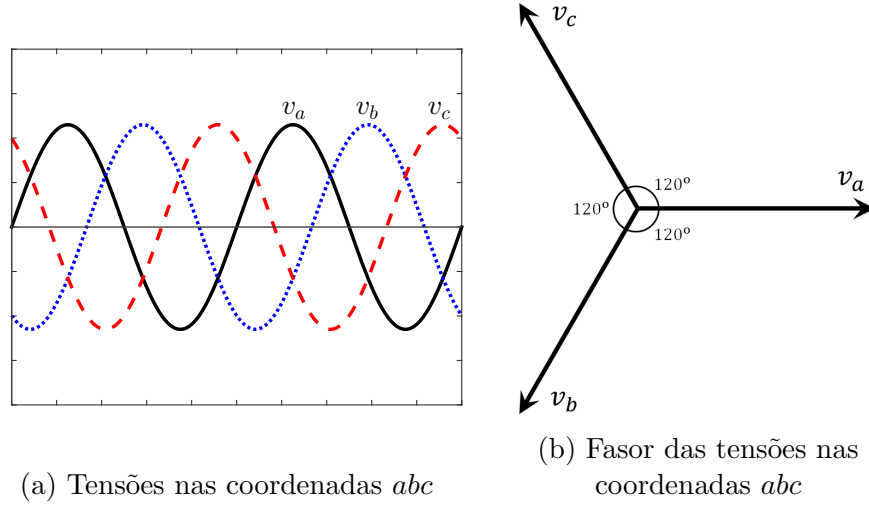
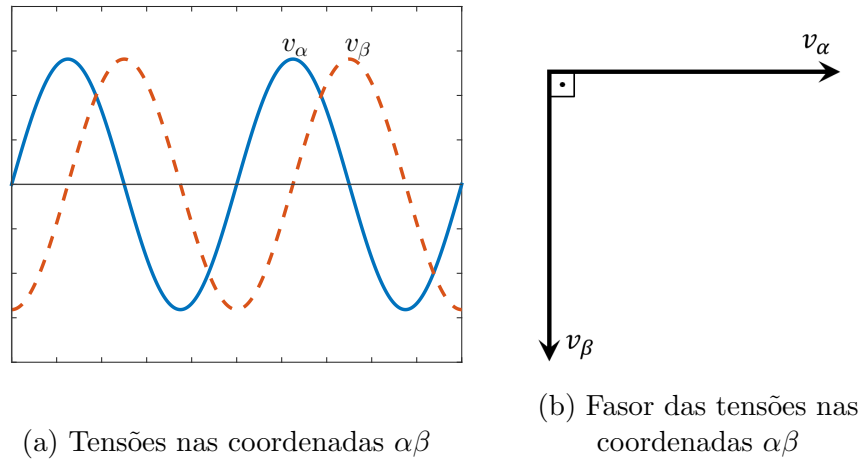
$$\begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_0 \\ i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.24)$$

Um dos triunfos da transformada de Clarke é a separação das componentes de sequência zero das tensões e correntes ( $v_0$  e  $i_0$  respectivamente) expressas nas coordenadas  $abc$ , ou seja, os eixos  $\alpha$  e  $\beta$  não carregam contribuições da sequência zero.

Para melhor visualizar a transformada de Clarke em um sistema trifásico balanceado, as figuras 4 e 5 mostram as tensões típicas de um sistema balanceado referenciado nas coordenadas  $abc$  e sua equivalente transformada nas coordenadas  $\alpha\beta 0$ , respectivamente. Nessas figuras além das formas de onda em função do tempo, representadas pelas figuras 4a e 5a há ainda os equivalentes fasoriais estacionários representados pelas figuras 4b e 5b. Através da análise dessas figuras fica claro o modo que a transformada de Clarke muda a referência de um sistema trifásico com tensões  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  defasadas em  $120^\circ$  para um sistema cuja representação  $v_\alpha$  e  $v_\beta$  estão defasadas em  $90^\circ$ .

### 1.2.2 Potência Instantânea em Coordenadas $\alpha\beta 0$

As potências instantâneas  $p$  e  $q$  podem ser calculadas independentemente das coordenadas definidas para as tensões e correntes. Nessa seção serão apresentadas as definições das potências considerando as coordenadas  $\alpha\beta 0$ . Primeiramente, tratando as tensões  $v_\alpha$ ,  $v_\beta$  e  $v_0$  segundo o espaço vetorial definido por  $\mathbf{v} = [v_\alpha \ v_\beta \ v_0]^T$  e, similarmente, definindo o espaço vetorial com as correntes  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$  e  $i_0$  no vetor  $\mathbf{i} = [i_\alpha \ i_\beta \ i_0]^T$ , a potência instantânea

FIGURA 4 – Sistema trifásico referenciado em coordenadas  $abc$ FIGURA 5 – Sistema trifásico referenciado em coordenadas  $\alpha\beta 0$ 

ativa  $p$  pode ser definida segundo a equação 1.25.

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} \quad (1.25)$$

$$p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0$$

Já a definição de potência reativa é descrita por um vetor composto pelos elementos  $q_\alpha$ ,  $q_\beta$  e  $q_0$  na forma de  $\mathbf{q} = [q_\alpha \ q_\beta \ q_0]^T$ , a qual é definido segundo a expressão:

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} \times \mathbf{i} \quad (1.26)$$

Ou seja, expandido a equação 1.26 define-se  $\mathbf{q}$  como o vetor apresentado na ex-

pressão 1.27 a seguir.

$$\mathbf{q} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\beta i_0 - v_0 i_\beta \\ v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \quad (1.27)$$

A norma do vetor  $\mathbf{q}$  representa o valor total da potência instantânea conforme a expressão 1.28. Cabe lembrar os valores  $q_\alpha$ ,  $q_\beta$  e  $q_0$  são variantes no tempo, fazendo com que o valor  $q$  seja uma função no tempo da mesma forma que  $p$ .

$$q = |\mathbf{q}| = \sqrt{q_\alpha^2 + q_\beta^2 + q_0^2} \quad (1.28)$$

Com a elucidação das potências instantâneas  $p$  e  $q$ , define-se certos parâmetros para o entendimento das propriedades e significados físicos de tais potências. Para tal, determina-se as correntes ativas e reativas instantâneas segundo as expressões 1.29 e 1.30, respectivamente.

$$\mathbf{i}_p = \begin{bmatrix} i_{\alpha p} \\ i_{\beta p} \\ i_{0p} \end{bmatrix} \triangleq \frac{p}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{v} \quad (1.29)$$

$$\mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} i_{\alpha q} \\ i_{\beta q} \\ i_{0q} \end{bmatrix} \triangleq \frac{\mathbf{q} \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \quad (1.30)$$

Além disso, as expressões 1.10 e 1.13 são válidas para os valores encontrados na teoria das potências instantâneas, ou seja,  $S = vi$  e  $\lambda = p/s$ . Conforme apresentado em [9], tais definições apresentam certos teoremas que demonstram algumas propriedades da teoria da potência instantânea.

A primeira propriedade importante advém da corrente  $\mathbf{i}$  que percorre o sistema trifásico nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  como sendo a composição das correntes  $\mathbf{i}_p$  e  $\mathbf{i}_q$ , ou seja,  $\mathbf{i} \equiv \mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q$ . Tal demonstração dá-se pela expansão das expressões 1.29 e 1.30, a qual é

mostrada pela equação 1.31.

$$\mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q = \begin{bmatrix} v_\alpha \left( \frac{v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \right) \\ v_\beta \left( \frac{v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \right) \\ v_0 \left( \frac{v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta + v_0 i_0}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \right) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{v_0(v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0) - v_\beta(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha)}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \\ \frac{v_\alpha(v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha) - v_0(v_\beta i_0 - v_0 i_\beta)}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \\ \frac{v_\beta(v_\beta i_0 - v_0 i_\beta) - v_\alpha(v_0 i_\alpha - v_\alpha i_0)}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \mathbf{i} \quad (1.31)$$

Outra importante propriedade é dada pelo paralelismo entre os vetores  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{i}_p$  em todo espaço vetorial, ou seja,  $\mathbf{v} \times \mathbf{i}_p \equiv 0$ . Para demonstrar essa propriedade a equação 1.32 pode ser analisada. Esse teorema tem um importante significado, a qual é a definição da corrente que se encarrega com a transferência da potência ativa instantânea entre subsistemas. Isto ocorre visto que a tensão e corrente instantâneas estão sob o mesmo eixo. Desta forma pode-se atribuir a dimensão de Watt (W) para a potência proveniente do produto entre  $\mathbf{v}$  e  $\mathbf{i}_p$ .

$$\mathbf{v} \times \mathbf{i}_p = \mathbf{v} \times \left( \frac{p}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \mathbf{v} \right) = \mathbf{0} \quad (1.32)$$

Analogamente a propriedade explanada anteriormente, observa-se a ortogonalidade entre a tensão  $\mathbf{v}$  e a corrente  $\mathbf{i}_q$ , ou seja,  $\mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q \equiv 0$ . A demonstração dessa propriedade pode ser analisada segundo a equação 1.33. Como explicado anteriormente, o produto entre as tensões e correntes reativas não proporcionam a transferência de potência entre a fonte e a carga. Desse modo a dimensão de tal potência não pode ser considerada W, VA ou VAR, sendo que os autores de tal teoria introduziram uma nova unidade: Volt-Ampere Imaginário (vai) [8].

$$\begin{aligned} \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q &= \mathbf{v} \cdot \left( \frac{\mathbf{q} \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\ &= \mathbf{v} \cdot \left( \frac{(\mathbf{v} \times \mathbf{i}) \times \mathbf{v}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\ &= \mathbf{v} \cdot \left( \frac{-(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})\mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})\mathbf{i}}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \right) \\ &= \frac{-(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}) + (\mathbf{v} \cdot \mathbf{v})(\mathbf{i} \cdot \mathbf{v})}{\mathbf{v} \cdot \mathbf{v}} \\ \mathbf{v} \cdot \mathbf{i}_q &= 0 \end{aligned} \quad (1.33)$$

A observação apresentada na equação 1.32 e 1.33 trás uma implicação importante, na qual infere a ortogonalidade entre as correntes  $\mathbf{i}_p$  e  $\mathbf{i}_q$  no sistema, ou seja,  $\mathbf{i}_p \cdot \mathbf{i}_q \equiv 0$ .

Deste modo, a seguinte relação pode ser obtida:

$$\begin{aligned}
 i^2 &= \mathbf{i} \cdot \mathbf{i} = (\mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q) \cdot (\mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q) \\
 &= \mathbf{i}_p \cdot \mathbf{i}_p + \mathbf{i}_q \cdot \mathbf{i}_q + 2(\mathbf{i}_p \cdot \mathbf{i}_q) \\
 &= i_{\alpha p}^2 + i_{\beta p}^2 + i_{0p}^2 + i_{\alpha q}^2 + i_{\beta q}^2 + i_{0q}^2 \\
 i^2 &= i_p^2 + i_q^2
 \end{aligned} \tag{1.34}$$

Deste modo observa-se uma semelhança entre a teoria de potência PQ e a teoria apresentada por Fryze. Todavia deve ser lembrado que a demonstração anterior é válida para sistemas trifásicos com ou sem neutro, ao passo que a teoria de Fryze é utilizada para explicar os efeitos da potência em circuitos monofásicos.

### 1.2.3 Potência Instantânea em coordenadas $abc$

A teoria das potências instantâneas apresentada anteriormente é baseada em sistemas trifásicos cujas tensões  $abc$  têm suas coordenadas transformadas para a referência  $\alpha\beta 0$ . Entretanto tal teoria não é limitada às coordenadas do sistema, sendo que a aplicação das definições e teoremas apresentadas anteriormente são válidas para o sistema trifásico baseado nas coordenadas  $abc$ . Deste modo a definição de tensão instantânea passa a compor o espaço vetorial na forma  $\mathbf{v} = [v_a \ v_b \ v_c]^T$  onde as tensões  $v_a$ ,  $v_b$  e  $v_c$  são as tensões das fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  de um sistema trifásico qualquer, respectivamente. O mesmo vale para a corrente  $\mathbf{i} = [i_a \ i_b \ i_c]^T$ , com as correntes  $i_a$ ,  $i_b$  e  $i_c$  sendo as correntes nas linhas que compõem as fases  $a$ ,  $b$  e  $c$ , respectivamente. Com isso as mesmas equações 1.25 e 1.26 já apresentadas podem ser aplicadas aqui, com a diferença que os valores dos vetores são referenciados nas coordenadas  $abc$ . Sendo assim:

$$\begin{aligned}
 p &= \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} \\
 p &= v_a i_a + v_b i_b + v_c i_c
 \end{aligned} \tag{1.35}$$

$$\mathbf{q}_{abc} = \begin{bmatrix} q_a \\ q_b \\ q_c \end{bmatrix} = \mathbf{v}_{abc} \times \mathbf{i}_{abc} \tag{1.36}$$

Independentemente das coordenadas utilizadas os valores instantâneos das potências ativa e reativa são idênticos em todo espaço de tempo. Dessa forma as relações  $p = \mathbf{v}_{abc} \cdot \mathbf{i}_{abc} = \mathbf{v}_{\alpha\beta 0} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta 0}$  e  $q_{\alpha\beta 0} = |\mathbf{q}_{\alpha\beta 0}| = |\mathbf{q}_{abc}| = q_{abc}$  são válidas. Além disso, as definições e propriedades de correntes ativa e reativa instantâneas são válidas para as coordenadas  $abc$ .

Fisicamente a interpretação das potências nas coordenadas  $abc$  é de mais fácil entendimento comparativamente às coordenadas  $\alpha\beta 0$ , visto que as denotações são válidas para cada fase propriamente dita, sem a utilização da transformação de coordenadas. Porém o emprego da transformada de Clarke é de grande valia em razão de que esta separa as tensões e correntes  $v_0$  e  $i_0$  dos eixos  $\alpha$  e  $\beta$ , de modo que a realização das potências instantâneas nessa coordenada é mais conveniente em se tratando de circuitos com a presença de sequência zero. Não somente em tais circuitos a transformada de Clarke é vantajosa, será visto mais a frente que a ausência de componentes de sequência zero simplifica o algebrismo pois as matrizes utilizadas têm suas dimensões diminuídas, o que torna a concepção de compensadores simplificada.

#### 1.2.4 Teoria PQ em Sistemas Trifásicos a Três Fios

A teoria de potência instantânea apresentada anteriormente apresenta uma poderosa ferramenta para o estudo do comportamento de sistemas elétricos trifásicos genéricos. Esta teoria é baseada no domínio do tempo e pode ser aplicada em regime transitório ou permanente, em sistemas balanceados ou desbalanceados, trifásicos com ou sem a presença de neutro. A complexidade fica a cargo da abrangência das características presentes no sistema sob estudo. Para o caso específico de uso aeronáutico, certas particularidades nas características do sistema elétrico fazem com que a teoria de potência instantânea possa ser realizada com algumas simplificações sem perda de generalidade, ou seja, o resultado obtido é exatamente o mesmo caso seja utilizado a teoria sem as simplificações.

Dentre as principais características de um sistema aeronáutico, àquelas que proporcionam relevância no estudo da teoria da potência são:

- Sistemas balanceados
- Desconsideração do fio neutro

Os sistemas podem ser considerados balanceados visto que a geração de energia elétrica é proveniente de geradores que, por seus aspectos construtivos, possuem a geração de tensões senoidais balanceadas sem a presença de sequência negativa ou zero. Ainda, as normas aeronáuticas exigem que as cargas sejam distribuídas de maneira balanceada nas fases, de modo a não haver quedas de tensão nas fases evitando desbalancear as tensões do sistema trifásico no PCC.

Apesar da geração e distribuição elétrica em aeronaves com sistema trifásico ser baseada na presença do fio neutro, os equipamentos a qual a teoria da potência instantânea será implementada para realização da filtragem ativa são projetadas essencialmente a três



fios ou com a desconsideração do neutro. Isto se deve ao fato de que as cargas trifásicas a qual apresentam não linearidades e, conseqüentemente, injeção de harmônicas no sistema são majoritariamente sem a presença do neutro. Para o caso em que o neutro faz-se presente a corrente nesta acaba por ser nula dado pelo equilíbrio das correntes nas linhas do circuito, cabendo a desconsideração deste na teoria da potência instantânea elucidada neste trabalho. As cargas trifásicas sem a presença de neutro são basicamente àquelas cuja entrada apresenta uma ponte de Graetz, como mostrado na Figura 6. Já as cargas não lineares com a conexão de neutro são baseadas na presença de transformadores cuja saída é conectada a uma ponte de elementos semicondutores. Para este último caso a corrente no neutro é nula e pode ser desconsiderada nos cálculos de potência instantânea. Um exemplo desta última carga é mostrada na Figura 7.

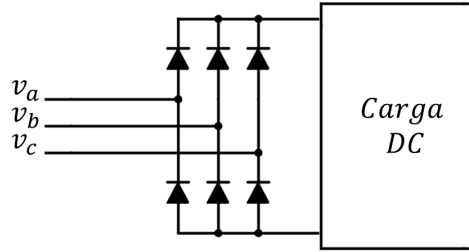


FIGURA 6 – Retificador trifásico por ponte de Graetz

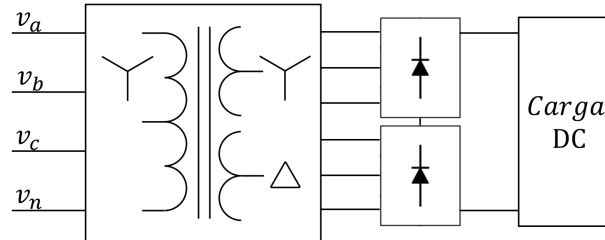


FIGURA 7 – Retificador trifásico com neutro

Com as simplificações propostas nessa seção, os valores instantâneos de  $v_o$  e  $i_o$  tem valores nulos. Utilizando as definições propostas nas equações 1.25 e 1.26 levando em conta os valores  $v_o = 0$  e  $i_o = 0$ , as potências instantâneas  $p$  e  $q$  são definidas a seguir:

$$p = \mathbf{v} \cdot \mathbf{i} = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta \quad (1.37)$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{v} \times \mathbf{i} = \begin{bmatrix} q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ v_\alpha i_\beta - v_\beta i_\alpha \end{bmatrix} \quad (1.38)$$

Pela definição de potência instantânea reativa definida pela equação 1.28, o valor

de  $q$  é denotado por:

$$q = |\mathbf{q}| = q_0 \quad (1.39)$$

As potências instantâneas definidas podem ser combinadas em uma matriz, como mostrado na equação 1.40. Nesta expressão estão presentes tanto a consideração da presença dos valores de corrente e tensão de sequência zero, como também os valores das potências  $p$  e  $q$  com a implicação que traz com a exclusão de  $v_0$  e  $i_0$

$$\begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta & v_0 \\ 0 & -v_0 & v_\beta \\ v_0 & 0 & -v_\alpha \\ -v_\beta & v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix}; \quad \begin{matrix} v_0 = 0 \\ i_0 = 0 \end{matrix} \Rightarrow \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ -v_\beta & v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.40)$$

Outra maneira de definir as potências instantâneas baseadas na exclusão das componentes de sequência zero  $v_0$  e  $i_0$  é a partir da transformada fasorial das tensões e correntes nas coordenadas  $\alpha\beta$ . Sendo os valores das tensões nos eixos  $\alpha$  e  $\beta$  defasados em  $90^\circ$ , as tensões e correntes fasoriais podem ser definidos a seguir:

$$\mathbf{v} = v_\alpha + jv_\beta \quad (1.41)$$

$$\mathbf{i} = i_\alpha + ji_\beta \quad (1.42)$$

Pela definição de potência aparente no espaço vetorial dada por  $\mathbf{s} = \mathbf{vi}^*$ , onde (\*) denota o valor conjugado, a potência aparente em termos das tensões e correntes nas coordenadas  $\alpha$  e  $\beta$  é dado por:

$$\mathbf{s} = \mathbf{vi}^* = (v_\alpha + jv_\beta)(i_\alpha - ji_\beta) = (v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta) + j(v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta) \quad (1.43)$$

Pela própria definição de potência, os valores presentes no eixo real são definidos como sendo a potência ativa ao passo que as potências no eixo imaginário são definidas como as potências reativas. Deste modo, através da equação 1.43 os valores ativos e reativos são definidos por  $p = v_\alpha i_\alpha + v_\beta i_\beta$  e  $q = v_\beta i_\alpha - v_\alpha i_\beta$ , ou também na forma:

$$\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} \quad (1.44)$$

Nota-se uma inversão de sinal na potência instantânea reativa  $q$  entre a teoria originalmente apresentada por [8] e exposta na equação 1.40 com a teoria da potência apresentada na expressão 1.44. Ambas as teorias são válidas quanto a aplicabilidade e no design de compensadores ativos, entretanto, segundo [6], a teoria na equação 1.44 apresenta um significado melhor aceito dado o conceito convencional que correntes em atraso (indutivo) apresentam sinal corretamente definidos com a utilização da equação 1.44.

### 1.2.5 Significado Físico dos Parâmetros da Teoria PQ

As definições apresentadas anteriormente são suficientes para elucidar os conceitos físicos que as potências instantâneas  $p$  e  $q$  apresentam.

Como já explicado anteriormente, o conceito de potência instantânea ativa advém do produto entre tensão e corrente as quais estão dispostos em eixos paralelos de um espaço vetorial, independentemente das coordenadas utilizadas. Deste modo, para um sistema trifásico com ou sem neutro, a potência ativa tem seu significado físico descrito pelo fluxo de energia por unidade de tempo entre dois subsistemas [6]. Cabe salientar que  $p$  é descrito como uma função no tempo, sendo que o valor em determinados instantes representam o fluxo de potência instantânea. Esta definição pode diferir com o conceito clássico da teoria de potência que utiliza de valores médios para determinar a transferência de potência entre dois subsistemas.

Analogamente à  $p$ , a potência reativa instantânea  $q$  é definida como o produto de tensões e correntes perpendiculares no espaço vetorial, deste modo sua contribuição no fluxo de energia por unidade de tempo entre dois subsistemas é descrito como nulo. Dessa forma, o significado físico que descreve a potência reativa instantânea  $q$  é o fluxo de energia por unidade de tempo que é trocado entre as fases do sistema sem que haja transferência entre subsistemas. Esta característica só é encontrada em sistemas trifásicos e não pode ser aplicado a circuitos monofásicos separadamente. A Figura 8 demonstra uma maneira de observar a presença das potências em um sistema trifásico qualquer. Em tal figura pode-se observar que em um determinado instante de tempo uma potência trifásica denominada  $p_{3\phi} = p + p_0$  flui de um subsistema para outro, ao passo que a  $q$  esta contido na troca de potência entre as fases, sem contribuir para o fluxo de energia entre subsistemas. Mesmo assim, deve-se lembrar de que a presença de  $q$  faz com que as correntes de fase são acrescidas, como descrito anteriormente.

Para o melhor entendimento, considera-se o exemplo a seguir realizado com a utilização do circuito da Figura 9. Esse sistema é composto por um circuito trifásico a quatro fios alimentado uma carga de capacitores com capacitâncias  $C_1$ ,  $C_2$  e  $C_3$ .

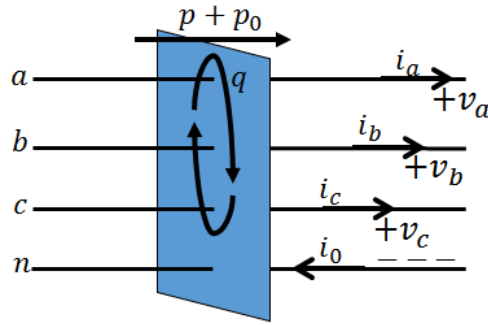


FIGURA 8 – Circulação das potências instantâneas em um sistemas trifásico [6]

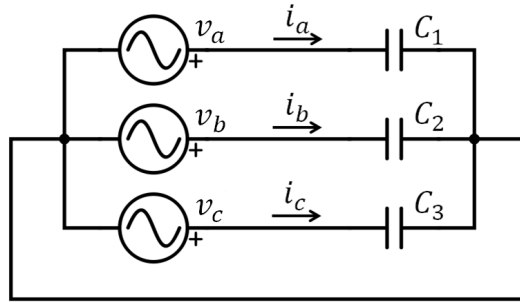
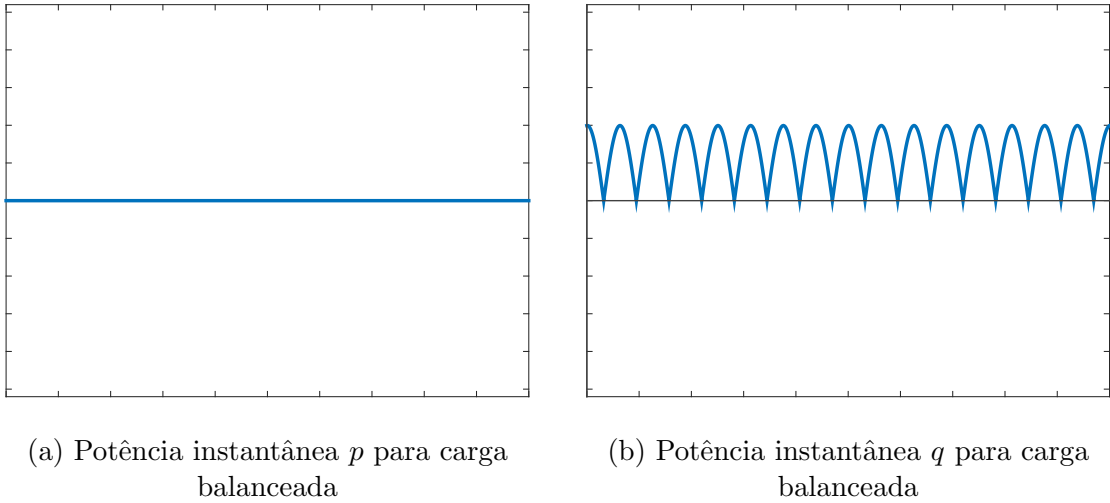
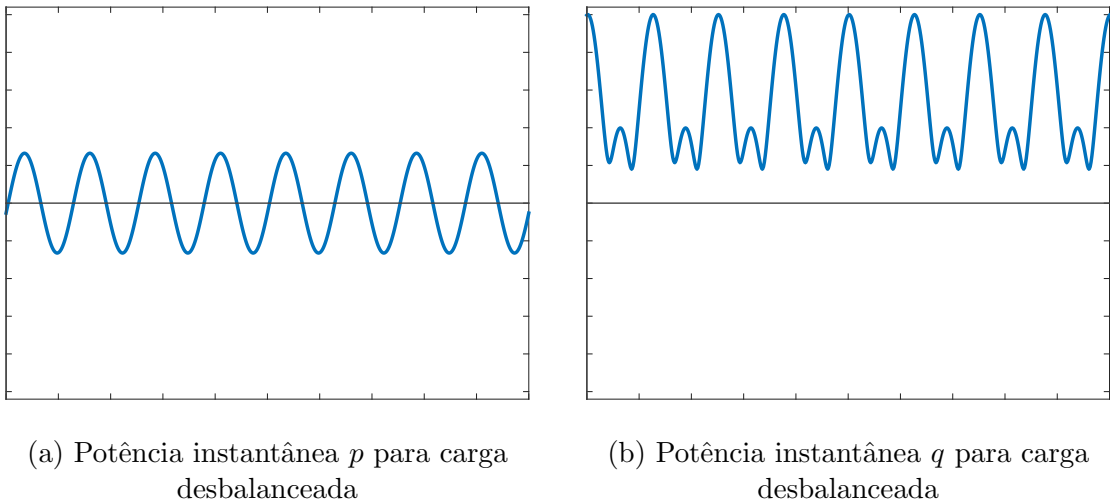


FIGURA 9 – Circuito trifásico a quatro fios

Primeiramente, considerando que a carga seja equilibrada, ou seja, os capacitores apresentam mesmo valor de capacitância, as potências instantâneas  $p$  e  $q$  em função do tempo são apresentadas nas figuras 10a e 10b, respectivamente. Para este caso pode-se observar que a transferência de potência ativa entre a fonte e a carga é nula, visto que os capacitores são carregados e descarregados de tal modo que o total de energia trocada entre a fonte e a carga é nulo. Já a potência reativa não é nula visto que existe uma corrente equilibrada entre as fases e estas apresentam ortogonalmente dispostas às tensões.

O segundo exemplo utiliza o mesmo circuito, porém com um capacitor  $C_1$  com valor diferente de  $C_2$  e  $C_3$ . Nesse caso o carregamento e descarregamento dos capacitores não serão balanceados, de modo a haver uma corrente instantânea nos terminais de  $C_1$  diferentemente à  $C_2$  e  $C_3$ . Com isso um fluxo de potência ativa instantânea existe entre a fonte e a carga, de modo que em um semi-ciclo a fonte fornece energia e no semi-ciclo subsequente ocorre o oposto. Isto pode ser observado na Figura 11a. Entretanto ainda existem componentes de corrente dispostas perpendicularmente às tensões, havendo assim a presença de potência reativa  $q$  sendo trocada entre as fases.

FIGURA 10 – Potências instantâneas considerando  $C_1 = C_2 = C_3$ FIGURA 11 – Potências instantâneas considerando  $C_1 \neq C_2 = C_3$ 

### 1.3 Filtros Ativos

Filtros ativos são elementos inseridos em circuitos elétricos cujo objetivo é criar uma fonte que interaja com os parâmetros de tensão/corrente de modo a eliminar condições indesejadas no sistema. Os filtros ativos são divididos em três tipos: shunt, série e híbrido, e a aplicação de cada tipo de filtro é determinada por qual parâmetro do circuito deseja-se corrigir. Na seção ?? é apresentado o princípio de operação de cada tipo de filtro ativo, mostrando em quais situações estes podem ser aplicados.

Em se tratando de sistemas elétricos aeronáuticos, a escolha do tipo de filtro ativo é baseado nos parâmetros do sistema que se deseja adequar a fim de cumprir com as normas aeronáuticas e garantir o correto funcionamento dos equipamentos. Com isso a utilização

dos três filtros tipo de filtragem pode ser escolhida visto que garantiriam a qualidade de energia na entrada dos equipamentos da aeronave. Entretanto deve-se analisar não apenas a viabilidade técnica, mas também econômica no que tange os sistemas. Com isso, uma breve descrição dos tipos de filtros ativos é apresentada a seguir com ênfase na aplicação aeronáutica.

- i) *Filtros Serie*: Os filtros série são utilizados para a correção das harmônicas presentes na forma de onda da tensão na entrada de alimentação elétrica das cargas. Seu objetivo não proporciona a correção da forma de onda das correntes das linhas, de modo que as regiões do circuito que estão dispostas fora da atuação do filtro sofreriam com a má qualidade de energia. Com isso a utilização deste filtro poderia ser aplicada nos sistemas elétricos aeronáuticos com a ressalva de que todos os equipamentos presentes na rede necessitariam estar cobertos por filtros série. Esta solução, mesmo que plausível tecnicamente, não apresentaria benefício econômico, visto que a complexidade, o custo e o peso dos sistemas aumentariam.
- ii) *Filtros Shunt*: Filtros shunt por sua vez são utilizados para a correção das distorções presentes na corrente dos sistemas. Deste modo, a implementação desse tipo de filtragem em cargas não lineares, cuja característica operacional apresenta a injeção de harmônicos por meio de queda de tensão nas impedâncias das linhas, seria suficiente para adequar a qualidade de energia do sistema elétrico. Esta característica traz grande vantagem devido ao fato de que nem todas as cargas são não lineares. Esta peculiaridade faz com que seu uso seja adequado aos equipamentos do sistema elétrico aeronáutico devido à utilização da filtragem ativa do tipo shunt à apenas em equipamentos não lineares. Com isso, a qualidade de energia do sistema é mantida sem que haja abundância quanto a quantidade de equipamentos cobertos por filtros ativos. Tal circunstância faz com que a utilização deste tipo de filtragem apresente viabilidade econômica no mercado aeronáutico.
- iii) *Filtros Híbrido*: Filtros ativos com topologia híbrida são concebidos pela junção da filtragem série e shunt. Deste modo a qualidade de energia nos pórticos dos equipamentos apresentam tensões e correntes senoidais, independentemente da carga. Apesar de esta característica ser vantajosa para sistemas aeronáuticos com relação à qualidade de energia, os problemas com sua utilização recaem nos mesmos que inviabilizam o uso de filtros série. Como a utilização de filtros shunt já é condição necessária para a manutenção da qualidade de energia, filtros híbridos não trás vantagens suficientes para sua implementação no setor aeronáutico.

Com este entendimento o sistema de filtragem ativa do tipo shunt é o mais adequado para a aplicação proposta neste trabalho. Deste modo, o foco apresentado aqui será apenas relacionado à utilização deste tipo de filtragem devido sua relevância na aplicação aeronáutica. Ainda, como mostrado na seção 1.2.4, os sistemas aeronáuticos a qual cargas são relevantes quanto a aplicação de filtragem ativa dá-se em circuitos trifásicos a 3 fios, ou seja, sem a presença ou com a desconsideração neutro devido aos aspectos construtivos e operacionais.

### 1.3.1 Filtros Ativo Empregando a Teoria PQ

O emprego da teoria de potência instantânea para realização de filtragem ativa é feita através da aplicação das equações algébricas apresentadas anteriormente para a determinação das potências  $p$  e  $q$ , seguido do tratamento destes dados para posteriormente determinar as correntes que serão compensadas. Em seguida, tais valores instantâneos de corrente são aplicados como referência em conversores estáticos na utilização da filtragem ativa. A filtragem ativa utilizando a teoria PQ tem como característica a facilidade nos cálculos dado que apenas expressões algébricas são realizadas, tem uma boa resposta dinâmica, podem ser aplicados a qualquer circuito trifásico balanceados ou desbalanceados, com ou sem a presença de harmônicas, e ainda em regime transitório ou permanente [10]. Na prática o funcionamento dos filtros ativos é limitado apenas pelas características dos conversores estáticos a qual realizam a injeção de corrente no sistema. Por possuírem uma resposta dinâmica não instantânea, o desempenho da filtragem é restringido pela dinâmica dos conversores estáticos. Para fins didáticos, primeiramente será considerado que as correntes provenientes do filtro ativo sejam adquiridas através de fontes de corrente controladas.

A teoria PQ possui como característica a determinação das potências instantâneas ativa e reativa de modo que estas carregam importantes atributos das formas de onda das tensões e correntes do sistema. A determinação das potências ativa e reativa como função das tensões e correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  é apresentado na equação 1.40. Nesta equação é mostrado tanto o cálculo das potências cujas componentes  $v_0$  e  $i_0$  são não nulos quanto para o caso em que tais valores são nulos. O caminho inverso para a determinação das correntes  $i_\alpha$ ,  $i_\beta$ , e  $i_0$  para um sistema a qual é conhecida as tensões e as potências instantâneas é determinada segundo a equação 1.45.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2 + v_0^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & 0 & v_0 & -v_\beta \\ v_\beta & -v_0 & 0 & v_\alpha \\ v_0 & v_\beta & -v_\alpha & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q_\alpha \\ q_\beta \\ q_0 \end{bmatrix} \quad (1.45)$$

Para o caso onde as componentes de sequência zero são nulas, ou seja, eliminando as variáveis  $v_o$  e  $i_0$  da equação, a expressão a qual representa os valores instantâneos das correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  a partir dos valores da tensão e potências  $p$  e  $q$  são apresentadas pela equação 1.46.

$$\begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{v_\alpha^2 + v_\beta^2} \begin{bmatrix} v_\alpha & v_\beta \\ v_\beta & -v_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix} \quad (1.46)$$

Cabe lembrar que o sinal utilizado na expressão 1.46 é definido segundo a convenção utilizada na equação 1.44. Com a determinação das correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  pode-se utilizar a transformada inversa de Clarke (equação 1.24) para obter as correntes nas coordenadas  $abc$ .

Com as expressões apresentadas, a determinação das correntes  $i_\alpha$  e  $i_\beta$  pode ser realizadas através das potências ativa e reativa e das tensões instantâneas. Ainda, pode-se estender a obtenção não apenas das correntes nas coordenadas  $\alpha\beta 0$  mas também em  $abc$ . O princípio da filtragem ativa através da utilização da teoria PQ é dado a partir da obtenção de forma de onda das correntes a serem compensadas e utiliza-las como referência de entrada em compensadores de corrente, tal qual mostrado na Figura 12. A determinação das correntes de compensação é feita através da análise da composição das potências ativa e reativa instantânea de um sistema e, com isso, pode-se selecionar partes de  $p$  e  $q$  de modo a especificar as potências a serem compensadas  $p_c^*$  e  $q_c^*$  pelo filtro. As potências  $p_c^*$  e  $q_c^*$  são finalmente utilizadas na equação 1.46 de modo a consagrar as correntes a serem utilizadas como referência em um compensador de corrente. O diagrama completo do sistema do filtro ativo é mostrado na Figura 13.

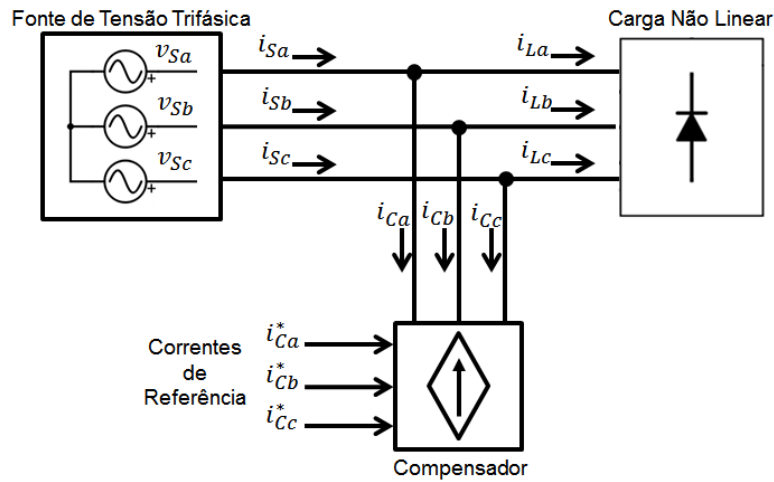


FIGURA 12 – Compensador ativo [6]



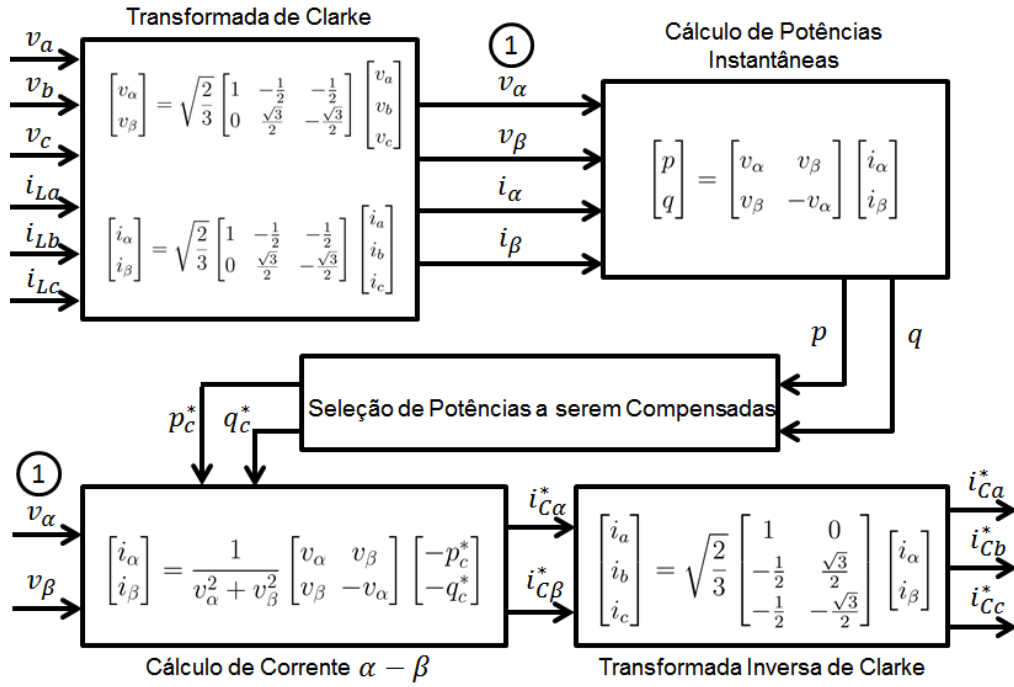


FIGURA 13 – Diagrama com procedimentos de cálculo de um compensador [6]

### 1.3.1.1 Seleção de Potências Compensadas

O funcionamento de um circuito trifásico qualquer é realizado com o fluxo de potência instantânea  $p$  e  $q$  entre seus subsistemas e fases. Com os valores de  $p$  e  $q$  em um determinado instante de tempo, pode-se definir os valores das correntes nas fases do circuito, visto que as potências instantâneas são definidas como função de tais correntes. A determinação da referência para utilizar em um compensador é dada de maneira que este injete componentes de corrente cujo objetivo é anular partes das potências que são indesejadas no circuito. Esta compensação é realizada com a obtenção de formas de onda de corrente de modo a prover potências com valores simétricos às partes de  $p$  e  $q$  que deseja-se compensar.

De maneira geral, as potências instantâneas podem ser entendidas como sendo a composição de uma parcela constante e uma oscilatória. A parcela constante pode ser captada como a componente de frequência zero de uma forma de onda, sendo assim esta parcela apresenta valores médios diferentes de zero. Já a parte oscilatória é dada pela presença de valores positivos e negativos de modo que seu valor médio é nulo. Por conseguinte pode-se definir as potências  $p$  e  $q$  como a composição dos valores médios e oscilantes conforme a equação 1.47. Para fins de denotação  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$  representam a parcela

média, enquanto que  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  denominam a parte oscilante.

$$\begin{aligned} p &= \bar{p} + \tilde{p} \\ q &= \bar{q} + \tilde{q} \end{aligned} \tag{1.47}$$

Como já explicado na seção 1.2.5, a potência instantânea reativa é definida por não fornecer troca de energia em um determinado instante de tempo entre subsistemas, sendo que esta potência é estabelecida pela energia que flui entre as fases do circuito. Deste modo, a presença desta potência em um sistema apenas eleva os níveis de correntes de linhas, apresentando em determinadas situações componentes harmônicas que degradam a qualidade de energia. Além do mais, o fator de potência é degradado com a presença da potência reativa instantânea. Sendo  $\lambda = p/s$ ,  $\sqrt{p^2 + q^2} \geq p$  e  $s = \sqrt{p^2 + q^2}$ , tem-se que a relação 1.48 é válida. Desta maneira, para que o fator de potência  $\lambda$  apresente valores unitários, a potência reativa instantânea necessariamente deve ser zero para todo instante de tempo, ou seja,  $q \equiv 0$ .

$$\lambda = \frac{p}{\sqrt{p^2 + q^2}} \leq 1 \tag{1.48}$$

Cabe lembrar que o fator de potência definido por  $\lambda = p/s$  é exposta pela relação das potências instantâneas, portanto este é definido pelo fator de potência em cada instante de tempo.

Os valores oscilatórios da potência ativa instantânea são estabelecidos pela troca de energia entre subsistemas, sendo que uma carga pode apresentar-se como consumidora e fornecedora de energia durante instantes específicos do tempo. Considerando os valores médios, como apresentados na equação 1.13, o fator de potência apresentaria atribuições diferentes comparativamente apresentada na equação 1.48, sendo que as componentes oscilantes da potência  $p$  elevariam os valores da potência aparente do sistema. Desse modo para obter o fator de potência unitário para a transmissão de energia entre subsistemas os valores oscilantes de  $p$  necessitam ser compensados. Dessa maneira a única potência vista pelo lado da carga em um sistema com compensadores seria a instantânea média ativa, ou a parcela  $\bar{p}$  da expressão  $p = \bar{p} + \tilde{p}$ .

Outras combinações de potências instantâneas a serem compensadas podem ser aplicadas em um compensador com o objetivo de adquirir funcionamentos distintos aos objetivos de elevar a qualidade de energia. Para isso o estudo do comportamento deve ser realizado de modo a definir as potências desejáveis a se ter no sistema. Todavia, como o objetivo deste trabalho é exatamente aumentar a qualidade de energia, apenas as potências  $q$  e  $\tilde{p}$  serão compensadas de modo a obter um sistema que atue como sendo composto por uma fonte entregando uma quantidade de energia constante para as cargas.

Com este comportamento garante-se que as formas de onda da corrente são estabelecidas como sendo senoidais e em fase com as tensões de fase, de modo que a fonte enxergaria a carga como sendo composta por resistências puras e com o fator de potência unitário.

### 1.3.1.2 Concepção dos Filtros Ativos

O filtro ativo apresentado nesse trabalho tem por objetivo a compensação de parcelas das correntes do sistema as quais carregam intrinsecamente determinadas potências instantâneas. A concepção do filtro decorre da utilização das equações algébricas para determinar os valores  $p$  e  $q$ , seguido de métodos para processá-las e determinar qual parcela deseja-se compensar. Este processo leva a obtenção das correntes a serem compensadas facilmente, de modo que estas possam ser utilizadas como referência em inversores estáticos para a criação das correntes a serem injetadas no sistema.

A concepção de tais filtros é comumente realizada através da utilização pontes inversoras as quais são controladas via processadores de sinais, ou DSPs (*Digital Signal Processor*). Além do mais, são necessários sensores de tensão e corrente as quais alimentam as entradas analógicas dos DSPs para o tratamento de dados e determinação das referências a serem aplicadas nos controle do inversor. A geração dos sinais de corrente a serem aplicadas no sistema é realizada pela comutação controlada das chaves estáticas, onde o controle é feito via PWM, cuja concepção é dada pelo próprio DSP. O diagrama do filtro é mostrado na Figura 14.

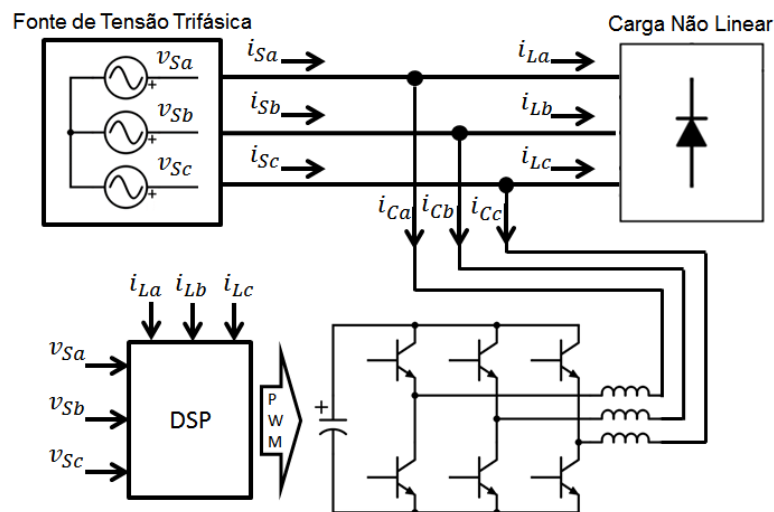


FIGURA 14 – Filtro ativo com inversor estático [6]

Para o correto funcionamento do filtro, as potências a serem compensadas devem ser determinadas corretamente. Como observado na seção 1.3.1.1 o objetivo da concepção do filtro tratado neste trabalho visa compensar certas potências de modo que apenas a parcela composta pela potência média que flui entre fonte e carga seja mantida. Com isso

as potências instantâneas reativa  $q$  e a parcela oscilante da ativa  $\tilde{p}$  devem ser neutralizadas. Uma maneira de separar as potências ativa média e oscilante é através da implementação de um filtro passa baixa. Com isso, o sinal na saída do filtro pode ser utilizado nos cálculos das correntes de compensação de modo que a saída do compensador apresente formas de onda que anulem a presença da potência oscilatória do sistema. Um importante fator a ser definido deve ser a frequência de corte de tal filtro passa baixa. Uma frequência baixa seria o ideal visto que  $\tilde{p}$  apresentaria todas as componentes a ser compensadas. Todavia a presença do filtro passa baixa altera a dinâmica do compensador, atribuindo um atraso na resposta do mesmo. Portanto a escolha da frequência do filtro passa baixa deve ser de tal maneira à atender simultaneamente a dinâmica e a performance do compensador. O esquema dos passos de cálculo que um dispositivo deve realizar para determinar corretamente as correntes a serem compensada é mostrado na Figura 15. Cabe lembrar que tal concepção é apresentada considerando sistema ideal, de modo que a topologia do filtro real é ligeiramente diferente deste e que será mostrado mais a frente.

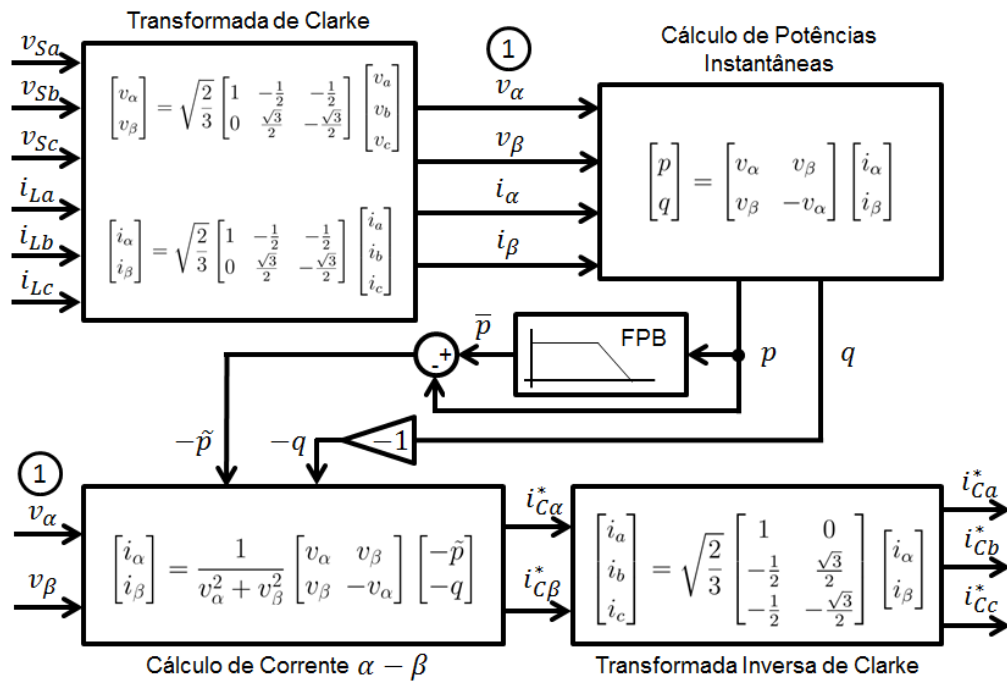


FIGURA 15 – Diagrama com procedimentos de cálculo de um compensador [6]

Para melhor elucidar a operação dos filtros ativos do tipo shunt, um exemplo será mostrado a seguir. Considera-se um sistema composto por uma fonte senoidal trifásica a três fios, alimentando uma carga não linear balanceada cuja corrente possui forma de onda distinta de uma senoide. Há também a presença de um compensador operando nos moldes da Figura 12, com os cálculos presentes na obtenção das correntes de referência em acordo com topologia mostrada na Figura 15. Como forma de facilitar a visualização, será apresentado apenas a tensão e corrente da fase  $a$ , a medida que as formas de onda das tensões e correntes das fases  $b$  e  $c$  do sistemas não serão apresentadas. Entretanto

cabe lembrar para efeito de cálculo das potências instantâneas todas as tensões e correntes presentes nas fases  $a$ ,  $b$  e  $c$  são consideradas.

Primeiramente a Figura 16 mostra a forma de onda da tensão e corrente do sistema descrito anteriormente. Considerando que as três fases apresentam as mesmas características de forma de onda com a particularidade de estarem defasadas em  $\pm 120^\circ$  entre si, as potências instantâneas  $p$  e  $q$  vista pelo lado da carga podem ser vistas na Figura 17.

O filtro do exemplo possui sua operação iniciando em  $t_i$  e cessando em  $t_f$ . Na Figura 18 estão expostas as potências a serem compensadas durante o período de tempo a qual o filtro opera, ou seja, mostra as formas de onda de  $-q$  e  $-\tilde{p}$ .

Com o processamento das potências  $-q$  e  $-\tilde{p}$  pelo filtro, a corrente de compensação  $i_{Ca}$  é obtida e mostrada na Figura 19. Pelo o filtro operar apenas entre  $t_i$  e  $t_f$ , a corrente de compensação é apresentada apenas entre este período.

Por fim, adicionando as correntes de compensação à corrente da carga  $i_{La}$  obtém-se a forma de onda apresentada na Figura 20. Ainda, expondo tal forma de onda juntamente com a tensão de linha  $v_a$ , verifica-se claramente que a tensão e a parte compensada da corrente estão em fase. Com isso, é obtido um fator de potência unitário e a fonte de tensão enxerga o subsistema composto pela carga e filtro como sendo resistências puras. A potência ativa e reativa entregue pela fonte denotada por  $p_s$  e  $q$ , respectivamente, é apresentada na Figura 21, onde pode ser visto que no período em que o filtro opera um fluxo de potência ativa constante e reativa nula é estabelecido.

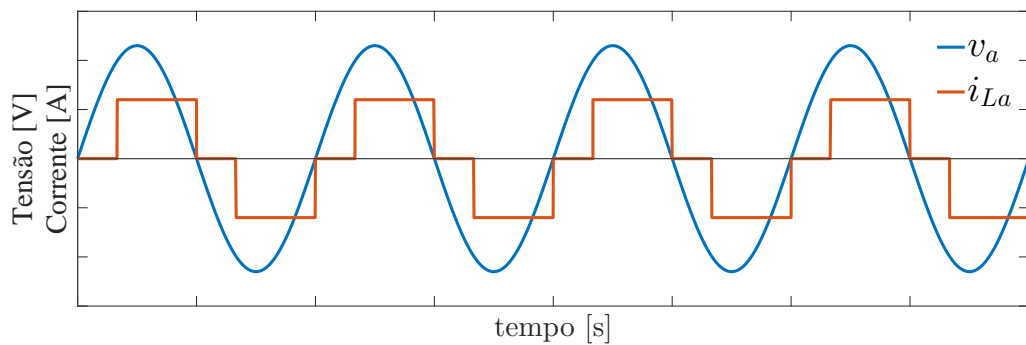
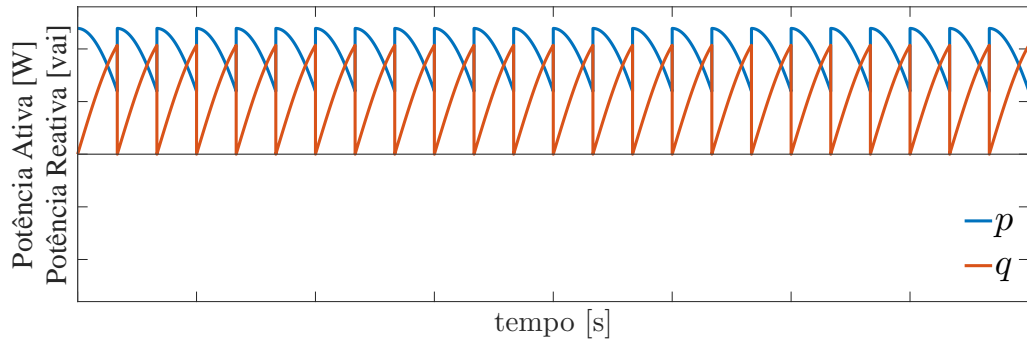
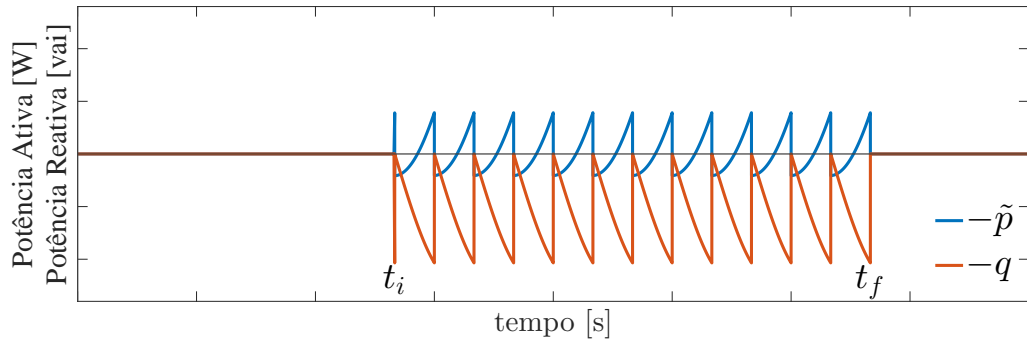
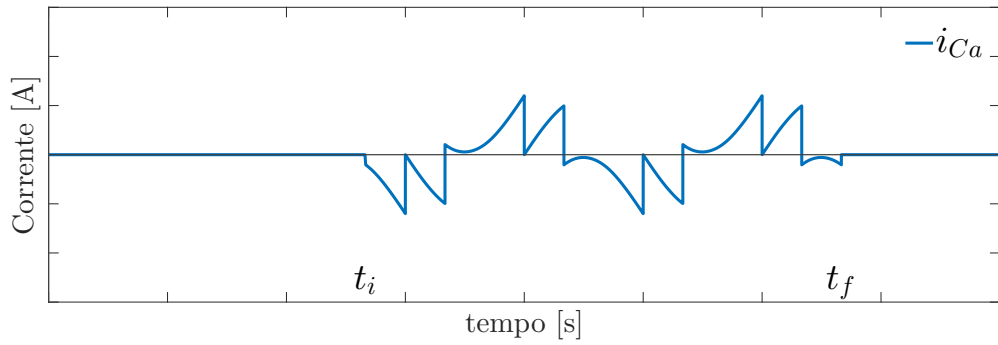
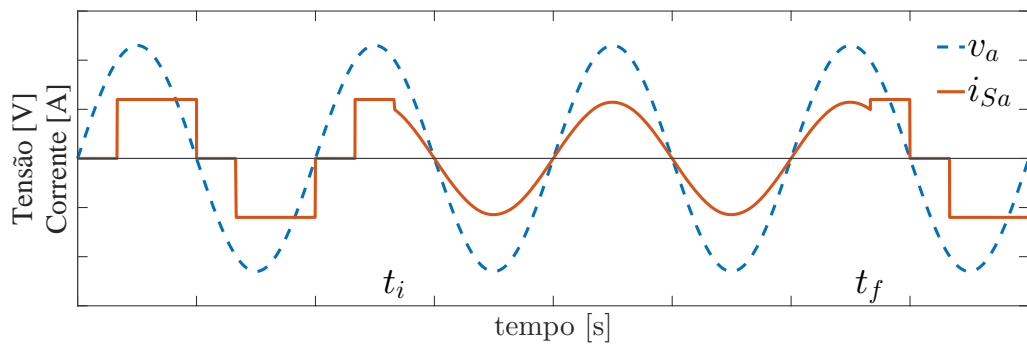


FIGURA 16 – Tensão  $v_a$  e corrente  $i_{La}$  na entrada da carga

FIGURA 17 – Potências instantâneas  $p$  e  $q$ FIGURA 18 – Potências instantâneas a serem compensadas  $-\tilde{p}$  e  $-q$ FIGURA 19 – Corrente de referência  $i_{Ca}^*$  a ser aplicado no inversorFIGURA 20 – Tensão  $v_a$  e corrente filtrada  $i_{Sa}$  fornecida pela fonte

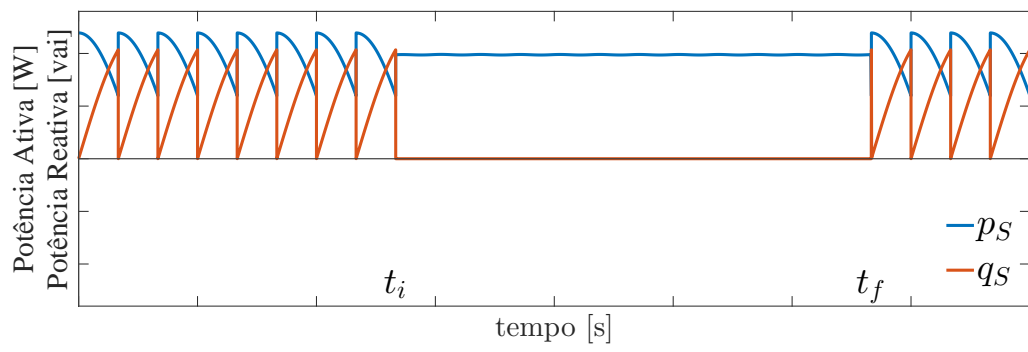


FIGURA 21 – Potência entregue pela fonte  $p_S$

## 2 Simulação de Filtro Ativo Shunt Aplicado em um Sistema Elétrico Aeronáutico

Analisar  
se esse  
título  
está ade-  
quado

### 2.1 Características de Filtros Ativos em Sistemas Reais

#### 2.1.1 Inversores Estáticos

Idealmente considera-se que filtros ativos são compostos por fontes de tensão/correntes controladas, a qual podem fornecer tensão/corrente de maneira a acompanhar uma dada referência. A concepção dessa fonte é realizada no âmbito da realidade por meio de inversores estáticos, as quais são sistemas compostos por elementos semicondutores que por meio de um controle de comutação de alta frequência consegue criar formas de onda/corrente para uma dada referência.

##### 2.1.1.1 Tipo de Conversores

Na aplicação de um filtro ativo do tipo shunt a topologia do conversor pode ser resumida em dois tipos: Conversores baseados em fonte de tensão (VSC - *Voltage-source Converter*) e Conversores baseados em fonte de corrente (CSC - *Current-source Converter*) [6]. Para ambos os casos, o arranjo dos semicondutores é o mesmo, todavia a diferença recai no lado DC do conversor. Enquanto o VSC possui uma fonte de tensão disposta no lado DC, o CSC dispõe de uma fonte de corrente em tal posição. As figuras 22a e 22b mostram circuitos comumente empregados para sistemas VSC e CSC respectivamente.

As chaves representadas nas figura 22a e 22b são realizadas por comutadores estáticos controlados, tal como MosFets, IGBTs, GTOs e etc. Cada uma destas tecnologias possuem características distintas de modo que seu emprego depende do comportamento esperado para cada tipo de aplicações. Observa-se também a presença de diodos em antiparalelo aos semicondutores para o caso VSC. Estas estão presentes de maneira a criar um caminho de roda livre para permitir a passagem de corrente induzida por indutâncias intrínsecas das linhas de transmissão e dos filtros. A presença deste não é aplicada em CSC, entretanto este tem presente diodos de bloqueio em série às chaves semicondutoras como forma proteção [11, 12]



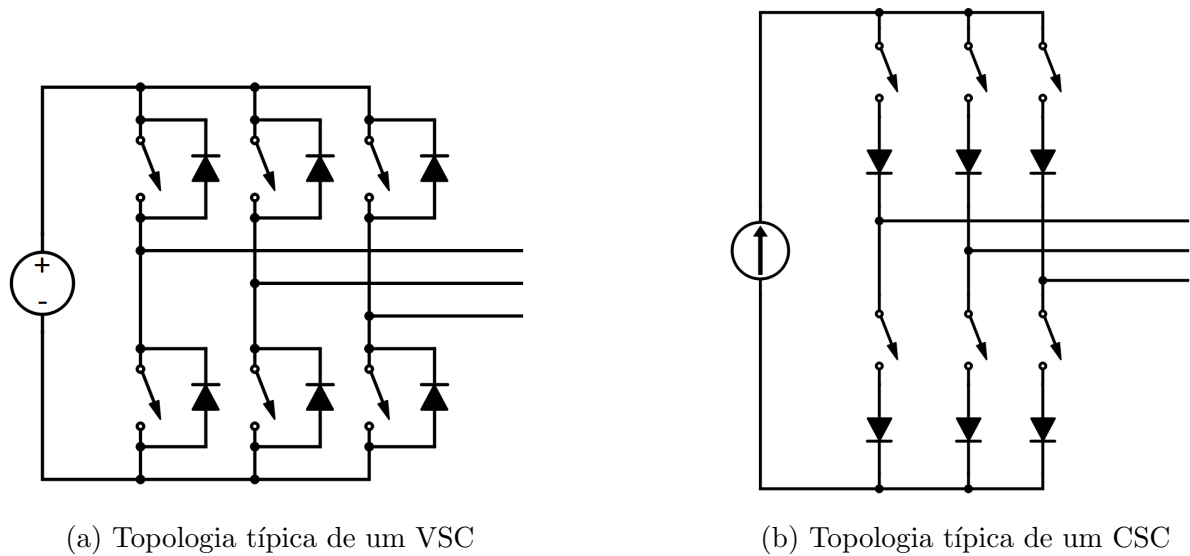


FIGURA 22 – Inversores de tensão e corrente

### 2.1.1.2 Controle do PWM

Em ambos os casos o controle de tensão/corrente do lado AC é realizado por PWM. Este sinal é comumente gerado por um microcontrolador programado de maneira a operar a comutação dos semicondutores a fim de obter uma saída específica no lado AC. Existem dois principais tipos de controle por PWM para o comando de conversores: o de frequência fixa e variável. O primeiro tipo opera comparando um sinal de referência com um sinal periódico triangular com frequência fixa e de valor elevado para determinar a razão cíclica dos pulsos. Nesta operação a saída apresenta em seu espectro de frequência uma componente fundamental de baixo valor seguido de componentes de alta frequência provenientes da onda triangular. Com isso, o emprego de filtros com frequência de corte elevada torna a saída composta apenas pela fundamental, que corresponde ao sinal de referência da entrada do comparador. Já a operação com frequência variável tem como principal característica o controle por histerese. Nesta operação o sinal de referência é envolto por uma banda de histerese que faz com que a operação da comutação dos semicondutores mantêm o sinal de saída contido dentro desta banda. Para o melhor entendimento, a operação de controle por histerese é mostrado na Figura 23 [13].

A implementação de ambos os tipos VSC e CSC mostram-se adequadas para a aplicação em filtros ativos do tipo shunt. Todavia para o uso em sistemas aeronáuticos o conversor do tipo VSC apresenta maiores vantagens devido à maior eficiência, menor custo, menor tamanho e peso comparativamente ao CSC [6]. Já o controle PWM mais adequado e comumente encontrado na aplicação deste tipo de filtro é feito por frequência variável por histerese. Esta controle no PWM faz com que o VSC se comporte com o fonte de corrente pela comparação da saída do inversor com a referência advinda do

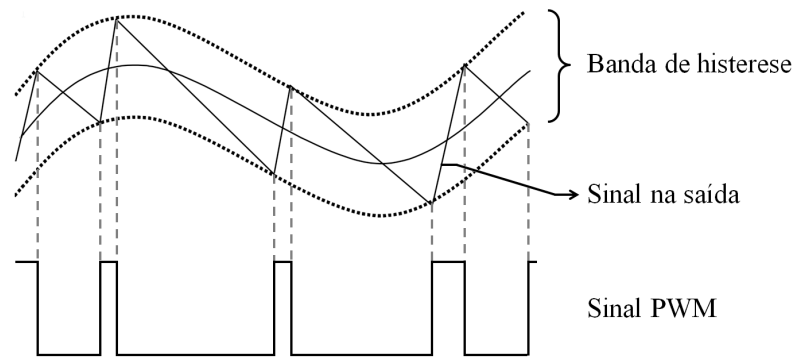


FIGURA 23 – Controle por histerese [13]

controlador. O comportamento de fonte de corrente ocorre pela adição de indutores de acoplamento na saída do conversor, de modo que o controle dos semicondutores aplique pulsos de tensão advindas do capacitor do lado DC tornando a corrente crescente ou decrescente proporcionalmente à indutância e a tensão aplicada em seus terminais. Este sinal é medido e comparado com as bandas de histerese do sinal de referência, fazendo com que a operação dos semicondutores se estabeleçam de forma a manter o sinal de saída entorno à referência.

Como forma de obter uma resposta rápida às variações do sinal de referência, a aplicação de uma alta indutância impede que a saída do conversor acompanhe adequadamente a referência caso esta apresente alta  $di/dt$ . Deste modo é desejável um valor de indutância com baixo valor na saída do conversor de modo a não limitar uma rápida variação de corrente no tempo. Todavia essa aplicação traz a implicação de tornar a corrente de saída ruidosa, trazendo o aparecimento de componentes de alta frequência nas tensões de fase do sistema. Para contornar esse problema, capacitâncias são aplicadas entre as fases como forma de de criar um caminho de baixa impedância para as componentes de alta frequência, filtrando o sinal ruidoso de alta variação no tempo. O valor dessa capacitância deve ser escolhido de maneira a atender a filtragem de corrente do conversor mas também não pode ser elevada o suficiente para aumentar a potência reativa do sistema e consequentemente diminuir o fator de potência.

O esquema do filtro com a implementação da indutância de acoplamento e das capacitâncias de filtragem de componentes de alta frequência da corrente é mostrado na Figura 24.

### 2.1.1.3 Controle de Tensão no Lado DC

No capítulo ?? foi estudado extensivamente as propriedades e significados físicos das potências instantâneas em circuitos trifásicos. Uma importante consideração acerca da potência  $q$  é que está não contribui com a transferência de potência entre subsistemas

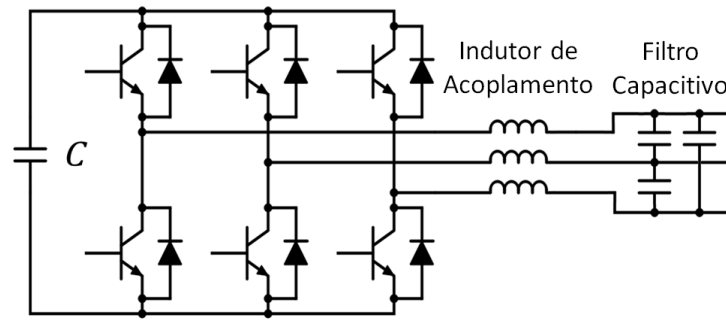


FIGURA 24 – Esquema do inversor com indutor de acoplamento e filtro capacitivo

de um circuito, sendo que esta é presente apenas sendo trocada entre as fases constituintes do sistema. Sendo assim, tem-se que tanto nos terminais da fonte, da carga e do filtro ativo o fluxo de potência reativa é nulo. A implicação que isso trás é a ausência, teoricamente, da necessidade de elementos armazenadores de energia presentes no filtro shunt. Todavia, há a necessidade de compensação da potência  $\tilde{p}$  realizada pelo filtro. Por esta apresentar-se como uma potência média, os elementos armazenadores de energia devem lidar apenas com essa parcela da potência. Sendo assim o dimensionamento do capacitor (indutor para o CSC) leva-se em consideração apenas a potência ativa oscilante [6, 9, 14].

Não confundir os elementos armazenadores de energia explanados anteriormente com os indutores de acoplamento e filtro capacitivo. Os elementos armazenadores de energia é o capacitor/indutor dispostos no lado DC do inversor.

Em se tratando de circuitos reais, os semicondutores, as linhas de transmissão e os componentes do filtro possuem resistências intrínsecas que causam a dissipação de potência ativa. Ainda existe perdas de comutação causadas pelas não idealidades de chaveamento dos elementos semicondutores. Essas perdas têm efeito na eficiência da capacidade de filtragem do compensador, visto que correspondem com a queda de tensão do capacitor dado ao valor médio de potência que este processa. Dessa maneira, existe a necessidade de controlar o fluxo de potência do filtro de modo a manter o capacitor devidamente carregado e operando com tensão específica. Para se ter essa realização, uma malha de controle é embutida no sistema do filtro de modo que a potência dissipada no filtro é determinada em função do valor da tensão do capacitor. Com isso é adicionado uma parcela de potência, denominada  $p_{loss}$ , que deve ser contabilizado no cálculo das correntes de referência de modo a manter a tensão no capacitor constante. Ainda, pelo fato de haver um atraso na resposta do compensador devido ao filtro passa baixa na separação de  $\tilde{p}$  da potência ativa  $p$ , esta malha de controle visa também compensar os efeitos que este atraso causa na tensão do capacitor. A Figura 25 mostra o esquemático do compensador com a presença da malha de controle como parte da operação do filtro ativo.

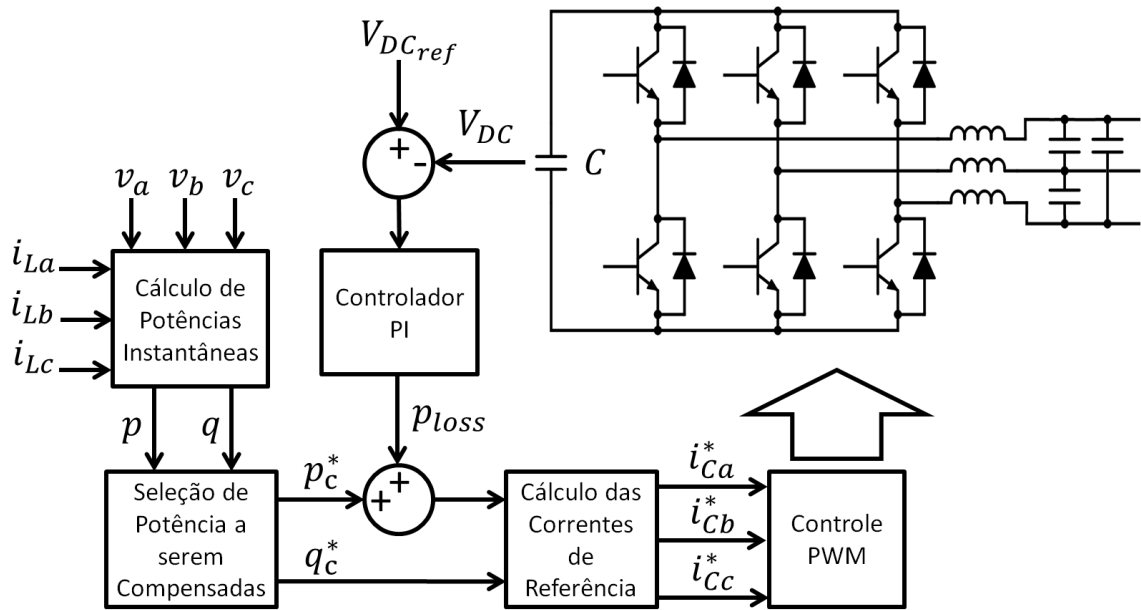


FIGURA 25 – Controle por histerese [6]

### 2.1.2 Controlador

O controlador empregado em um sistema de filtragem ativa é constituído pela unidade de processamento que opera os interruptores estáticos de maneira a propiciar a filtragem ativa das componentes harmônicas de corrente. Tais controladores são comumente formados por circuitos integrados programáveis que operam no domínio discreto. O tipo mais comum deste tipo de controlador é realizado por processador digital de sinais (DSP). Juntamente com os controladores são necessários sensores de tensão e corrente para alimentar a unidade de processamento com dados do sistema de maneira a utilizar os conceitos de potência instantânea para calcular as referências de corrente a serem aplicadas no inversor. Assim o comando por PWM dos semicondutores do inversor é realizado pelo DSP e a compensação das componentes harmônicas das correntes é eliminada.

#### 2.1.2.1 Tipos de Controle

Em sistemas reais a concepção da filtragem ativa é proferida em redes cuja tensões não são necessariamente senoidais puras ou balanceadas. A base teórica apresentada na seção ?? é baseada na premissa em que o sistema é realizado sem que haja distorções de tensão ou desbalanceamento entre as fases. Os sistemas elétricos reais apresentam em sua operação cargas que não contribuem de forma expressiva na distorção harmônica, sendo desnecessária a aplicação de filtros ativos para esses casos. Além disso, não há como garantir o balanceamento de tensão nas em todo espectro de operação do sistema. Apesar destes fatores não serem significativos em sistemas aeronáuticos, deve-se ter em

mente que as distorções e desbalanceamentos estão presentes nas tensões e que estas devem estar dentro das normas aeronáuticas. A operação dos filtros ativos do tipo shunt é sensível às estes efeitos, fazendo com que algumas considerações devem ser aplicadas para contornar as enterpéries e garantir seu correto funcionamento. Segundo [6], a teoria pq mostra-se insuficiente para atender a filtragem de cargas não lineares em sistemas com tensões previamente distorcidas e, ao mesmo tempo, satisfazer as condições de otimalidade de filtragem. Essas condições são descritas por:

- Extrair apenas potência ativa constante da fonte de alimentação;
- Extrair uma corrente sinusoidal da fonte de alimentação;
- Extrair uma quantidade mínima de corrente eficaz que transportaria uma mesma potência para a carga com um mínimo de energia dissipada na rede.

Tais condições podem ser realizadas ao mesmo tempo em um sistema ideal sem que haja distorções na rede, porém esse caso não é realizável. Portanto, métodos distintos de filtros ativos do tipo shunt são propostos para atender pelo menos uma das condições de otimalidade.

O foco deste trabalho é exatamente a determinação de um filtro ativo para garantir a qualidade de energia em um sistema aeronáutico. Este quesito é realizado com a inserção de filtros ativos do tipo shunt para a conformação da corrente visando a ausência de distorção harmônica que traria efeitos nas tensões devido as quedas de tensão nas impedâncias da rede. O método apresentado na seção ?? visa extrair apenas potência ativa constante da fonte de alimentação. A aplicação deste método apenas é condição suficiente para criar correntes senoidais em sistemas cuja tensão mostra-se senoidal pura. A aplicação deste método em sistemas cuja tensão é distorcida apresenta correntes também distorcidas, de modo que a potência ativa constante seja estabelecida. Esse método pode apresentar-se instável dependendo dos níveis de distorção, visto que as correntes distorcidas necessária para conceber um fluxo de potência constante elevariam ainda mais a inserção de harmônicas nas formas de onda de tensão. Com isso, o método de filtragem a qual garante uma corrente sinusoidal nos terminais da carga é requerido para adequar a qualidade de energia e manter o sistema estável. Dessa maneira alguns incrementos devem ser inseridos na concepção dos filtros explanados na seção ?? para garantir a condição de corrente sinusoidal nos terminais da carga.

#### **2.1.2.1.1 Método de Controle de Corrente Sinusoidal**

O método de controle de corrente sinusoidal é dado pela filtragem ativa em que o compensador insere componentes de corrente nas linhas do sistema de modo a obter

uma forma de onda das correntes na fonte de alimentação sendo senoidais e balanceada. Este método aplicado em sistema em que a tensão apresenta-se sendo distorcida não ostenta um fluxo de potência constante sendo drenado da fonte. Além do mais, atender as condições de absorver uma quantidade constante de potência ativa e garantir a corrente sendo sinusoidal em um sistema cuja tensão apresenta distorção harmônica não é realizável [6].

Para conseguir um fluxo de corrente sinusoidal e balanceada sendo extraída da fonte é necessário adequar o filtro ativo para que este compense todas as componentes harmônicas, bem como as componentes fundamentais que diferem da componente fundamental de sequência positiva  $\dot{I}_{+1}$ . Essa condição é realizada através da implementação de um detector de sequência positiva na entrada de tensão de um filtro ativo. O esquema do filtro ativo apresentado na seção 1.3.1.2 e demonstrado na figura 14 não é fundamentalmente modificado para o controle de corrente sinusoidal. A implementação deste método é realizado com a inserção do detector de sequência positiva na leitura das tensões advindas da fonte como mostra a Figura 26. Dessa maneira as tensões utilizadas no cálculo das correntes de referência do compensador são compostas apenas pela fundamental de sequência positiva da tensão.

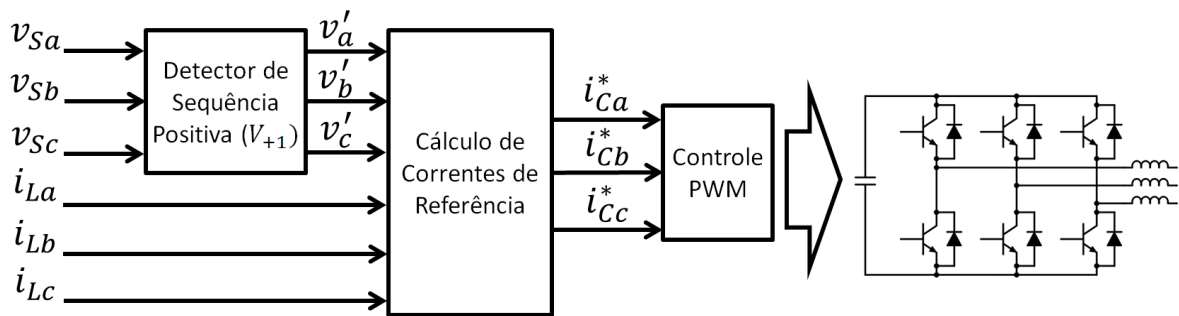


FIGURA 26 – esquemacontrolsenoidal.png

#### 2.1.2.1.2 Detector de Sequência Positiva

A operação do detector é realizada para encontrar a componente fundamental de sequência positiva das tensões advindas da fonte de alimentação de um sistema trifásico. Considerando as tensões  $v_{Sa}$ ,  $v_{Sb}$  e  $v_{Sc}$  do sistema apresentadas pela composição da soma de componentes fundamentais e harmônicas de sequência positiva e negativa, ou seja, fazendo  $\dot{V}_{k+n}$  o fasor da  $n$ -ésima componente fundamental de sequência positiva e  $\dot{V}_{k-n}$  o fasor da  $n$ -ésima componente fundamental de sequência negativa da fase  $k = a, b, c$ ,

tem-se:

$$\dot{V}_k = \sum_{n=1}^{\infty} \dot{V}_{k+n} + \dot{V}_{k-n} \quad k = a, b, c \quad (2.1)$$

Já as tensões  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  advindas do detector de sequência positiva são constituída apenas por  $\dot{V}_{k+1}$ . Estas por sua vez são utilizadas no cálculo das correntes de referência de um filtro ativo shunt como mostrado na Figura 15. As tensões  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  na entrada do filtro são utilizadas no cálculo das potências instantâneas  $p$  e  $q$ , a qual serão utilizadas na determinação das parcelas de potências a serem compensadas, e também na determinação das correntes de referência nas coordenadas  $\alpha\beta$ , onde faz-se uso das potências  $-\tilde{p}$  e  $-q = -(\bar{q} + \tilde{q})$  previamente estabelecidas. Em termos de componentes simétricas e, dado que somente  $\dot{V}_{+1}$  é considerado nos cálculos das potências instantâneas, as potências  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$  são relacionadas com a todas as harmônicas de sequência positiva e componentes de sequência negativas das correntes das linhas, sendo que apenas  $\dot{I}_{+1}$  produzem as parcelas  $\bar{p}$  e  $\bar{q}$ . Com isso, operando o filtro de modo a compensar as parcelas da potência  $\tilde{p}$  e  $\tilde{q}$ , as componentes harmônicas de sequência positiva e negativas diferentes de  $\dot{I}_{+1}$  são compensadas. Com isso a operação do filtro produz apenas as componentes fundamentais da corrente para cada fase individualmente e em fase com as componentes fundamentais das tensões do sistema [6].

A estrutura de um sistema de um detector de sequência positiva consiste em dois principais blocos. O primeiro representa um sistema de malha de captura de fase, ou *Phase Locked Loop (PLL)*, e o segundo consiste na malha fundamental de determinação de  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  com a utilização da teoria PQ.

**Malha de Captura de Fase (PLL)** Um sistema PLL opera rastreando continuamente a componente de sequência positiva e o ângulo de fase das tensões um sistema trifásico. Seu funcionamento, quando corretamente projetado, proporciona bons resultados mesmo sob forte distorção harmônica e desbalanceamento [6].

A Figura 27 mostra o esquemático de um circuito PLL. Nesta figura são observados os pontos onde se obtém os valores da frequência angular da componente fundamental das tensões de entrada. As tensões  $v_{ab}$  e  $v_{cb}$  são referentes à diferença de potencial proporcionadas por  $v_a - v_b$  e  $v_c - v_b$ , respectivamente. A operação ainda faz do uso de uma malha fechada onde são utilizadas  $i'_a$  e  $i'_c$  para determinar uma potência fictícia denotada por  $p_{3\phi'}$ .

Uma importante característica do PLL é a ausência de informação quanto à amplitude do sinal. Dessa maneira a saída deste sistema é integrada á Malha Principal para determinar todas as informações da fundamental de sequência positiva. Isso é realizado

esta frase está bem ruim, escrita cansado pacariaio

utilizando a informação provida pelo PLL em termos das correntes nas coordenadas  $\alpha\beta$ . Sendo assim, além da determinação da frequência angular  $\omega t$ , estas variáveis são utilizadas pelos blocos  $\sin(\omega t - \pi/2)$  e  $-\cos(\omega t - \pi/2)$  na obtenção de  $i'_\alpha$  e  $i'_\beta$ , respectivamente.

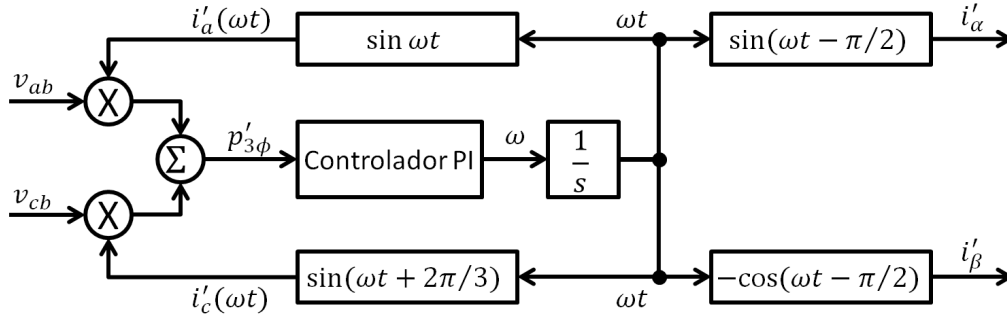


FIGURA 27 – PLL [6]

**Malha Principal** A Malha Principal consiste em um sistema onde se utiliza da teoria da potência instantânea PQ, juntamente com o sinal advindo do PLL, para a determinação das tensões  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  providas apenas com informação de sequência positiva dos sinais de entrada. A arquitetura da malha fundamental é mostrada na Figura 28.

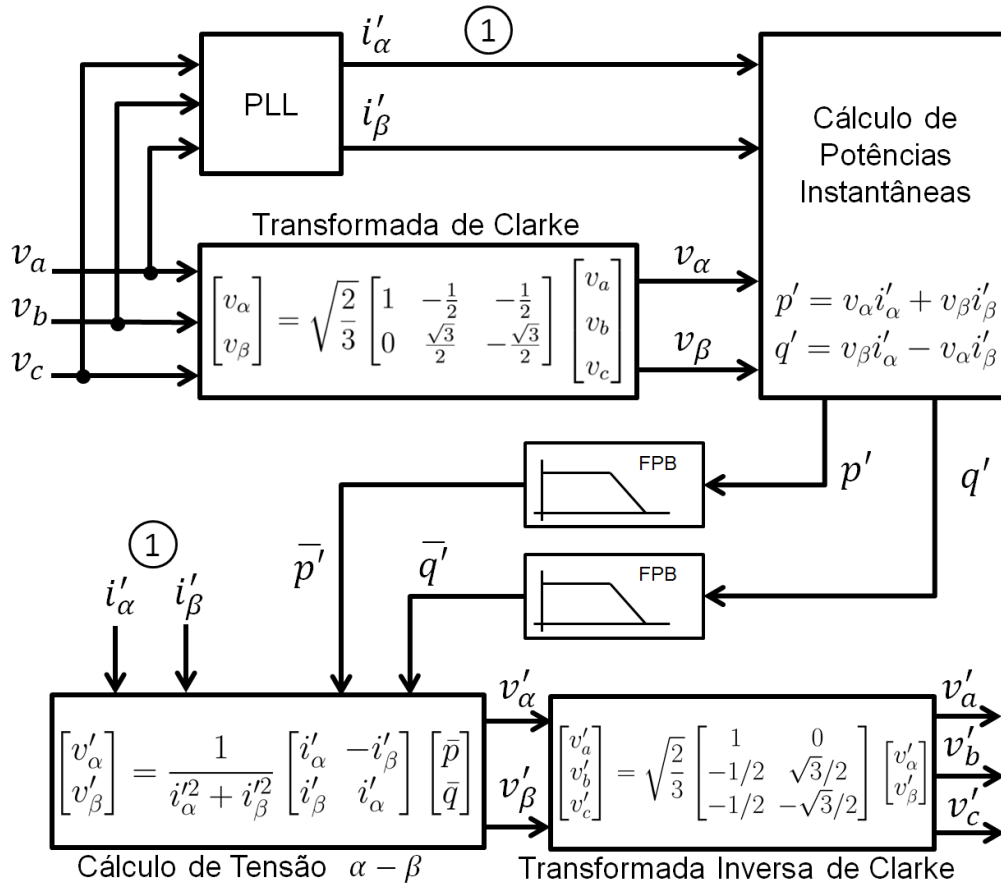


FIGURA 28 – [6]



O sinal advindo do PLL é dado por  $i'_\alpha = \sin(\omega t)$  e  $i'_\beta = -\cos(\omega t)$ . Sendo estes desprovidos de informação quanto à amplitude das tensões de entrada, as utilizações destes valores no cálculo de potências instantâneas produzem  $p'$  e  $q'$ , as quais não possuem magnitudes relevantes quanto à significados físicos, mas carregam consigo informação quanto à amplitude de  $\dot{V}_{+1}$ . Sendo assim, segundo [6] a componente fundamental  $\dot{V}_{+1}$  é a única que contribui no valor médio das potências auxiliares  $p'$  e  $q'$ , ou seja, por  $\bar{p}'$  e  $\bar{q}'$ . Isso ocorre visto que apenas a componente da corrente auxiliara advinda do PLL, as quais são compostas por  $\dot{I}_{+1}$ , são utilizadas nos cálculos. Dessa maneira, o emprego de um filtro passa baixa para a extração dos valores médios de  $p'$  e  $q'$  é feito para obtenção de  $\bar{p}'$  e  $\bar{q}'$ , e utilizando a relação 1.39 encontra-se as componentes de fundamentais das tensões nas coordenadas  $\alpha\beta$ .

$$\begin{bmatrix} v'_\alpha \\ v'_\beta \end{bmatrix} = \frac{1}{i'^2_\alpha + i'^2_\beta} \begin{bmatrix} i'_\alpha & -i'_\beta \\ i'_\beta & i'_\alpha \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{p}' \\ \bar{q}' \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Sendo assim, os valores de  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  são facilmente obtidos com a realização da transformada inversa de Clarke. A análise das figuras 29 e 30 retrata a eficácia do detector de sequencia positiva. Tais figuras apresentam somente as formas de onda referente a fase  $a$ , sendo que as outras fases defasadas em  $\pm 120^\circ$  estão presentes nos cálculo mas eximidas das figuras para facilitar a visualização. A Figura 29 apresenta em vermelho a forma de onda da tensão  $v_a$  e, em preto, a saída do sistema  $v'_a$ . Já a Figura ?? exibe em vermelho a componente fundamental de sequencia positiva da fase  $a$ , ou  $\dot{V}_{a+1}$ , juntamente, em preto, a saída  $v'_a$ . Essas figuras deixa claro como que em poucos ciclos as tensões  $v'_a$ ,  $v'_b$  e  $v'_c$  tornam-se suficientemente próximas das tensões de sequencia positiva dos sinais de entrada.

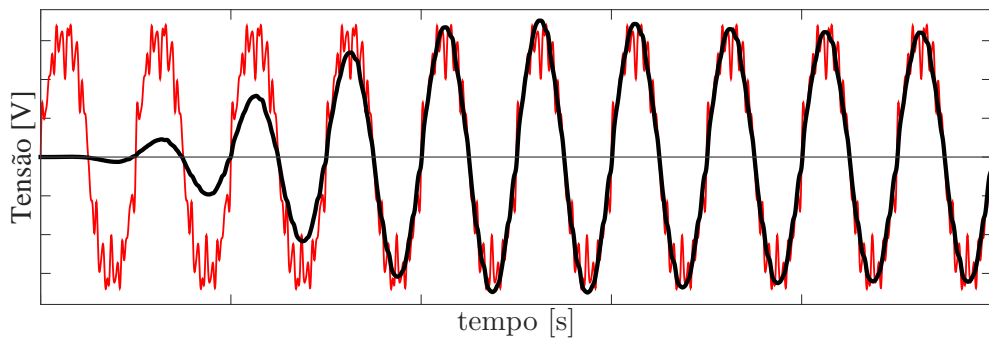


FIGURA 29 – Controle por histerese

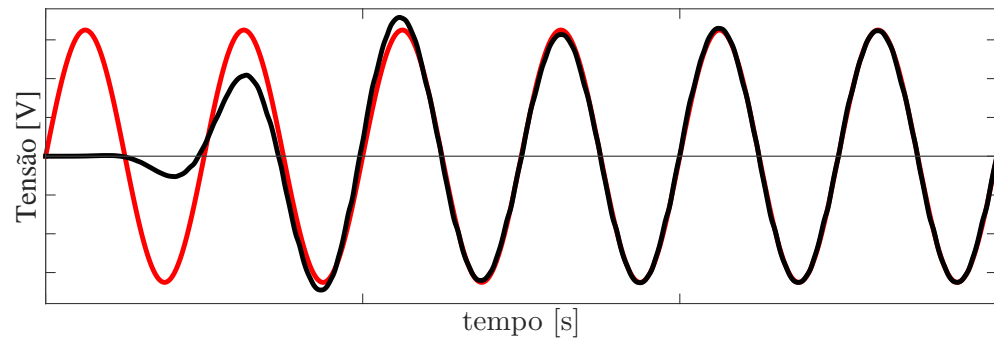


FIGURA 30 – Controle por histerese

## 2.2 Simulação

### 2.2.1 Modelo do sistema

### 2.2.2 Modelo do Conversor

### 2.2.3 Resultados

## Referências Bibliográficas

- [1] PAREDES, H. K. M. *Eletrônica de Potência para Geração, Transmissão e Distribuição de Energia Elétrica: Tópicos em teorias de potência em condições não ideais de operação*. Acessado em 24/06/2016. Disponível em: <<http://www.dsce.fee.unicamp.br/antenor/pdf/it744/CAP6.pdf>>.
- [2] STAUDT, V. Fryze-buchholz-depenbrock: A time-domain power theory. In: IEEE. *2008 International School on Nonsinusoidal Currents and Compensation*. [S.l.], 2008. p. 1–12.
- [3] CZARNECKI, L. Budeanu and fryze: Two frameworks for interpreting power properties of circuits with nonsinusoidal voltages and currents. *Electrical Engineering*, Springer, v. 80, n. 6, p. 359–367, 1997.
- [4] BUDEANU, C. Puissances réactives et fictives. institut romain de l'énergie. bucharest. *Romania*, 1927.
- [5] CZARNECKI, L. S. What is wrong with the budeanu concept of reactive and distortion power and why it should be abandoned. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 1001, n. 3, p. 834–837, 1987.
- [6] AKAGI, H.; WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Instantaneous Power Theory and Applications to Power Conditioning*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.
- [7] WATANABE, E. H.; AREDES, M. *Teoria de Potência Ativa e Reativa Instantânea e Aplicações - Filtros Ativos e FACTS* -. UFRJ - Rio de Janeiro: Laboratório de Eletrônica de Potência.
- [8] AKAGI, H.; KANAZAWA, Y.; NABAE, A. Instantaneous reactive power compensators comprising switching devices without energy storage components. *IEEE Transactions on industry applications*, IEEE, n. 3, p. 625–630, 1984.
- [9] PENG, F. Z.; LAI, J.-S. Generalized instantaneous reactive power theory for three-phase power systems. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, IEEE, v. 45, n. 1, p. 293–297, 1996.

- [10] AFONSO, J. L.; COUTO, C.; MARTINS, J. S. Active filters with control based on the pq theory. *IEEE Industrial Electronics Society Newsletter*, IEEE, v. 47, n. 3, p. 5–10, 2000.
- [11] HABERBERGER, M.; FUCHS, F. W. Novel protection strategy for current interruptions in igbt current source inverters. In: IEEE. *2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference. PESC 04*. [S.l.], 2004. v. 1, p. 558–564.
- [12] TRZYNADLOWSKI, A. M. *Introduction to Modern Power Electronics*. Third edition. New Jersey: John Wiley & Sons, 2015.
- [13] THEKKEVALAPPIL, S. N. Master Thesis, *Hysteretic Pulse Width Modulation with Internally Generated Carrier for a Boost Dc-dc Converter*. Gainesville: University of Florida, 2005.
- [14] WATANABE, E. H.; STEPHAN, R. M.; AREDES, M. New concepts of instantaneous active and reactive power in electrical systems with generic loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*, IEEE, v. 8, n. 2, p. 697–703, 1993.