

Capítulo III

Aplicação de UPS dupla conversão em missão crítica – Funcionamento geral e detalhamento do inversor (PWM)

Luis Tossi *

Este capítulo discorrerá sobre o funcionamento geral de um UPS, a começar por uma introdução aos principais semicondutores utilizados na sua composição, seguida das especificações analisadas (THD, PF, etc.) e do método de modulação (PWM). Falaremos também sobre os três principais blocos: retificador, inversor e chave-estática.

Os semicondutores são divididos em três categorias distintas, de acordo com o seu nível de controle. São elas: diodos, tiristores e chaves controláveis. No caso dos tiristores, comentaremos sobre os SCRs e, dentre os diversos tipos de semicondutores de chaves controláveis, abordaremos os MOSFETs, os transistores bipolares (BJT) e os IGBTs.

Diodos

Diodos são semicondutores que, basicamente, conduzem a corrente elétrica em um único sentido e bloqueia o seu fluxo no sentido oposto, conforme indicado na Figura 1.

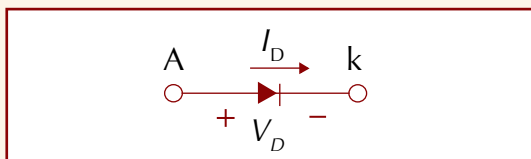


Figura 1 – Diodo.

SCR (Silicon Controlled Rectifier)

Os SCRs possuem um recurso adicional ao diodo, pois, além de bloquear o fluxo de corrente reversa, ele controla o fluxo de corrente no sentido correto, ao invés de permiti-lo constantemente como no diodo. Ou seja, o SCR pode “ligar” ou “desligar” o fluxo de corrente (no sentido corrente) por meio de um terceiro terminal chamado gate, conforme indicado na Figura 2.

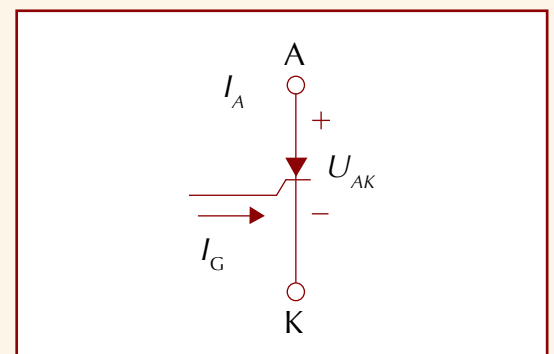


Figura 2 – SCR.

MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)

Os MOSFETs são semicondutores que, devido à sua característica de construção, possuem alta resistência de condução (entre Drain e Source), impossibilitando que controle altas correntes. Entretanto, seu chaveamento

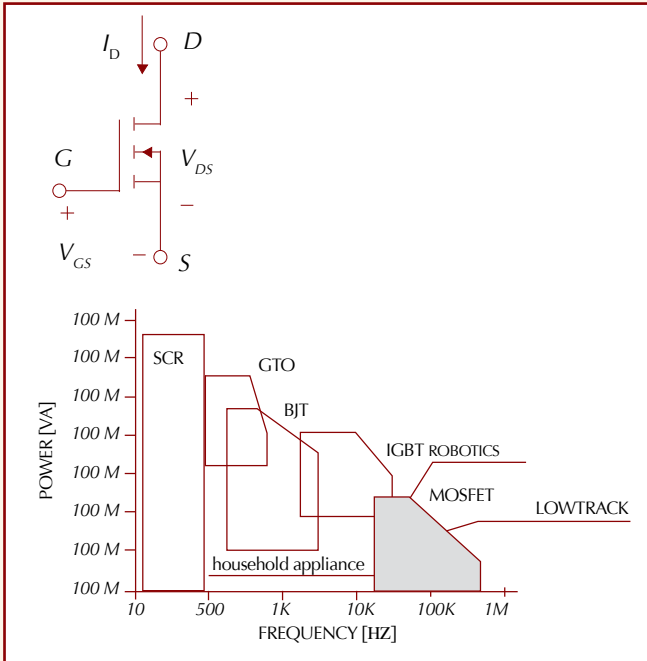
é feito por potencial de tensão, ou seja, com a utilização de baixa potência, permitindo o trabalho em altas frequências de chaveamento.

As Figuras 3 e 4 mostram, respectivamente, seu esquema e comparativo com os outros semicondutores.

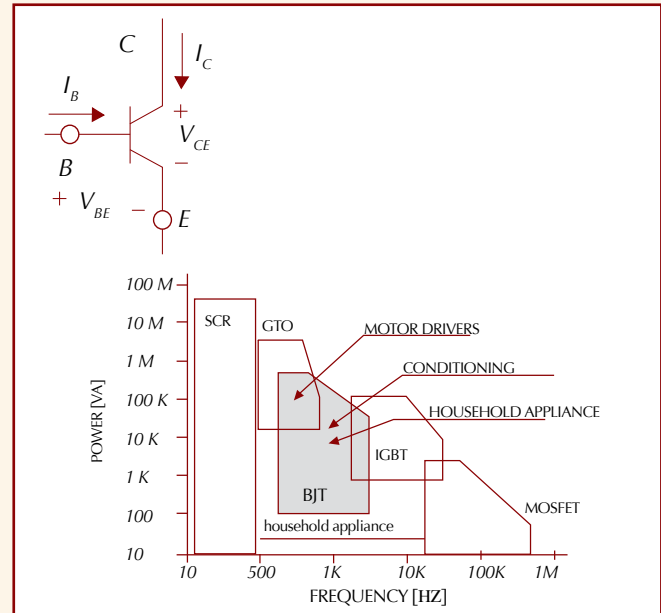
BJT (Bipolar Junction Transistor)

Os transistores bipolares possuem características construtivas diferentes do MOSFET, o que lhe permite controlar correntes maiores, principalmente, devido à menor resistência de condução (entre coletor e emissor), mas em frequências menores, pois seu acionamento é feito por corrente, ou seja, utiliza maior potência no controle.

As Figuras 5 e 6 exibem, respectivamente, seu esquema e



Figuras 3 e 4 – MOSFET e comparativo.



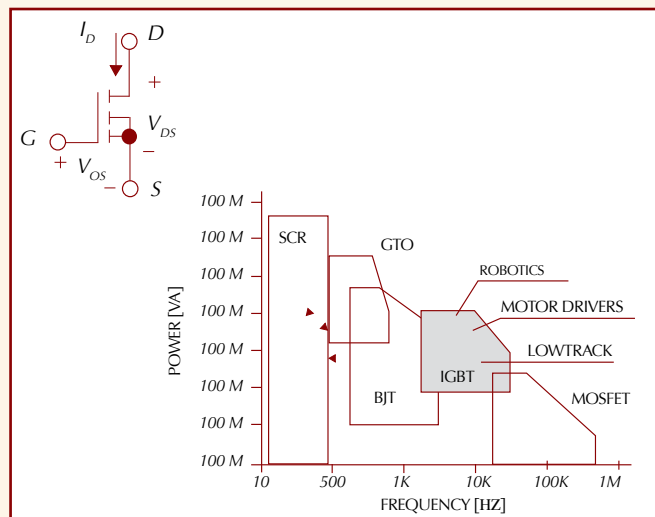
Figuras 5 e 6 – BJT e comparativo.

comparativo com os outros semicondutores.

IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)

O IGBT é uma combinação do MOSFET, do transistor bipolar e do GTO. Não falaremos deste último neste capítulo, mas conferiu ao IGBT– sua característica de bloqueio de tensão. Dessa maneira, o IGBT possui novas característica construtivas, permitindo o controle de altas correntes em altas frequências.

Observe, nas Figuras 7 e 8, seu esquema e comparativo com outros semicondutores.



Figuras 7 e 8 – IGBT e comparativo.

Atualmente, a tecnologia do IGBT é mais largamente aplicada na construção dos UPSs, não só nos inversores como também em algumas linhas de retificadores, em que o SCR também é bastante utilizado. A Figura 9 mostra um panorama geral de todas as tecnologias:

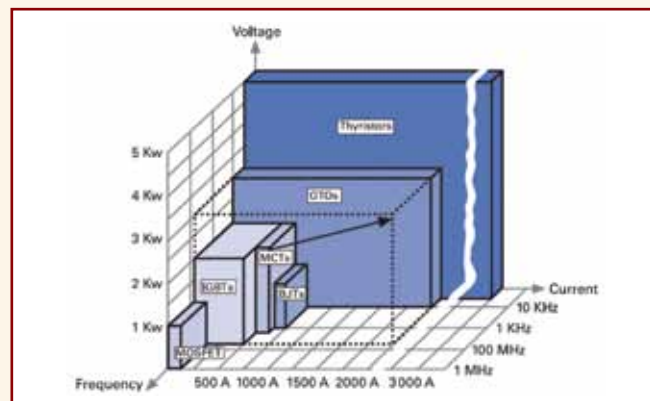


Figura 9 – Capacidade dos dispositivos de potência.

As gerações anteriores de UPS utilizavam outros semicondutores, tecnologia mais comum na época. Muitos retificadores até hoje ainda trabalham com SCR, sendo alguns de baixa potência e outros, mais antigos, utilizam diodos. Nos dias atuais, praticamente todos os inversores trabalham com IGBT e os mais antigos com BJT em configuração chamada “Darlington”, que é o nome dado à configuração dupla de BJT (o primeiro amplifica a corrente para o acionamento do segundo). Os mais antigos trabalhavam com SCR.

Especificações

Quando avaliamos o desempenho de diferentes topologias de construção de UPSs, algumas especificações são mais analisadas. São elas: distorção harmônica (THD), fator de potência (PF) e rendimento AC/AC (η).

As diferentes formas de onda periódicas, segundo a Série de Fourier (recurso matemático que analisa estas formas de onda), são compostas pela onda de frequência fundamental (no caso de análises em nosso sistema elétrico será de 60 Hz) e de outras infinitas formas de onda, chamadas harmônicas, cuja frequência é múltiplo inteiro da fundamental. Na Figura 10, podemos ver uma forma de onda distorcida (em preto), devido à presença de sua 3ª e 5ª harmônicas, com amplitudes de, respectivamente, 30% e 20% da fundamental (pontilhado):

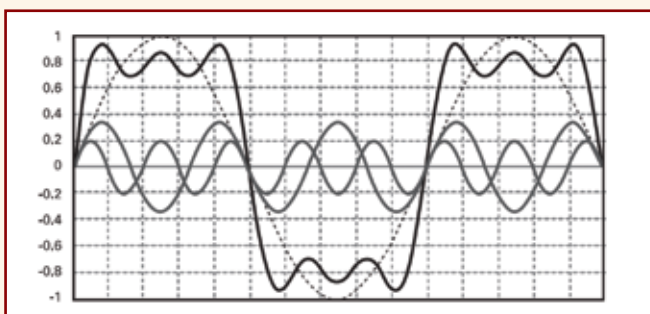


Figura 10 – Onda resultante da fundamental e das 3ª e 5ª harmônicas.

O THD (*Total Harmonic Distortion*) é basicamente a relação entre a soma de todas as harmônicas de um sinal (tensão ou corrente) e a sua fundamental, definido na Figura 11:

$$THD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} = \frac{\sqrt{V_2^2 + V_3^2 + V_4^2 + \dots}}{V_1}$$

Figura 11 – Fórmula do THD.

Um número elevado de THD reflete em uma forma de onda muito distorcida, refletindo em um possível comportamento deficitário da carga e da instalação elétrica, podendo causar queimas de cargas e condutores, desligamentos, sobreaquecimento de transformadores e disjuntores (podendo desarmá-los), etc. Portanto, quanto menor este número, melhor a condição de operação do sistema.

Referente à potência, temos duas especificações bastante verificadas: o fator de potência (PF) e o rendimento AC/AC (η).

A potência de um circuito elétrico é dividida em duas partes: as potências reativas “Q” (capacitivas e indutivas), cuja unidade é VAR (Volt-Ampère reativo) e as potências ativas “P” (resistências), cuja unidade é W (Watt). A soma de ambas é chamada de potência aparente “S”, cuja unidade é VA (Volt-Ampère). Vetorialmente, a potência reativa Q é sempre defasada em $\pm 90^\circ$ em relação à potência ativa. A Figura 12 mostra como seus valores são expressos e, na Figura 13, temos a sua representação vetorial:

$$\begin{cases} P = VI \cos(\varphi) \\ Q = VI \sin(\varphi) \\ S = VI = \sqrt{P^2 + Q^2} \end{cases}$$

Figura 12 – Expressões das potências.

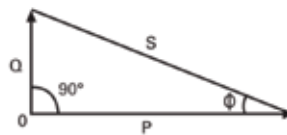


Figura 13 – Representação vetorial das potências.

O PF (Power Factor) é um número adimensional, representado pela relação entre potência ativa (P) e potência aparente (S), conforme indicado na Figura 14:

$$PF = \frac{P(W)}{S(VA)}$$

Figura 14 – Fórmula para cálculo do fator de potência.

As reatâncias geram potências não reais, ou seja, apenas se contrapõem ao fluxo de corrente alternada, enquanto a potência ativa é real. Dessa maneira, podemos concluir que quanto mais próximo de 1,0 estiver o fator de potência (PF), melhor o sistema está sendo aproveitado, pois a maioria ou a totalidade da potência aparente (S) será ativa (P). O fator de potência também é nomeado, quando diferente de 1,0, como capacitivo ou indutivo, de acordo com a reatância (Q) resultante do sistema.

Já o rendimento AC/AC ($\eta_{AC/AC}$) é traduzido na relação de potência ativa de entrada e saída do UPS, indicando o aproveitamento do equipamento. A diferença entre esses dois valores indica a potência que está sendo dissipada (perdida) pelo UPS. Na Figura 15 temos um exemplo:

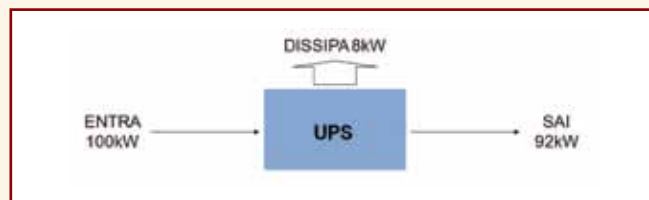


Figura 15 – Exemplo de análise de rendimento.

Como podemos notar, apesar de o equipamento consumir 100 kW, a carga está solicitando apenas 92 kW. Portanto, a diferença de 8 kW está sendo dissipada pelo equipamento e, quanto menor for este número, melhor será o seu rendimento, que neste caso é de 92% ($\eta_{AC/AC} = P_{OUT}/P_{IN} = 92 \text{ kW}/100 \text{ kW} = 92\%$).

PWM (Pulse Width Modulation)

O PWM consiste em uma técnica de modulação por largura de pulso, que é amplamente utilizada como modo de controle de chaveamento de conversores.

Para obtenção do sinal PWM, os circuitos eletrônicos comparam um sinal “dente de serra” f_0 (portadora), com frequência igual ao do chaveamento desejado (tal parâmetro é escolhido de acordo com as impedâncias dos filtros dimensionados para o sistema), com a forma de onda f_0 (sinal modulante), a qual se deseja obter no caso uma senoide. As Figuras 16 e 17 ilustram um circuito comparador e o sinal PWM resultante:

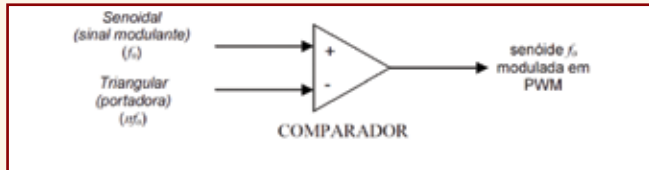


Figura 16 – Circuito comparador para geração de PWM.

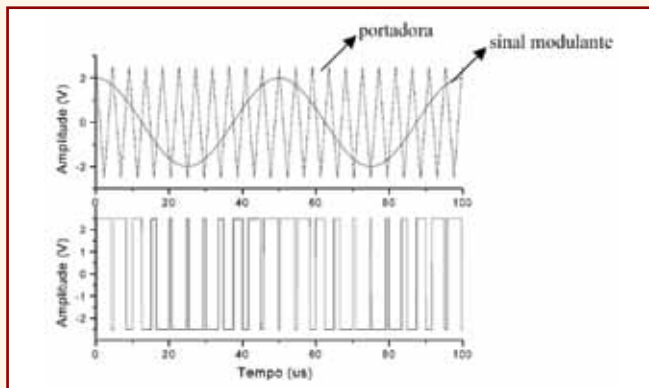


Figura 17 – Sinal PWM resultante do circuito comparador.

A análise espectral (mapa de harmônicos, fundamental e componente DC que compõem o sinal) do PWM gerado possui o aspecto indicado na Figura 18:

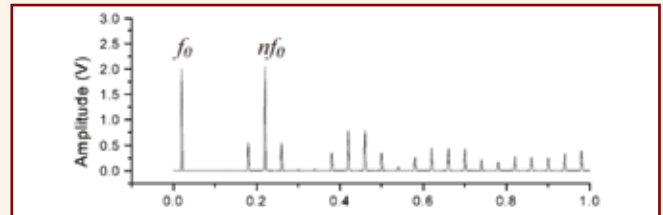


Figura 18 – Espectro de frequências do PWM.

Portanto, é possível perceber claramente neste espectro de sinal PWM que, se ele for submetido a um FPB (Filtro Passa Baixa, como circuitos indutivos série e/ou capacitivos paralelo), o sinal modulante f_0 é recuperado, obtendo a senoide desejada no final do processo.

Detalhamento do sistema UPS

Como já mostrado anteriormente, o diagrama básico de um sistema UPS dupla-conversão é o indicado na Figura 19:

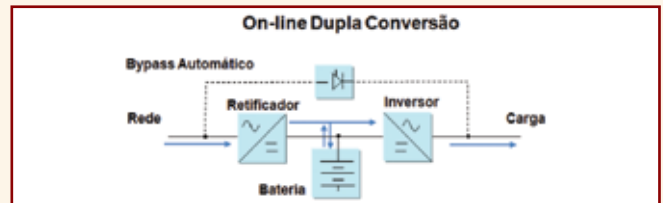


Figura 19 – UPS dupla-conversão.

Nesta etapa, detalharemos os três principais blocos da eletrônica de um UPS dupla-conversão. Curiosamente, iniciaremos com o bloco Inversor, aproveitando os conceitos ainda dentro deste capítulo sobre PWM, passando no capítulo seguinte para o detalhamento do retificador e da chave-estática.

Inversor

O bloco do inversor se resume a um conversor AC/DC. Ele recebe uma alimentação DC variável e a converte em energia AC condicionada, ou seja, com limites restritos em relação às distorções harmônicas de tensão (THDv), às variações de tensão e de frequência. Tais limites variam de acordo com a tecnologia, com o tempo de resposta do controle e com o dimensionamento e as proteções da potência (semicondutores, filtros, etc.).

Podemos ver na Figura 20 a disposição do circuito principal de potência de um inversor trifásico com IGBTs: Percebe-se que entre os IGBTs e o controle de PWM geralmente existe um circuito chamado Drive, responsável por isolar galvanicamente (ou seja, sem contato elétrico direto) os pulsos eletrônicos dos semicondutores de potência, podendo ser por transformadores de sinal (isolamento magnético), acopladores ópticos (isolamento por luz), etc.

Os controles PWM mais modernos otimizam o desempenho dos inversores em condições adversas – como sobrecarga, curto-circuito, desbalanceamento, etc. – e, quase sempre,

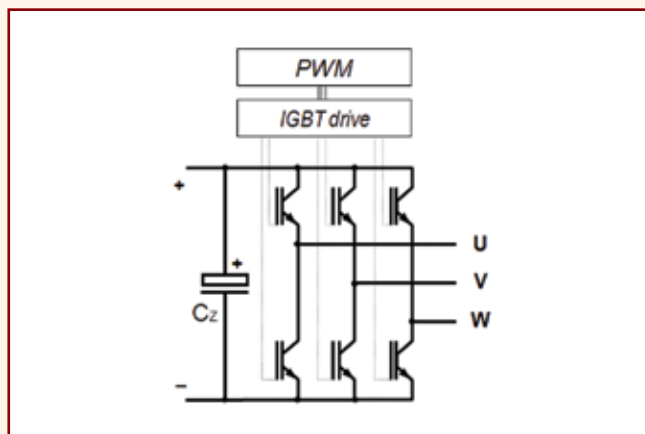


Figura 20 – Inversor trifásico.

utilizam processadores DSP, os quais possuem características de processamentos matemáticos de alta velocidade, passando a determinar o chaveamento de acordo com cálculos vetoriais avançados (herdado dos controles de inversores para motores) e outros recursos matemáticos, permitindo ao controle se adaptar aos diferentes fatores externos, mantendo o alto nível de desempenho.

Analisando cada fase do inversor separadamente, podemos verificar que a tensão média obtida nas saídas U, V e W variam de acordo com o tempo de condução do par de IGBTs, imposto por cada etapa do sinal PWM, conforme apresentado na Figura 21:

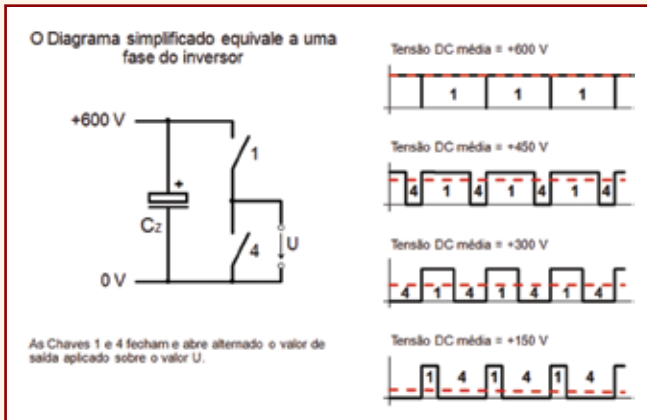


Figura 21 – Tensão DC média por tempo de chaveamento.

Dessa maneira, considerando o chaveamento em alta frequência e a possível inversão de polaridade pela existência de uma carga em delta na saída das fases, teremos os sinais da Figura 22:

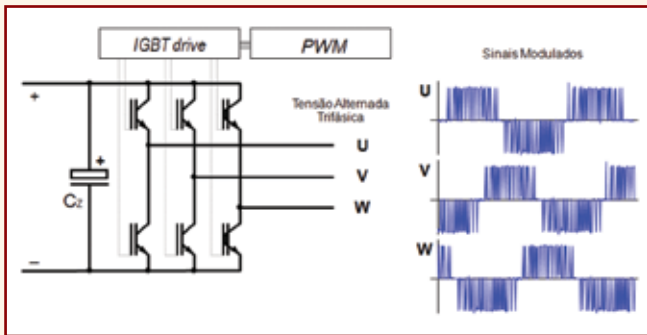


Figura 22 – Sinais PWM de saída do inversor trifásico.

O inversor faz o chaveamento da tensão DC fornecida pelo retificador em um sinal pulsante (três fases defasadas 120° entre si) de alta frequência. Este sinal tem sua largura de pulsos variável em função da tensão e frequência de saída, que devem ser regulados. Este sinal só será puramente senoidal após a passagem pelo filtro de saída, em que o valor médio dos diferentes períodos verificados anteriormente determinam os diferentes valores instantâneos da senoide que se pretende obter, e cuja presença já foi provada pela análise espectral.

O filtro de saída tem o papel de filtrar os pulsos de alta frequência, deixando passar apenas a frequência fundamental, como indicado na Figura 23.

Nessa etapa nós temos uma abertura de duas categorias de inversores e, conseqüentemente, de UPSs: os que possuem transformadores na saída do inversor e os que não possuem (chamados transformerless).

Os inversores mais antigos, e muitos ainda hoje, utilizam, após a filtragem do PWM, um transformador isolador. Dependendo da frequência de chaveamento do PWM, a indutância do filtro é substituída pelo próprio transformador. Tal recurso é indispensável para UPSs trifásicos acima de 380 V, pois a tensão DC obtida pela retificação convencional (ponte tiristorizada com retificação trifásica ou em relação ao neutro) desta energia, cujo máximo está próximo de 600 V, não é suficiente para se obter novamente 380 V, por exemplo, na saída do filtro. Portanto, o transformador possui a função principal de elevador de tensão (em outros casos também, como já comentado, de filtro) e este sinal é monitorado pelo controle do PWM.

No caso dos UPSs transformerless, não é necessário o transformador

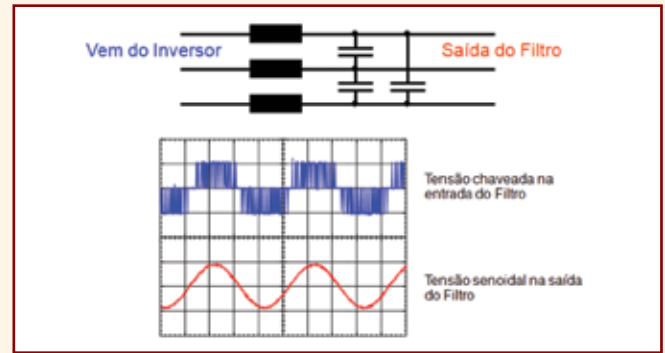


Figura 23 – Filtro de saída do inversor e forma de onda resultante.

elevador, apenas os filtros LC convencionais de saída. Isso é possível pela elevação da tensão DC que alimenta o inversor, que pode vir de circuitos booster ou de retificadores com IGBT, assuntos estes que serão discutidos mais adiante.

O dimensionamento dos semicondutores do inversor e de seus filtros determina também o fator de potência máximo (indutivo e capacitivo) permitido na saída do equipamento. Tais características variaram no decorrer dos anos, de acordo com as características das cargas para o casamento perfeito de impedâncias na saída do UPS.

Atualmente, o fator de potência das cargas está muito próximo de 1,0, diferentemente de décadas atrás, cujo fator de potência, sem correção, girava de torno de 0,8 indutivo. Dessa maneira, os inversores dos UPSs tiveram que ser redimensionados, adaptando-se a esta nova realidade das cargas, podendo, assim, trabalhar com fatores de potência até 1,0 e sem limitação de acordo com o tipo de reatância (capacitiva ou indutiva), como indicado na Figura 24.

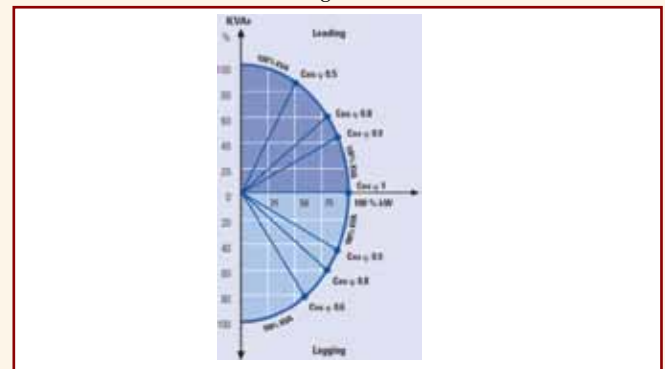


Figura 24 – Diagrama de potência máxima por fator de potência.

Referências

- Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, "Power Electronics, 3rd Edition", John Wiley and Sons Inc.
- <http://en.wikipedia.org>
- Paolo Raffaele Ghigi, Appunti del corso di "Fondamenti di Elettrotecnica L".
- Luciano Simoni, "Caratteristiche e tecnologie dei condensatori", 1970, CLUEB.
- www.lima.ling.unibo.it/didattica/qual_energia_disp.htm
- Vito Carrescia, "Fondamenti di Sicurezza Elettrica" TNE.
- Gianni Pattini, University of Bologna, Dispense e appunti del corso di Impianti Elettrici L.
- Carlo Quiriconi, "K-Factor, Transformers and non Linear Loads", Chloride UPS.
- "The Essential Guide to Power Protection Design", Chloride Power Protection, 18 April 2001.
- Universidade Estadual de Campinas UNICAMP (Tese de Mestrado de Wilson da Silva Júnior); ASIC para Geração de Senoide com Frequência Variável Baseada em PWM.
- S Series MASTERGUARD Presentation.

***LUIS TOSSI é engenheiro electricista e diretor-geral da Chloride Brasil. Atua na área de condicionamento de energia e aplicações de missão crítica há 23 anos, com larga experiência em produtos, aplicações e tecnologias de ponta.**

Continua na próxima edição
 Confira todos os artigos deste fascículo em www.osetoreletrico.com.br
 Dúvidas, sugestões e comentários podem ser encaminhados para o e-mail redacao@atitudeeditorial.com.br