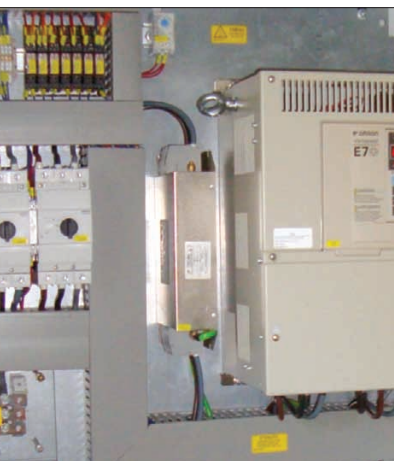


eficiência energética na indústria*

{ 6.ª PARTE – VARIAÇÃO ELETRÓNICA DE VELOCIDADE }



(continuação da edição anterior)

Os motores elétricos são equipamentos de aplicação generalizada nos vários setores de atividade, desde a indústria aos serviços. Na sua grande maioria, os motores encontram-se sobredimensionados, normalmente com factores de carga de cerca de 30%. A aplicação de VEV's coloca à disposição dos utilizadores um vasto potencial de economia de energia, para além de benefícios técnicos e económicos, nomeadamente o controlo de velocidade e o aumento de vida útil do motor, com consequentes reduções de custos energéticos e de manutenção.

O grau de desenvolvimento tecnológico alcançado na sociedade industrial atual, tanto nas instalações industriais como nos serviços ou no doméstico, não seria possível sem a presença maciça de uma máquina, que com a sua simplicidade e robustez, solucionou o problema de gerar movimento e energia mecânica onde é necessário. Falamos do motor elétrico de corrente alternada. A ausência nesta máquina de elementos submetidos a fricção, possibilita o alcance de uma grande duração sem grandes necessidades de manutenção, quando dimensionada e usada adequadamente.

Por outro lado, o consumo de energia elétrica numa instalação industrial é principalmente de energia utilizada como força motriz de indução trifásica. Deste modo, facilmente se percebe que a força motriz existente num processo apresenta elevada representatividade no consumo elétrico da instalação. Assim, a redução do consumo de energia associado à força motriz é, sem dúvida, um dos principais fatores para a eficiência energética de uma instalação.

A versatilidade e universalidade do emprego do motor elétrico de corrente alternada

passa também pelos controladores eletrónicos de velocidade. A eletrónica de potência, graças ao desenvolvimento de excelentes semicondutores, como o retificador de silício, controlado nas suas diversas variantes e dos transístores bipolares, permitiu o fabrico de equipamentos muito eficientes de produção de ondas de corrente alternada com frequência e tensão controladas (conversores de frequência), que aplicadas ao motor, tanto síncrono como assíncrono, fazem dele uma máquina quase tão versátil, para o controlo de binário e velocidade, como o motor elétrico de corrente contínua. Este teve, em consequência, uma redução drástica no seu emprego devido ao preço mais elevado e necessidade de manutenção devido ao desgaste do conjunto colector/escovas.

De entre todos os destinos da eletricidade, a sua transformação em energia mecânica é pois um dos dados mais importantes e graças aos conversores de frequência consegue-se que esta energia mecânica se produza com motores elétricos convencionais, de uma forma altamente controlada e flexível. Atingem-se, deste modo, as melhores prestações de eficiência, redução da contaminação ambiental e melhoria da qualidade.

Do ponto de vista do consumo de eletricidade, os motores apresentam-se como as cargas mais importantes usadas em vários setores e com uma vasta gama de aplicação de que são exemplos os ventiladores, compressores, bombas, moinhos, elevadores, transportadores, entre outros.

O consumo de energia de um motor elétricos é influenciado por diversos fatores, designadamente: a eficiência e o controlo da velocidade do motor, a qualidade da rede de alimentação, a presença de harmónicos, o dimensionamento dos sistemas, a rede de distribuição, os sistemas mecânicos de transmissão, as práticas de manutenção e a eficiência do dispositivo utilizador final (ventilador, bomba, entre outros).

Atuando em alguns destes fatores podem inferir-se significativas economias de energia elétrica, sendo portanto desejável a utilização de tecnologias mais eficientes, capazes de reduzir o consumo de eletricidade em força motriz. Estas tecnologias incluem os motores de elevado rendimento, os variadores eletrónicos de velocidade (VEV's) e a melhoria dos sistemas mecânicos de transmissão, entre outros.

* Texto escrito de acordo com o Novo Acordo Ortográfico.

ACIONAMENTOS DE VELOCIDADE VARIÁVEL

A máquina motora por excelência, mundialmente utilizada, é o motor elétrico de indução, dadas as suas conhecidas características gerais de robustez, construção normalizada, baixo preço e todas as restantes e bem conhecidas propriedades que não vamos aqui relembrar, por ser desnecessário. Os problemas principais neste tipo de máquinas, que poderão ter maior ou menor relevância de acordo com as aplicações específicas, são os que respeitam as características de arranque e o controlo (regulação) da velocidade.

Embora se possam encontrar algumas soluções construtivas que, em relação ao motor mais utilizado (o designado motor de rotor em curto-circuito ou gaiola de esquilo) melhorem as características do arranque como motores de dupla ou tripla gaiola, e se possam prever vários sistemas de arranque clássicos como arranque por comutação estrela-triângulo, por autotransformador, por intermédio de resistências rotóricas sólidas ou líquidas, e outros, ou ainda recorrer à utilização de motores de rotor bobinado, tais sistemas, embora por vezes de custo não muito significativo, têm possibilidades limitadas, não satisfazendo grande parte das aplicações e introduzindo, por outro lado, adicionais e por vezes significativas perdas de energia.

O problema da regulação da velocidade tem sido, por vezes, o de mais difícil solução obrigando, em muitos casos, ao recurso a motores especiais de corrente contínua, de preço superior, conservação mais dispendiosa e aplicação mais difícil pelas suas características construtivas (coletores e escovas), em locais industriais de certo modo poluídos, como acontece em muitas indústrias químicas, de cimento, de papel, minas, captação de águas, esgotos, e outros. Outros métodos convencionais de controlo de velocidade de um motor, por via da interposição entre este e a carga de diversos tipos de dispositivos, como caixas de velocidade com engrenagens, sistemas de correia com polias de diâmetro variável, embraiagens excêntricas de disco seco, transmissões hi-

dráulicas e embraiagens eletromagnéticas, estão a cair em desuso devido a serem soluções volumosas, nalguns casos de baixo rendimento (exemplos dos dois últimos tipos) e necessitarem de manutenção periódica. A única área em que ainda é viável a utilização destas soluções é nas aplicações de pequena potência.

Um outro fator cada vez mais atual e pertinente, que vem merecendo a atenção dos fabricantes e utilizadores é a premente necessidade de economizar energia.

VARIADORES ELETRÓNICOS DE VELOCIDADE

Aos variadores de velocidade está destinado um papel extremamente relevante na economia direta de energia.

A grande maioria dos motores utilizados na indústria são motores de corrente alterna com velocidade aproximadamente constante. Uma grande parte das aplicações em que se utiliza força motriz beneficiaria, em termos de consumo de eletricidade e desempenho global, se a velocidade do motor se ajustasse às necessidades do processo. Isto é especialmente verdade em novas aplicações que podem tirar partido do controlo preciso de velocidade. Os potenciais benefícios da variação da velocidade incluem uma melhoria da produtividade e qualidade dos produtos, menos desgaste nos componentes mecânicos e uma poupança substancial de energia.

Hoje em dia os variadores eletrónicos de velocidade (VEV's) são mais atrativos do ponto de vista económico, de desempenho e fiabilidade, fornecendo maiores possibilidades de amortização rápida dos respetivos custos e de poupança energética.

A rentabilidade dos variadores depende da potência do motor a controlar e do tipo de aplicação. No entanto, há outros fatores que influenciam a rentabilidade dos variadores, como o número de horas de funcionamento e o regime de carga do motor (quanto mais variável for o regime de carga, maior o potencial de poupança).

CARACTERIZAÇÃO DOS VEV'S

Devido ao progresso verificado nas últimas décadas nos domínios da microeletrónica e eletrónica de potência, os VEV's vieram alargar substancialmente a gama de aplicações em que é vantajosa a variação de velocidade dos motores de corrente alterna. Além da possibilidade de regulação de velocidade, os VEV's, também chamados fontes de frequência variável (ou conversores de frequência) substituem, com enormes vantagens, todos os sistemas até agora utilizados para o arranque dos motores de indução. Normalmente, estes aparelhos convertem a frequência (50 Hz) e a tensão fixa da rede, em valores ajustáveis, apropriados às características do motor. Como é sabido, neste tipo de motores é a frequência que determina a sua velocidade pela conhecida expressão:

$$V = \frac{2 \times 60 \times F}{P}$$

Sendo:

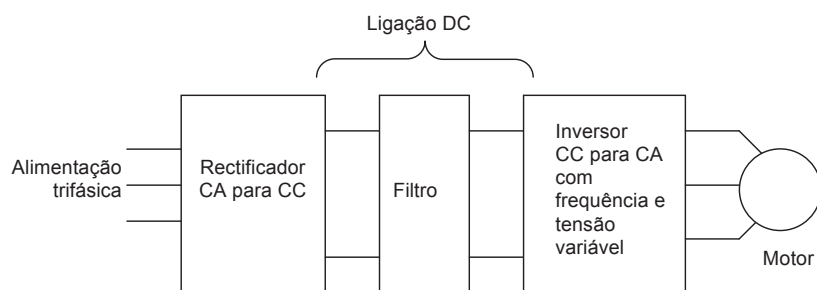
V a velocidade

F a frequência

P o número de pares de polos

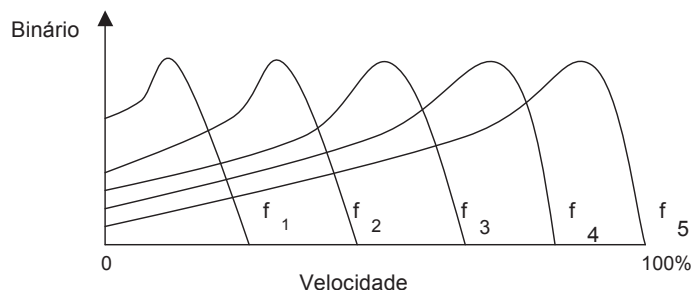
Este último é um valor constante (de construção), como é sabido. O variador de frequência controla a frequência (F) e a tensão aplicadas ao motor, e portanto a velocidade (V) é proporcional ao valor de frequência.

Normalmente, os VEV's convertem a tensão da rede de 50 Hz numa tensão contínua e em seguida sintetizam uma frequência variável sob controlo externo do utilizador que pode ir de 0 a 150 Hz, consoante o tipo de aplicações. Devido à sua flexibilidade, alto rendimento, elevada fiabilidade e custo decrescentes, os VEV's têm vindo a aumentar significativamente a sua penetração no mercado. Há diversos tipos de configurações no circuito eletrónico dos VEV's, consoante o tipo de motor e a gama de potência. Os tipos mais comuns de VEV's utilizam inversores na configuração esquemática na figura que se apresenta na página seguinte.



No andar de entrada a alimentação trifásica é convertida em tensão contínua, seguindo-se um andar de filtragem. No andar de saída um inversor converte a tensão contínua numa tensão trifásica de frequência e amplitude ajustáveis.

A velocidade do motor é proporcional à frequência de saída, de modo que o ajuste de frequência permite controlar a velocidade do motor. Quando se pretende que o binário máximo permaneça constante quando a velocidade varia, a amplitude da tensão produzida varia linearmente com a frequência (exceto a baixa velocidade, em que a tensão é subida para compensar a queda de tensão resistiva no motor). Estas características permitem não só regular continuamente a velocidade, mas também efetuar arranque suaves. Estes além de diminuírem substancialmente a corrente de arranque, reduzem também o desgaste no equipamento mecânico acionado.



Um aspeto importante que distingue os inversores da rede trifásica consiste na ausência de caminho de retorno para a energia reativa que habitualmente oscila entre a fonte e a carga num sistema sinusoidal. Assim, é o próprio inversor que tem que funcionar como fonte reativa para o motor. O esquema utilizado consiste em proporcionar um caminho para a circulação de corrente entre duas fases do motor para que estas possam permutar a energia armazenada entre si em vez de cada uma delas o fazer com a rede.

O rendimento dos VEV's deve ser entendido como o rendimento global do conjunto inversor+motor, que é o produto dos rendimentos individuais dos dois, sendo o motor afetado neste caso pela presença de harmónicos. Na generalidade das situações o valor registado para a velocidade e a carga nominais oscila entre os 80 e 90%, ainda que sejam possíveis rendimentos típicos de VEV's de 95-98% à plena carga, que decrescem lentamente à medida que a carga se reduz.

As cargas de bombagem, por exemplo, nas quais as necessidades em binário decrescem com a velocidade, fazem baixar bastante o rendimento dos VEV's. Isto acontece porque em situação

de baixa velocidade e binário reduzido tanto o motor como o inversor funcionam com rendimentos pequenos. O VEV pode chegar a valores de rendimento da ordem dos 15%, para 20% da velocidade, mas a esta velocidade uma bomba não desenvolve mais do que 1% da potência nominal de saída.

Assim, em termos de potência nominal, as perdas estão longe de ser significativas e a importância relativa do baixo rendimento a baixa velocidade é diminuta. Além disso, é preciso lembrar que os métodos alternativos ao VEV são ainda menos eficientes neste regime (por exemplo, o motor com rotor bobinado e reóstato líquido).

A rentabilidade da utilização de VEV's no controlo de caudais está sobretudo dependente do número de horas de funcionamento da instalação, do regime de carga (quanto menor é a carga, maior é o potencial de conservação) e da potência em jogo. O custo por kW dos VEV's diminui à medida que a potência aumenta. Este facto deriva de que, se considerarmos dois VEV's do mesmo tipo, por exemplo um de 25 kW e outro de 50 kW, só os andares de potência são diferentes, sendo os circuitos de controlo semelhantes.

Um exemplo de aplicação destes reguladores de velocidade encontra-se nos ventiladores de fornos, que geralmente estão sobredimensionados para ter uma ampla margem de regulação. Mediante a aplicação de variadores de frequência aos motores destes ventiladores podem conseguir-se economias de 40-50% de consumo elétrico dos mesmos (em alguns casos podemos chegar a economias de 80%), com períodos de retorno do investimento francamente atrativos.

Um outro exemplo de possibilidade de controlo proporcionada por VEV's encontra-se, como já se referiu, em sistemas de bombagem, onde é prática habitual um dimensionamento que não é o mais adequado. Um sistema que se destina a debitar um certo caudal e a vencer uma determinada altura, é normalmente sobredimensionada em relação a estas duas variáveis, para que a instalação venha a funcionar "do lado da



segurança" em relação a regimes que vai encontrar na sua vida útil. A altura a vencer pelo caudal bombeado é determinada por excesso porque a parcela devida a eventuais perdas de carga por fricção nas tubagens é obtida com o auxílio de coeficientes já de si tendentes ao sobredimensionamento, sendo no fim atribuída ainda uma percentagem adicional para aumentar a segurança do cálculo. Como resultado desta prática comum acontece que tanto o caudal como a altura são sobrestimados no projeto, pelo que a curva real de funcionamento do sistema passa a funcionar com alturas menores para o mesmo caudal, e a bomba escolhida só poderá funcionar nas condições de referência desde que haja um processo de introdução de perdas por atrito adicionais, o que é normalmente conseguido com válvulas de estrangulamento de caudal.

Dado que a potência mecânica solicitada ao motor é proporcional ao produto da altura pelo caudal a dividir pelo rendimento da bomba, a potência desperdiçada é proporcional ao produto do caudal de referência pela diferença de alturas (entre aquela a que poderá funcionar com o caudal referido, após o estrangulamento, e a altura resultante do dimensionamento que terá que vencer) a dividir pelo rendimento da bomba. Há estimativas que situam as perdas devidas ao estrangulamento de caudais de 20% de toda a energia consumida pelos sistemas de bombagem. Donde se infere que sistemas de controlo de caudais de fluidos como o atrás citado são ineficientes, sobretudo quando o sistema é usado bastante abaixo da capacidade nominal, ou funciona a cargas bastante variáveis em regime de operação contínua, pelo que uma alternativa a esta prática pode, pois, ser a regulação de caudal por velocidade regulável da bomba, conduzindo a rendimentos bastante superiores (é típico passar-se de 30% para 70%) e, consequentemente, a menores consumos de energia.

O tempo de amortização de um VEV aplicado a uma bomba varia bastante de caso para caso. Um valor entre um e três anos parece razoável tendo em atenção os parâmetros atuais que condicionam a rentabilidade do

investimento. Mas é de esperar que este valor baixe se os preços da energia aumentarem e também prosseguir a tendência para o embaratecimento da tecnologia dos VEVs.

TIPOS DE VARIADORES ELETRÔNICOS DE VELOCIDADE

Os principais tipos de VEVs são:

- › **Inversor por fonte de tensão (VSI, "Voltage Source Inverter")**: Este tipo de montagem pode ser encarado como aproximação a uma fonte de tensão trifásica, desprezando o efeito dos harmónicos, e a saída respetiva pode ser usada para alimentar diretamente o motor sem nenhuma forma de controlo em malha fechada. No andar de saída é produzida uma onda quadrática. Este tipo de VEV tem sido progressivamente abandonado devido aos harmónicos gerados e ao baixo fator de potência quando a carga é reduzida;
- › **Modulação por largura de impulso (PWM, "Pulse Width Modulated VSI")**: No andar de saída é sintetizada uma senoide de amplitude e frequência variável através da comutação a frequência elevada de uma tensão contínua, permitindo obter uma tensão de amplitude e frequência variável. Tal como na montagem VSI, também a PWM pode ser encarada como aproximação a uma fonte de tensão trifásica, desprezando o efeito dos harmónicos, e a saída respetiva pode ser usada para alimentar diretamente o motor sem nenhuma forma de controlo em malha fechada. A indutância do motor funciona como filtro sendo a corrente praticamente sinusoidal. Devido ao bom fator de potência (em qualquer regime de carga) e ao baixo conteúdo de harmónicos, os VEVs com PWM dominam largamente o mercado para aplicações até algumas centenas de kW. Na gama até 1.000 kW, o tipo predominante utiliza a modulação por largura de impulso com saída a transístores/IGBTs;
- › **Inversor por fonte de corrente (CSI, "Current Source Inverter")**: este tipo, juntamente com o VSI e o PWM, constituem um dos três tipos mais comuns de montagem de inversores. A alimentação

trifásica é convertida em corrente contínua, sendo depois filtrada numa indutância que fornece uma corrente constante ao inversor. Este, por sua vez, vai gerar uma corrente que aproxima a senoide por patamares. Este tipo de VEV é simples e robusto, sendo sobretudo utilizado em motores de indução na gama 150 kW a 750 kW. É apropriado em aplicações em que se pretende recuperação de energia na frenagem do motor. Apresenta, contudo, um baixo fator de potência quando a carga é reduzida;

- › **VEVs para motores de indução de rotor bobinado**: neste tipo de motores, em vez de se controlar a velocidade, através da ligação de uma resistência variável ao rotor (o que conduz a perdas elevadas), é possível utilizar VEVs ligados ao rotor do motor, que devolvem à rede a energia que seria de outro modo dissipada. Podem ser usados VEVs tipo Kramer estático ou Scherbius estático. Estes VEVs apresentam a vantagem de só terem que estar dimensionados para a variação de velocidade pretendida. Por exemplo, num motor de rotor bobinado de 375 kW, se a velocidade variar entre 70% e 100% da velocidade nominal, o VEV necessita apenas de ter uma capacidade de 110 kW;
- › **Inversores com comutação pela carga**: em motores síncronos acima de 750 kW é utilizado o VEV com inversor comutado pela carga. Esta configuração permite simplificar consideravelmente o andar de saída do VEV, pois a força contra-eletromotriz do motor síncrono é utilizada para comutar naturalmente os interruptores eletrónicos (tiristores) do inversor. Para motores síncronos de pequena e média potência é possível utilizar VEVs com PWM ou com inversor por fonte de corrente;
- › **Cicloconverters**: em aplicações de grande potência (> 750 kW) e baixa gama de velocidades é recomendável o uso de cicloconverters. Neste tipo de VEVs os 50 Hz da rede são convertidos diretamente numa frequência variável (tipicamente 0 – 25 Hz), através da comutação sequencial da tensão trifásica por um grande número de interruptores eletrónicos (tiristores). O

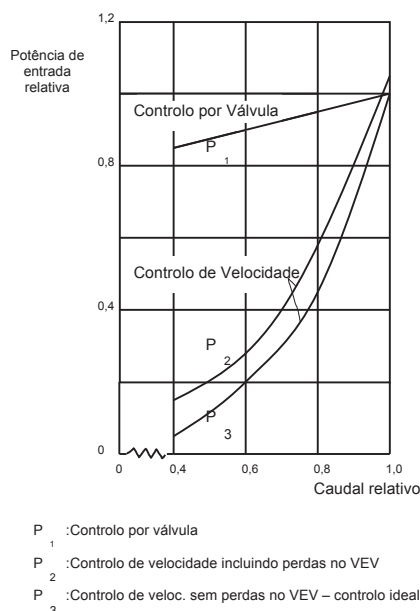
cicloconversor permite obter velocidades muito baixas (sem recurso a caixas de velocidade) com binários elevados, sendo recomendável a sua aplicação em fornos de cimento rotativos, moinhos de grandes dimensões e trens de laminagem.

Em resumo, o uso de um ou outro tipo de VEVs dos referidos atrás depende da aplicação do motor ou motores. Alguns sistemas são capazes de controlar vários motores, embora com uma curta gama de velocidades, e outros apenas um motor, mas com uma ampla gama de velocidades.

CAMPOS DE APLICAÇÃO

As aplicações com maior potencial para conservação de energia são as **bombas**, **ventiladores** e **compressores**. Estes tipos de cargas, associadas à movimentação de fluidos por ação centrífuga, representam cerca de 60% das aplicações da força motriz na indústria, sendo aquela percentagem ainda mais significativa nas indústrias de papel, refinarias e outras indústrias químicas. Acontece, geralmente, que as potências fixadas para os motores eléctricos de acionamento destes equipamentos são normalmente determinadas em relação aos caudais nominais. Todavia, em grande parte das aplicações correntes, esses caudais precisam de ser reguláveis ao longo dos processos de utilização e, para isso, há que recorrer ao emprego de dispositivos de estrangulamento – válvulas, *dampers* e acessórios similares, para obter a variação dos mesmos. Tais dispositivos cumprem normalmente as funções desejadas, mas em equivalente poupança de energia consumida (face à introdução simultânea de perdas consideráveis).

Por exemplo, na figura seguinte está representada a variação de potência eléctrica necessária para controlar o caudal de uma bomba. Usando uma válvula convencional, verifica-se que reduzindo o caudal, a potência absorvida pouco decresce. Se, pelo contrário, a redução do caudal é conseguida através da redução de velocidade da bomba, então a potência absorvida decresce fortemente.



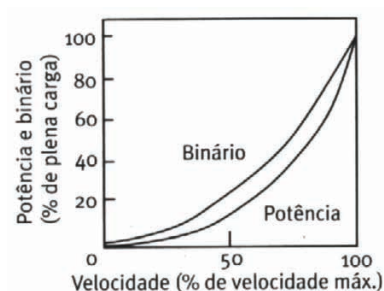
Portanto, o único método eficaz de poupança passa pela variação da velocidade da bomba, ou seja, do respetivo motor de acionamento, para se obterem as variações dos débitos desejados, com consumo proporcional da potência. É de salientar que, neste tipo de equipamento, tal como nos ventiladores, existe uma relação de tipo aproximadamente cúbico entre a velocidade de rotação e a potência mecânica absorvida, enquanto que o caudal é aproximadamente proporcional à velocidade de rotação. Donde se infere que, reduzindo, por exemplo, o caudal em 20%, o consumo de energia eléctrica pode ser reduzido a metade. Logo, este é um dos campos de aplicação onde os variadores de velocidade têm atualmente uma função relevante.

O potencial de poupança energética ao diminuir a velocidade na carga depende pois, das características da mesma. Basicamente, as cargas classificam-se em três tipos: binário variável, binário constante e potência constante.

› Binário variável

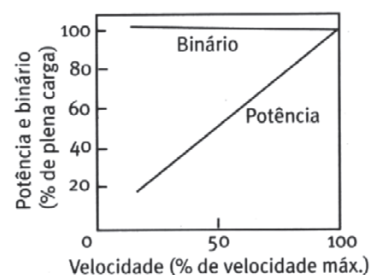
As leis fundamentais que gerem o funcionamento dos ventiladores e das bombas mostram que estas aplicações têm um grande potencial de economia de energia.

As leis associadas indicam que o binário (ou pressão) varia com o quadrado da velocidade e a potência com o cubo da velocidade, sendo o caudal proporcional à velocidade. Reduzindo a velocidade da carga, vê-se que, para mudanças relativamente pequenas de velocidade produz-se uma grande diminuição na potência absorvida.



› Binário constante

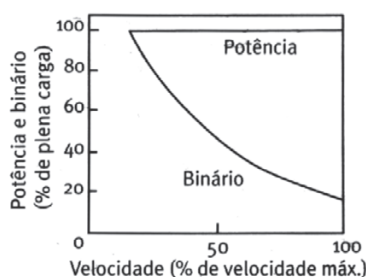
Para aplicações nas quais se produzem deslocamentos efetivos (compressores de ar, tapetes transportadores, agitadores e bobinadoras), o binário não varia com a velocidade e a potência é diretamente proporcional ao trabalho útil realizado. Embora as potenciais poupanças de energia que se consigam reduzindo a velocidade não sejam tão importantes como para as aplicações que se regem pela lei do quadrado do binário, merece a pena prestar atenção a este tipo de aplicações, já que, reduzindo a metade a velocidade de uma carga do binário constante pode reduzir-se igualmente a metade do consumo de energia.



› Potência constante

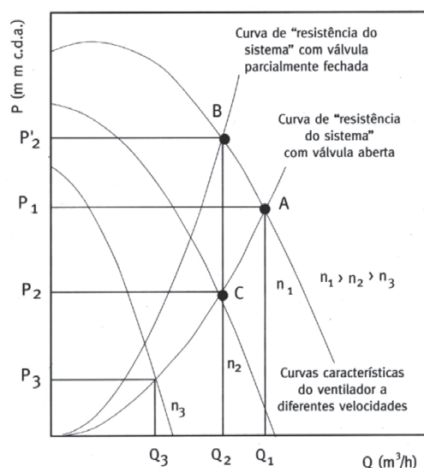
Este tipo de característica da carga dá-se onde a potência não varia com a velocidade e o bi-

nário é inversamente proporcional à velocidade. As aplicações deste tipo são, por exemplo, máquinas-ferramenta e bobinadoras.



Dos três tipos de carga mencionados, observa-se que as poupanças mais importantes obtêm-se nas cargas de binário quadrático, onde uma pequena diminuição da velocidade supõe uma grande diminuição na potência absorvida pelo motor (reduzindo, por exemplo, a velocidade em 20%, o consumo de energia elétrica pode ser reduzido a metade).

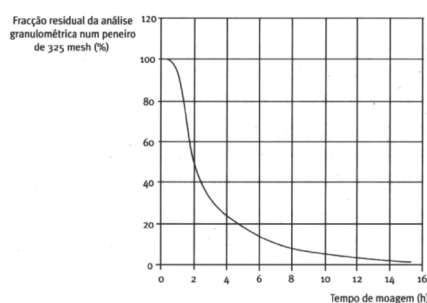
A figura que se segue, representa dois processos de controlo de caudal num ventilador. O ponto de funcionamento do sistema deriva da intersecção da curva característica do ventilador com as "resistências do sistema". Se se pretende diminuir o caudal Q (e aumentar a pressão p), correspondente ao ponto de funcionamento A, fechando parcialmente uma válvula intercalada no siste-



ma, isso traduz-se num aumento da resistência deste, isto é, a aumentar o valor de k na equação $p=kQ^2$ ou a deslocar a parábola no sentido inverso ao dos ponteiros do relógio, que faz deslocar o ponto de funcionamento para B.

Alternativamente, reduzindo a velocidade do motor/ventilador, o ponto de funcionamento desloca-se para C, produzindo uma redução de caudal semelhante ao obtido no ponto B. Contudo, no primeiro caso, há um desperdício de potência relativamente à redução de velocidade, proporcional ao caudal e à diferença de pressão entre os pontos B e C (atendendo a que potência absorvida = pressão x caudal volumétrico).

Os VEVs também podem ser utilizados para economizar energia em aplicações específicas de processo, para além das correspondentes a serviços auxiliares (ventilação, condicionamento de ar, bombagem, entre outros). Um exemplo de uma destas aplicações, no âmbito das tecnologias de processo, consiste na utilização de variadores de frequência em motores de moinhos descontinuos de preparação da pasta, na indústria cerâmica, que permitem o ajuste da velocidade de rotação dos moinhos em função da curva de moagem da matéria-prima (isto é, por forma a manter as condições óptimas de moagem ou a optimização da relação *granulometrias óptimas = função* (velocidade de rotação)).



Para estabelecer as condições óptimas de operação, é necessário determinar as melhores velocidades do moinho para cada uma das zonas da curva de cominuição do

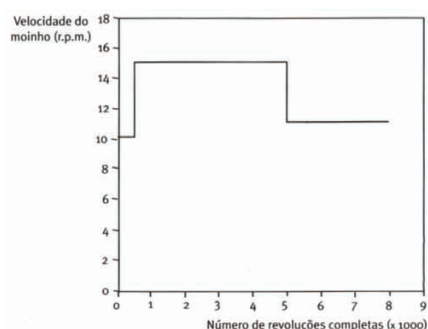
material, para as quais a ação de moagem do material moente é máxima, aumentando deste modo a eficácia do processo. É intuitivamente claro que, mantendo uma velocidade constante no moinho durante todo o ciclo de moagem (o que normalmente acontece nos sistemas convencionais de moinhos não equipados com conversores de frequência), não é possível ajustar a ação de moagem às dimensões que o material assume com o decorrer da operação.

Uma ação adequada na regulação da velocidade de um moinho, com base num critério de desenvolvimento da ação de moagem, na qual predomine numa primeira fase o esmagamento ou a quebra do material a moer de dimensões maiores pela queda do material moente (normalmente, estes moinhos são do tipo de bolas, sendo a sílica ou a "alubite" os tipos de materiais mais usuais destas), e numa segunda e última fase predomine o atrito (pelo recíproco rolamento das bolas umas sobre as outras) de modo a homogeneizar as dimensões finais, tornará possível aumentar o rendimento do processo com economias de energia e do tempo de moagem.

Estes decréscimos nos consumos energéticos (elétricos) e no tempo de moagem decorrentes da aplicação de variadores eletrónicos de velocidade têm sido comprovados por alguns resultados experimentais. Em testes de moagem realizados com velocidades variáveis num determinado moinho, por exemplo, os melhores resultados foram obtidos com uma curva, na qual, depois de uma fase inicial de 10 r.p.m. para as primeiras 500 revoluções do moinho, a moagem foi conduzida a 15 r.p.m. durante 5.000 revoluções e, posteriormente, a 11 r.p.m. até à obtenção das dimensões adequadas.

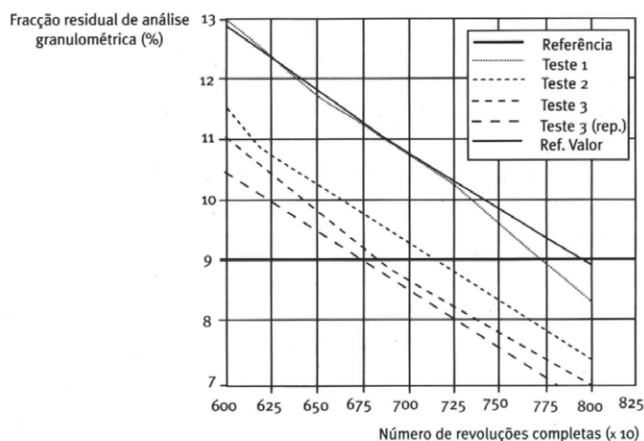
Este procedimento encontra-se visualizado na figura seguinte, para o caso da moagem de material para obtenção de uma pasta utilizada no fabrico de pavimento em grés branco por monocozadura (Características principais do moinho: 38.000 l de capacidade; Material moente – sílica; Revestimento interno – borraça; Potência do motor – 110 kW; N.º total

de revoluções – 8.000; Velocidade usual (antes da aplicação do VEV) – 13,8 r.p.m.; Tempo de moagem – 9,67 h (9h40 min); Fracção residual do peneiro a 45 µm (ASTM325 mesh) – 9%; Produção – 26.500 kg de pasta com um teor médio de água de 32%).



Os dados da figura anterior ilustram o comportamento da fracção residual num peneiro de 325 mesh da pasta produzida no moinho, sob diferentes condições de velo-

cidade (após a instalação de um VEV) na sua operação, em função do número de revoluções completas por forma a serem avaliadas as melhores condições operatórias.



Constata-se que o teste que conduziu aos melhores resultados está representado pela curva 3, em que a fracção residual de referência, obtida por peneiração, foi atingida com 6.750 revoluções em vez das 8.000 iniciais (quando o moinho ainda não tinha aplicado o VEV). Na figura seguinte, está representado o comportamento da fracção residual obtida por peneiração em função da energia consumida pelo moinho.

PUB

POTÊNCIA SEM LIMITES

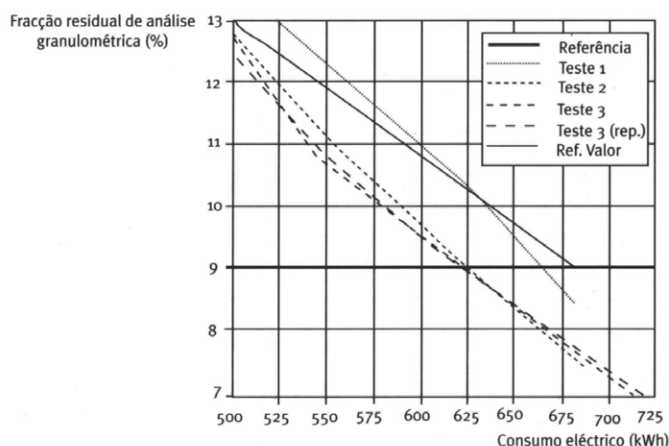
MOTORES CATERPILLAR E Mak DE ÚLTIMA GERAÇÃO



CAT **MAK**

A solução mais fiável e avançada para cada necessidade específica. Com uma ampla rede de cobertura e assistência a nível nacional.

CATERPILLAR, A SUA MELHOR ESCOLHA.



A correspondência entre este último gráfico e o precedente é agora clara. Atingindo a fração residual de peneiração com menos revoluções, significa melhor utilização da energia consumida, e daí as economias de energia resultantes.

Estes testes revelaram que as melhores condições de moagem originaram uma redução de 13,6% no tempo de moagem (equivalente a 1h 20min) e uma redução de 8,9% no consumo de energia (equivalente a 60 kWh) em comparação com as condições de referência. Contudo, de acordo com resultados já verificados noutros países (sobretudo em Espanha e Itália, os dois principais produtores da União Europeia de pavimento e revestimento cerâmicos) são possíveis reduções superiores, quer do consumo de energia elétrica, quer do tempo de moagem, sendo típicos valores da ordem de 10 a 25%, dependendo principalmente das matérias-primas a moer e da relação entre a carga de material e a carga de moente, além de que é possível melhorar a qualidade do produto final, tudo isto com a vantagem de uma maior flexibilidade no processamento de diferentes materiais.

Existem basicamente três vantagens fundamentais que podem ser obtidas com a aplicação de um variador eletrónico de velocidade a um moinho de bolas descontínuo de preparação de pasta:

- › Arranque gradual do moinho que torna possível a eliminação de picos de corrente;
- › O motor pode ser conectado a uma trans-

missão via junta rígida em vez de junta viscosa, permitindo durante todo o ciclo de moagem a redução de fricção;

- › A ação de moagem pode ser ajustada adequando-se às dimensões que o material assume com o avanço do processo, obtendo-se uma optimização do ciclo de moagem.

Na prática, os benefícios obtidos resultam essencialmente em vantagens adicionais no que respeita a ganhos energéticos e de operação do equipamento entre as quais se destacam:

- › Menor consumo de energia elétrica;
- › Menor tempo de moagem;
- › Aumento da produtividade;
- › Possibilidade de utilização da energia elétrica durante períodos de tempo economicamente favoráveis e/ou maior disponibilidade daquela forma de energia para outras utilizações;
- › Melhoria na correção do fator de potência do motor do moinho;
- › Maior simplicidade do equipamento e da maquinaria;
- › Menor desgaste das partes de transmissão mecânica.

O custo médio destes sistemas de controlo de velocidade de moagem em moinhos de bolas depende da potência instalada e da capacidade do moinho, sendo aqueles normalmente viáveis apenas para moinhos de capacidade superior a 35.000 litros. De salientar que esta medida também pode implicar uma redução dos custos de funcionamento, já que em alguns casos, a redução

do tempo de moagem pode tornar possível o uso de material moente de baixa densidade (sílica em vez de "alubite"), mantendo-se a produtividade da operação de moagem a níveis aceitáveis e com economias consideráveis nos custos desses materiais, o que, por outro lado, aumenta a competitividade do produto. Noutros casos, uma menor granulometria do material também é possível, o que pode conduzir a melhorias na qualidade do produto final, como já foi referido, sem que isso implique aumentos do tempo de moagem, do consumo energético do moinho e dos custos de produção.

É de salientar que, as aplicações de VEVs não se esgotam nos exemplos a que se fez referência, quer em termos de equipamentos, quer em termos de tipos de indústrias.

PRINCIPAIS BENEFÍCIOS

As vantagens proporcionadas pela aplicação dos VEVs a motores elétricos na indústria, em geral, podem resumir-se a:

- › economias de energia até 50% ou mais, com um valor médio de 20 – 30%;
- › redução das pontas de potência, proporcionada pelos arranques suaves que permitem efetuar;
- › prolongamento da duração do motor;
- › melhoria do fator de potência, com reflexo na instalação e consequente redução da energia reativa e, eventualmente, da correspondente parcela da factura energética;
- › aumento da produtividade;
- › capacidade de "by-pass" perante falhas do variador;
- › amplas gamas de velocidade, binário e potência;
- › melhoria do processo de controlo e portanto da qualidade do produto;
- › diminuição da quantidade das partes mecânicas – os VEVs possuem normalmente diversos tipos de proteções para o motor (contra curto-circuitos, sobreintensidades, falta de fase, entre outros) que deixam assim de ser adquiridas isoladamente, e oferecem uma enorme flexibilidade de colocação (contrariamente aos processos convencionais de regulação de velocidade).

de, que implicam a interposição do variador de velocidade entre o motor e a carga) e são mais compactos, o que faz com que a sua aplicação no melhoramento do rendimento de processos já existentes não ofereça problemas de implantação – podem ser facilmente integrados em sistemas automáticos de gestão de produção, porquanto vêm preparados com diversos tipos de entradas (0-1 V, 0-5 V, 4-20 mA) que permitem o seu controlo por computador externo responsável pela condução do processo industrial.

Não obstante todas as vantagens apontadas, a aplicação de VEVs também pode dar lugar a alguns efeitos indesejáveis, nomeadamente poluição harmónica que tende a aumentar as perdas nos motores. No caso de motores alimentados a partir de VEVs, os regimes de baixa velocidade são caracterizados por quebra na ventilação, a par da circulação de correntes harmónicas, típicas do funciona-

mento dos VEVs. Esta situação provoca uma elevação da temperatura de funcionamento dos motores, quando o regime de velocidade baixa se prolonga. Esta produção indesejável de harmónicos (tanto para o motor como para a rede) pode, pois, refletir-se num baixo factor de potência e em interferências eletromagnéticas. A mitigação destes efeitos pode implicar investimentos adicionais que devem ser considerados na avaliação económica do investimento.

Uma avaliação económica do investimento em VEVs requer normalmente os seguintes passos:

- › Determinação do diagrama de carga do equipamento em cujo motor elétrico se pretende aplicar o VEV. Este passo obriga a uma mediação do respectivo caudal ao longo do tempo;
- › Com base na potência instalada e no diagrama de carga é possível determinar, para cada regime de carga, qual a

potência economizada, relativamente ao dispositivo regulador de caudal atual. A quantidade de energia elétrica economizada por ano resulta da soma da energia poupada (potência poupada vezes o número de horas de funcionamento) em cada regime de carga. Se o regime de carga se reduz a um pequeno número de caudais (4 ou menos) poderá ser vantajoso considerar um motor com várias velocidades;

- › Determinação do custo total do VEV, incluindo instalação e eventuais medidas requeridas para supressão de harmónicos e interferências. Em aplicações novas pode descontar-se o custo do arrancador e das proteções do motor implementados pelo VEV;
- › O período de recuperação do investimento é calculado a partir da divisão do valor do investimento obtido do 3.º passo pelo valor da economia de energia estimada no 2.º passo.

CASO PRÁTICO

O método de cálculo das economias de energia difere de aplicação para aplicação, já que, e tal como foi referido anteriormente, o potencial de economia de energia depende das características da carga ao reduzir-lhe a velocidade, sendo as cargas de binário variável as que apresentam maiores economias, como por exemplo, as bombas e os ventiladores.

As leis fundamentais que gerem o funcionamento deste tipo de cargas (bombas e ventiladores) indicam que o binário (ou pressão) varia com o

quadrado da velocidade e a potência com o cubo da velocidade, sendo o caudal proporcional à velocidade. Reduzindo a velocidade da carga, vê-se que, para mudanças relativamente pequenas de velocidade produz-se uma grande diminuição na potência absorvida.

Assim, para calcular a economia de energia, teremos de calcular o consumo atual e estimar o consumo futuro, para o mesmo período temporal. A economia de energia é dada pela diferença entre o consumo atual e o consumo futuro.

› Atual

Potência do motor do ventilador	30	kW
Potência média tomada	18.41	kW
Funcionamento anual	4496	horas/ano
Preço do kwh	0.0770	€/kWh
Consumo anual	82 751.83	kWh/ano
Custo anual	6 371.54	€/ano

› Futuro

%f	h/ano	E _h (kWh/ano)
0.0%	0.0	0.0
10.0%	0.0	0.0
20.0%	0.0	0.0
30.0%	0.0	0.0
40.0%	449.6	1 438.7
50.0%	899.2	5 187.7
60.0%	1213.9	11 237.4
70.0%	809.3	11 103.3
80.0%	629.4	12 085.2
90.0%	494.6	12 724.7
100.0%	0.0	0.0
TOTAL	4 496.0	53 777.15

Consumo energético com VEV	53 777.15	kWh / ano
Custo energético com VEV	4 140.61	€/ ano
Economia Anual em kWh	28 974.68	kWh / ano
Economia Anual em Euros	2 230.93	€/ ano
Economia Anual em %	35.01%	

TABELA RESUMO		Sem VEV	Com VEV
CONSUMO DE ENERGIA (KWH/ANO)		82 751.83	53 777.15
CUSTO DE ENERGIA (€/ANO)		6 371.54	4 140.61
ECONOMIA ANUAL (€/ANO)		2 230.93	
INVESTIMENTO (€)	VEV	3 905.00	
	Total (VEV + Inst.)	5 405.00	
P.R.I (ANOS)	VEV	1.75	
	Total	2.42	