



Tecnologia Sensorless Vector:  
O que separa essa tecnologia  
das outras?

# Tecnologia Sensorless Vector

## O que separa essa tecnologia das outras?

### As tecnologias e filosofias de controle utilizadas nos inversores de frequência atuais

#### I. Introdução

Os atuais usuários de inversores estão utilizando os Inversores de Frequência Variável em aplicações que requerem um melhor desempenho de torque e velocidade. A fim de manter a competitividade e melhorar a qualidade do produto, os usuários criaram uma ampla variedade de exigências para as aplicações. A tecnologia dos inversores tem que acompanhar essas expectativas cada vez mais exigentes. Além disso, a atual atmosfera de negócio produz uma necessidade sempre presente de reduzir os custos totais do ciclo de vida dos equipamentos. A eliminação da tendência do “desperdício” (ou seja, aplicar mais tecnologia do que uma aplicação requer) e a combinação adequada do tamanho do inversor ou da tensão nominal com a necessidade da aplicação são duas maneiras bastante eficientes de gerenciar esses custos. Mas, de que forma um usuário de inversor identifica a tecnologia adequada, a fim de selecionar o inversor apropriado para a aplicação?

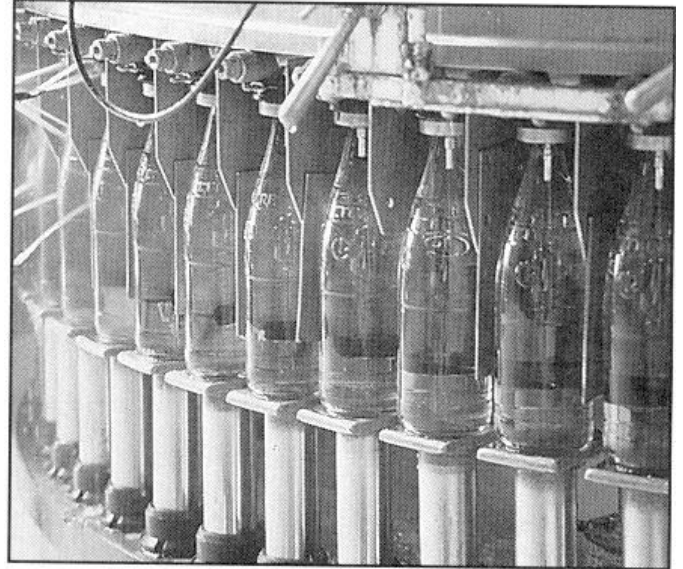


Figura 1

A Rockwell Automation é líder no negócio de automação de fábricas, aproximadamente, há um século. Além disso, é líder em inversores de frequência desde a introdução do produto. Nós oferecemos uma ampla variedade de tecnologia, incluindo produtos Volts/Hertz para condições com objetivos gerais, *Flux Vector* para controle de torque, Controle Orientado de Campo (tecnologia Force™) para aplicações com regulação de velocidade, torque com largura de banda larga /resposta rápida e Controle *Sensorless Vector* para aplicações reguladas por velocidade com desempenho mais elevado. A tecnologia que gera mais confusão para os usuários é o controle *sensorless vector*, utilizado para produzir torque maior e em aplicações reguladas por velocidade com desempenho mais elevado. Este folheto tentará esclarecer essa confusão, definindo a terminologia, comparando várias tecnologias e separando a realidade da ficção no que se refere à desempenho.

#### II. Definição de Vetor

“Vetor”, em geral, tem sido um dos termos mais utilizados de forma incorreta no setor industrial. Tem sido usado para descrever e posicionar incorretamente produtos que, na realidade, utilizam tecnologias anteriores. Mas, ainda há outros aspectos sobre o enigma do termo vetor, além da questão da tecnologia. O critério mais recente para se definir o valor de um produto com controle vetorial é o desempenho que o mesmo oferece para processar melhorias, sendo que nem todos os inversores vetoriais operam da mesma forma. Para iniciar o processo de esclarecimento, devemos definir primeiramente a terminologia, começando com a própria palavra “vetor”. Conforme mostrado na figura 2, o vetor combina o tamanho e a direção das forças para quantificar o resultado. Todas as tecnologias de inversores com controle vetorial possuem os seguintes princípios comuns e básicos:

1. A corrente em um motor CA pode ser separada em dois componentes distintos:  
A  $I_d$  ou a corrente produtora de FLUXO e  
B  $I_q$  ou a corrente produtora de TORQUE
2. A corrente total é a soma do vetor desses dois componentes da corrente.
3. O torque produzido no motor baseia-se no “produto vetorial” dos vetores.
4. O nível para o qual esses componentes são identificados e controlados define o nível de desempenho.

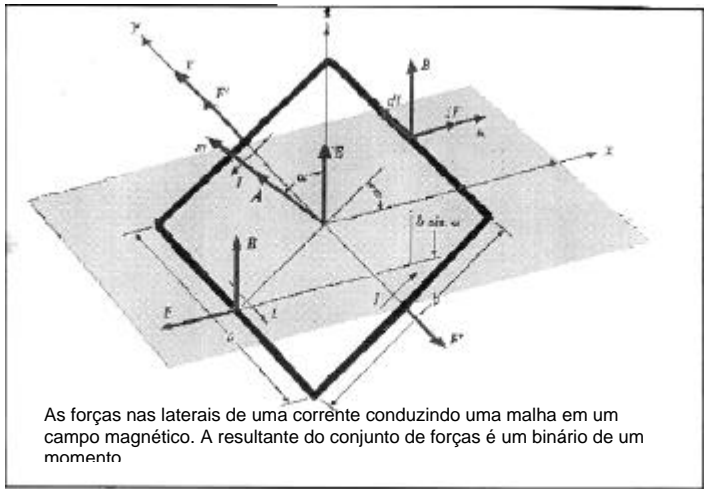


Figura 2

Tecnologias diferentes implantam diferentes níveis de controle sobre um ou mais desses componentes (fluxo produzindo corrente, torque produzindo corrente e o ângulo vetorial entre eles) para produzir níveis variados de desempenho com vetor ou sem vetor. O desempenho mais elevado se manifestará em torque de partida aumentado, torque de velocidade baixo aumentado, capacidade de carga de choque aumentado, regulação de velocidade mais ajustado, regulação de torque e outros parâmetros mensuráveis.

### III. Capacidades Tecnológicas

Os inversores **Volts/Hertz**, utilizados freqüentemente em aplicações de controle de freqüência de malha aberta simples, não controlam nenhum dos componentes exclusivos da tecnologia vetorial. Um inversor Volts/Hertz regula a freqüência de motor aplicada, produzindo, portanto, a velocidade desejada. A maior parte dos inversores Volts/Hertz não separam a corrente de fluxo da corrente de torque, operando, ao contrário, somente com a corrente total do motor. Esses inversores dependem de esquemas simples que limitam a corrente e geralmente utilizam impulso de tensão aumentado na tentativa de produzir torque de partida adicional. Enquanto esse método de impulso de tensão pode produzir torque de partida inicial, o mesmo requer mais corrente de forma significativa e pode produzir com freqüência situações de “limite de corrente” que podem diminuir o desempenho. Enquanto a tecnologia



Figura 3

Volts/Hertz pode ser desenvolvida para “parecer-se” com a vetorial, a comparação da operação mostra um desempenho “não-vetorial” em quase todas as áreas, incluindo a partida, aceleração, operação em velocidade baixa e controle de torque.

Os inversores **Flux Vector** utilizam a saída do regulador de corrente como uma referência de freqüência. Isso pode melhorar a resposta da dinâmica do inversor e, em alguns casos, pode até mesmo controlar o torque e a velocidade do motor.

Os inversores de **Controle Orientado em Campo** conseguem fazer tanto a regulação do torque quanto da velocidade porque controlam tanto os componentes da corrente quanto o ângulo (soma do vetor) entre eles. Esses inversores possuem características de torque excelentes somadas à regulação de velocidade mais ajustadas, amplitude de velocidade maior e largura de banda mais elevada (resposta). Um controlador adaptável separado fornece controle de fluxo e torque separado, permitindo regulação contínua da velocidade e do torque do motor.

A tecnologia *Sensorless Vector* oferece um nível intermediário de desempenho, maior do que a tecnologia Volts/Hertz, mas menor do que o controle orientado de campo verdadeiro. O controle vetorial de Malha Aberta ou *Sensorless* pode produzir uma excelente partida, capacidade de torque numa mudança brusca de carga e aceleração,

uma grande faixa de velocidade de trabalho em torque constante (incluindo acima da velocidade nominal) e um bom desempenho em velocidades baixas. Entretanto, não são inversores de controle de torque e, portanto, não podem **regular** a quantidade de torque produzida no eixo do motor. Eles também não competem com o controle orientado de campo nas áreas de resposta dinâmica, alta regulação da velocidade ou faixa de trabalho. O que devem fazer é fornecer o torque mais elevado possível por ampère no motor. Trabalhando com fluxo pleno no estator e monitoração constante para eliminar uma condição de “sobrefluxo”, a tecnologia *Sensorless Vector* tem condições de fornecer torque máximo (semelhante ao máximo), quando necessário. Isso inclui todas as áreas críticas de operação do motor: partida, aceleração e desaceleração, carga de choque, velocidade baixa e durante o “enfraquecimento do campo” ou em operação acima da velocidade nominal.

	Volts/Hertz	Sensorless Vector	Controle Orientado de Campo
Controle de Velocidade	Controle de frequência com compensação de escorregamento	Controle de frequência com compensação de escorregamento ou realimentação por gerador de pulso	Controle de velocidade ou realimentação por gerador de pulso
Regulação da velocidade	1%	Compensação de escorregamento 0,5% Com realimentação 0,1%	Malha aberta 0,5% Malha fechada 0,001%
Regulação do torque	NA	NA	2%
Amplitude da velocidade	40:1	120:1	Malha aberta 120:1 Malha fechada > 1000:1
Torque de partida	150%	250%	Inversor/Motor Mínimo 150% Máximo 400%
Torque de aceleração rápida	150%	150%	Inversor/Motor Mínimo 150% Máximo 400%
Torque de Operação de Pico	250%	260%	Inversor/Motor Mínimo 150% Máximo 400%
Resposta dinâmica	N/A	6 a 12 radianos	Malha aberta 30 rad. Malha fechada 100 rad.

**Figura 4**

#### IV. Filosofia de Controle

O hardware do inversor é somente uma parte da equação. Há muitos fatores, além do hardware, que afetam o desempenho e o mais básico de todos é a filosofia da abordagem de controle. Testes demonstraram que o desempenho *sensorless vector* é imensamente superior às outras abordagens de controle. Uma verificação mais detalhada destacará as diferenças.

Muitas abordagens de controle contam somente com universidades ou organizações técnicas para o fornecimento da tecnologia. Frequentemente, considera-se que o estágio mais avançado da tecnologia seja definido por essas organizações e que soluções sem a apresentação de uma liderança fornecem um desempenho inferior. Aquelas pessoas familiarizadas com o chão-de-fábrica, entretanto, entendem que, ao mesmo tempo que a visão acadêmica da tecnologia frequentemente aponta o caminho para o futuro, a aplicação prática da mesma segue, com frequência, uma programação diferente. Uma abordagem que ignora a tecnologia estabelecida, podendo, realmente, complicar a tarefa do usuário através da tendência da abordagem de “um inversor que seja adequado a todas as situações”.

A opinião e a prática do “complexo é melhor” é um dos principais fatores que levam a um desempenho reduzido. A maior parte dessas abordagens tentam utilizar um esquema relativamente complicado de várias malhas de corrente, cada uma com vários ganhos. Os inversores inerentemente regulados por corrente contam com um controle de velocidade que posiciona a malha de velocidade próxima da malha de corrente. Quando um erro de velocidade é percebido, o inversor reage com um comando de corrente que deve produzir o resultado desejado. Já que há duas malhas, existem dois conjuntos de ganho que dificultam a estabilidade. Requer um cálculo de escorregamento preciso e um “modelo” detalhado do motor, incluindo os parâmetros que têm pouco impacto real sobre o desempenho. Esses valores, como por exemplo, a constante do tempo do motor, pode ser muito mais difícil de identificar. Outros valores podem ser alterados com o tempo, diminuindo o desempenho. Esse método também requer um identificador de fluxo de alto desempenho que pode conter 2 ou 3 integradores, cada um com sua própria constante de tempo. Isso requer um tempo de processamento maior e é mais difícil de evitar o desvio. Torna-se mais difícil obter valores precisos para operação em baixa velocidade e acrescenta complexidade às rotinas de ajuste. A fim de superar os atrasos de tempo causados por vários integradores e malhas, são necessários dados e parâmetros adicionais do motor, além de mais ajuste no inversor. Esses ajustes, que devem significar aumento do desempenho, frequentemente, resultam em um

efeito contrário, sacrificando a estabilidade básica. Os ajustes adicionais e parâmetros de motor cada vez mais complexos também necessitam de uma “rotina de auto-ajuste” mais complexa, que não oferece, com frequência, o melhor desempenho. Quando é necessário realizar um ajuste manual, torna-se difícil, geralmente, de se compreender quais unidades ou valores devem ser suprimidos e como acessá-los. Isso pode significar que um inversor somente funcionará bem com um motor específico que seja fornecido pelo vendedor do inversor, de forma que seus parâmetros sejam bem conhecidos. Enquanto não houver nada inerentemente errado com a abordagem do motor combinado, as opções de motor do usuário realmente tornam-se limitadas.

Uma abordagem mais simples e efetiva é vista no 1336 PLUS com tecnologia Sensorless Vector. Através da implementação precisa de duas tarefas básicas, da manutenção do fluxo do motor e da identificação dos parâmetros do motor, que possuem o mais alto impacto, o 1336 PLUS cria flexibilidade, fácil ajuste e desempenho Sensorless Vector. Além disso, realiza esse desempenho sem a necessidade de um motor especial contendo parâmetros bem definidos.

Os sensores de corrente em malha fechada e os circuitos de controle oferecem informações precisas. Com os algoritmos de software para correção de offset analógico, o cálculo dos ângulos  $V_q$  e  $V_d$  mais os cálculos de tensão vetorial proporcionam uma implementação vetorial precisa. Somente dois parâmetros do motor (aqueles que possuem o mais alto impacto de torque) devem ser identificados para produzir torque máximo, resistência do estator ( $R_s$ ) e corrente nominal de fluxo ( $I_d$ ), um modelo muito mais simples do motor. Os valores de fábrica, escolhidos para o modelo do motor, são muito precisos, permitindo que vários usuários o operem sem precisar de ajuste. Se for necessária uma etapa adicional no desempenho, uma simples programação dos dados do motor no inversor pode ser suficiente. Apenas aplicações mais severas requerem ajustes e os valores necessários são facilmente identificados através de uma rotina simples de três etapas. Para facilitar ainda mais para o usuário, a  $R_s$  é expressa em Volts (um termo familiar) como uma queda de IR para o motor.



Figura 5

A potência real no Sensorless Vector é adquirida através do controle de fluxo do motor em um valor igual ou próximo ao valor nominal do motor. Os motores com projetos eficientes operam muito próximos da saturação com fluxo nominal para obter um melhor desempenho. Fornecer mais “corrente de fluxo” ( $I_d$ ) ao motor, não produz torque adicional, somente satura o motor, gastando energia. Fornecer menos  $I_d$ , irá requerer mais corrente total para produzir o mesmo torque, novamente gastando energia. A operação em corrente nominal proporciona o valor mais alto de torque/corrente e otimiza o desempenho do motor.

Um limitador de corrente de alto desempenho realiza o controle de corrente com ganhos ajustáveis, proporcionando uma performance dinâmica alta.

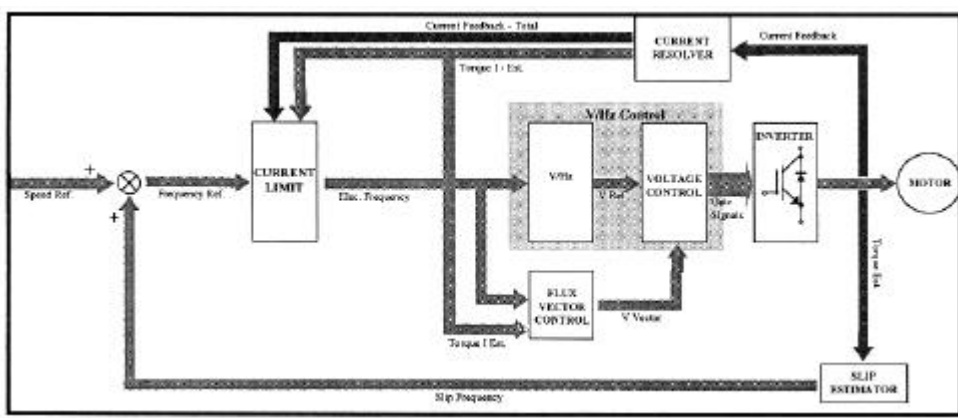


Figura 6

Isso cria um simples controle de tensão para o motor. O sistema de regulação mais rígido responde mais rapidamente às alterações de velocidade. A vantagem de um limitador de corrente (um regulador de corrente que irá regular apenas quando a corrente estiver acima do limite) é que este afeta a dinâmica do sistema somente durante as condições de excesso de corrente. O segredo para o excepcional desempenho neste esquema é antecipar e controlar precisamente a transição de sem regulação para com regulação.

Utilizando o algoritmo estimador de escorregamento e os parâmetros do motor, o 1336 PLUS proporciona uma excelente compensação de escorregamento (com ganho ou constante de tempo ajustável) para realizar o

escorregamento adequado no motor. Isso representa um pequeno espaço de velocidade sob cargas de choque e uma recuperação mais rápida sob condições de alto ganho sem sacrificar a estabilidade. Poucos valores precisam ser

calculados ou testados, e se o ajuste manual for necessário, o procedimento é simples e rápido. Este esquema opera bem com qualquer motor, pois não necessita de dados especiais do motor para um ótimo desempenho.

## V. Realidades das Aplicações

A menos que essas tecnologias convertam em benefício do usuário, no entanto, nenhum ganho é obtido. O inversor 1336 PLUS com tecnologia Sensorless Vector oferece o desempenho necessário em todas as áreas críticas requeridas para aplicações severas. O torque de partida de até 260% do torque nominal do motor pode ser gerado para torque de partida de altas cargas e, na maioria dos casos, não será necessário sobredimensionar o inversor. A observação das curvas velocidade/torque (veja a Figura 8) apresenta a excepcional capacidade de produção do torque, ao partir uma alta carga com inércia.

A capacidade de produção do torque dos algoritmos do Sensorless Vector torna a resposta às variações de carga mais rápida e precisa. Isso resulta em um desempenho superior na área de regulação de velocidade. A capacidade de torque combinada com uma malha de velocidade ajustável permite uma rápida recuperação da velocidade devido às alterações de carga. Enquanto a regulação de velocidade é normalmente definida sob um regime permanente de carga, a reação do inversor às alterações de carga em degrau apresenta uma figura precisa do desempenho de torque.

A Figura 9 apresenta o ajuste da malha de velocidade do 1336 PLUS. Esse conjunto inversor/motor está operando à velocidade plena quando um degrau de carga de 100% é aplicado dinamicamente. A resposta do inversor relativa ao ajuste é indicada - 1,3 segundos de recuperação para a velocidade de regime com ajuste de fábrica e 64 ms. de retorno com o ajuste do usuário. A corrente aumenta proporcionalmente ao degrau de carga, mas permanece estável e sob controle.

Além disso, o 1336 PLUS possui um número de recursos que permitem alto torque de aceleração e aceleração muito rápida sob certas condições. Muitos inversores volts/hertz podem ser capazes de produzir um torque de partida mais alto, mas esse torque pode cair rapidamente para níveis baixos, uma vez que o motor começa a acelerar para a velocidade plena, limitando o desempenho da aceleração. A habilidade que os algoritmos do 1336 PLUS Sensorless Vector possuem de manter a produção de alto torque mesmo sob aceleração, é o diferencial dos produtos concorrentes. Com relação à Figura 8, pode-se observar que o torque de 200% pode ser mantido até a velocidade nominal, oferecendo aceleração suave na taxa máxima. A Figura 10 apresenta um outro recurso dos algoritmos, conhecido como Limite de Corrente Adaptativo. O limitador de corrente de alto desempenho do inversor garante que o limite de corrente não interfira na aceleração de uma carga de alta inércia. Se, no entanto, a carga possuir uma baixa inércia, esse limite de corrente pode aumentar o tempo de aceleração desnecessariamente. Em casos onde a inércia é facilmente documentada em valores muito baixos, o Limite de Corrente Adaptativo pode ser desabilitado, introduzindo assim, um fator adicional na rampa de aceleração para fornecer uma resposta o mais rápido possível.

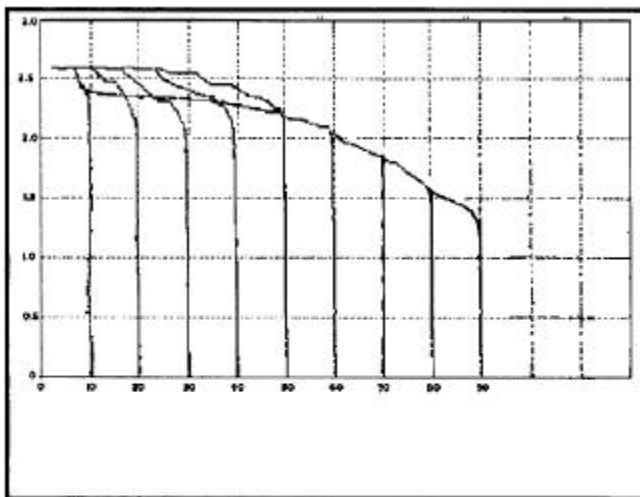


Figura 7

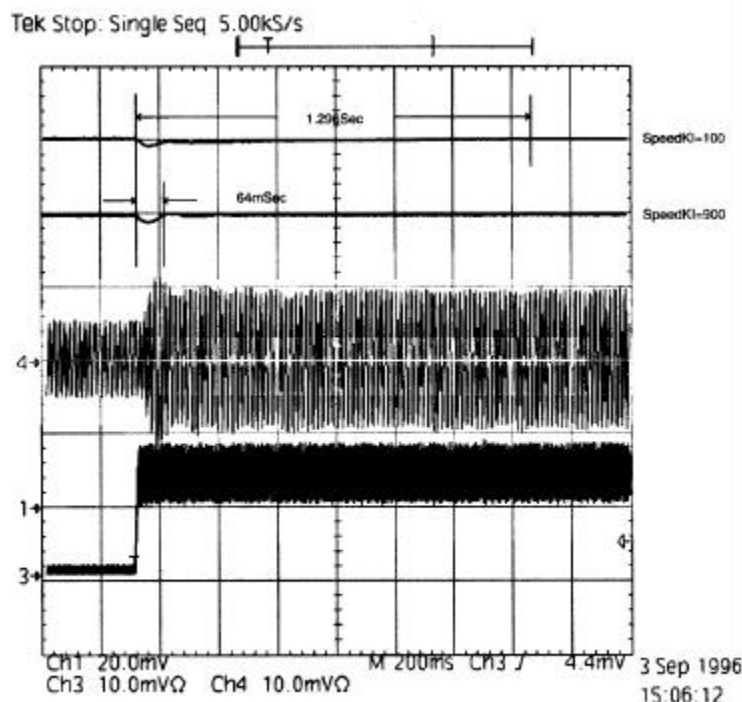


Figura 8

O gráfico na Figura 9 apresenta um motor de baixa inércia realizando um movimento de reversão à plena carga (1640 RPM para frente e 1640 RPM reverso) em 272ms.

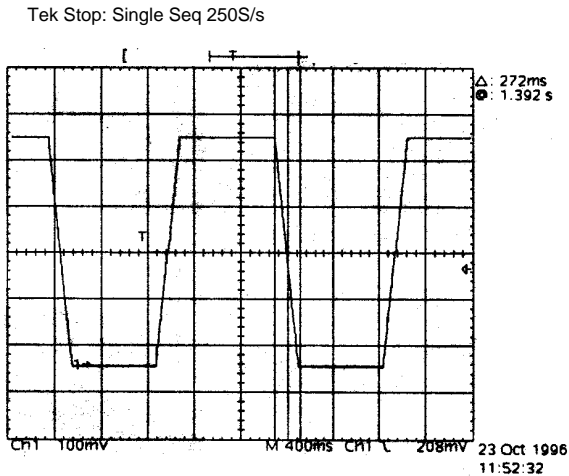


Figura 9

A capacidade de produzir níveis excepcionais de torque no motor, combinada com o controle de corrente suave, também proporciona uma ampla faixa de velocidade de operação. As tecnologias anteriores, que podiam produzir níveis mais altos de torque de partida, sempre perdiam a capacidade de produzir torque nominal em baixas velocidades. Conforme a velocidade do motor aumenta, os algoritmos Sensorless Vector possuem cada vez menos dados disponíveis de medição do motor, nos quais as decisões de controle são baseadas. O torque de baixa velocidade, por sua vez, é difícil de ser controlado. O inversor 1336 PLUS atingiu 120:1 em torque nominal. Isso significa que enquanto outras tecnologias podem não ser capazes de produzir um torque pleno abaixo de 38-40 RPM (faixa de velocidade de 40:1), o 1336 PLUS com tecnologia Sensorless Vector pode produzir um torque maior que o nominal em velocidades tão baixas quanto 12-15 RPM ou menos (faixa de velocidade de 120:1) e ainda permanecer dentro dos limites de desempenho para todas as outras especificações (tal como regulação de velocidade). A Figura 10 mostra como a faixa de velocidade aumenta, conforme o Sensorless Vector é ajustado.

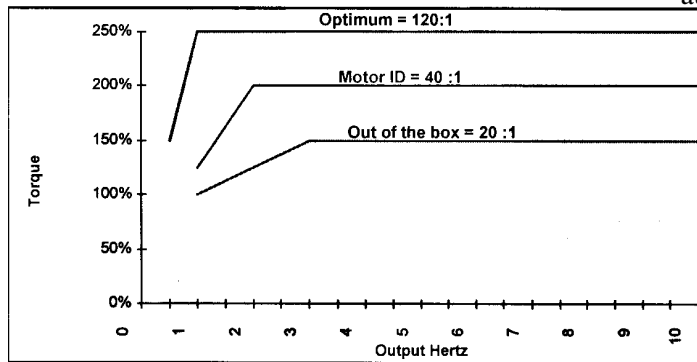


Figura 10

## VI. Exemplo de Aplicação

Uma recente situação de aplicação demonstra como o grande desempenho do inversor 1336 PLUS com controle Sensorless Vector está ajudando a tornar um fabricante líder na sua área de atuação. Uma expansão da planta para aumentar a produção precisava da inclusão de um novo misturador de massa de 150 HP. O padrão do fabricante do misturador era uma combinação de um acionador e um motor de duas velocidades. Porém, o usuário queria que os misturadores fossem equipados com inversores de frequência variável para evitar a manutenção do acionador e para ganhar a flexibilidade do

processo, oferecida pela velocidade variável. O fabricante recusou essa solicitação, por causa do seu padrão e por causa de experiências anteriores com inversores. Testes conduzidos três anos antes provaram que um inversor três vezes maior que o motor (nesse exemplo, um inversor de 500 HP) era necessário para produzir o torque requerido. Na presença das duas partes, foi realizado um teste com um inversor 1336 PLUS de 150 HP em um misturador com um motor de duas velocidades de 150 HP. Para provar a capacidade Sensorless Vector do 1336 PLUS, tudo que era possível foi feito ao inversor, incluindo uma carga pesada de massa, um baixo stress no recipiente da água (massa mais fina, porém mais viscosa) e um aumento de 120% da velocidade nominal na velocidade do misturador. O 1336 PLUS produziu o torque necessário do motor em todas as áreas de operação, utilizando o inversor adequado. Devido à habilidade de administrar a corrente de fluxo e otimizar a corrente disponível do inversor, não foi necessário o sobredimensionamento. Tanto os profissionais do fabricante do misturador quanto os profissionais do usuário concordaram que o desempenho do misturador era melhor sob o controle da velocidade variável, uma surpresa agradável para eles. O resultado final para o usuário foi o aumento da produtividade, da qualidade do produto e dos ganhos. Se a aplicação precisar misturar a massa, partir os transportadores com alta inércia ou operar outro equipamento, o torque correto para a carga pode ser produzido através do controle Sensorless Vector.

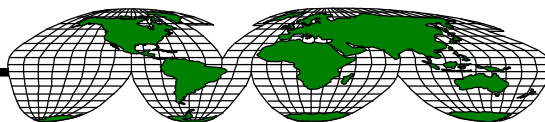
## VII. Expansões Futuras

Conforme o desenvolvimento do Sensorless Vector avança, o seu desempenho certamente continuará a melhorar. Faixas de velocidade de 300:1, maior torque em velocidade zero ou próxima, maior largura de faixa e outras melhorias irão oferecer benefícios ainda maiores para as aplicações severas. Combinada com os recursos necessários do inversor, essa tecnologia cria um pacote excepcional para o futuro. As aplicações que requerem posicionamento exato, rápidas aceleração e desaceleração e outros requisitos de "alto desempenho" serão cada vez beneficiadas com os produtos de uso geral. Os microprocessadores mais rápidos, a tecnologia DSP e os maiores algoritmos de resposta irão oferecer níveis ainda mais altos de capacidade do inversor. Os inversores Allen-Bradley continuarão em desenvolvimento para trazer a mais nova tecnologia em produtos reais, que oferecem aos clientes uma excepcional facilidade de uso, a oportunidade de maior flexibilidade, maior produtividade e custos mais baixos.



A Rockwell Automation ajuda seus clientes a obter um melhor retorno sobre o investimento, oferecendo-lhes marcas líderes de automação industrial e criando uma grande variedade de produtos fáceis de integrar. Esses produtos são suportados por recursos técnicos locais disponíveis em todo o mundo, por uma rede global de fornecedores de soluções para sistemas e pelos avançados recursos tecnológicos da Rockwell.

## Representação Mundial.



África do Sul • Alemanha • Arábia Saudita • Argentina • Austrália • Áustria • Barein • Bélgica • Bolívia • Brasil • Bulgária • Canadá • Catar • Chile • Chipre • Cingapura • Colômbia • Coreia do Sul • Costa Rica • Croácia • Dinamarca • Egito • El Salvador • Emirados Árabes Unidos • Equador • Eslováquia • Eslovênia • Espanha • Estados Unidos • Filipinas • Finlândia • França • Grécia • Guatemala • Holanda • Honduras • Hong Kong • Hungria • Ilha Maurício • Índia • Indonésia • Irlanda • Islândia • Israel • Itália • Iugoslávia • Jamaica • Japão • Jordânia • Kuwait • Líbano • Macau • Malásia • Malta • México • Marrocos • Nigéria • Noruega • Nova Zelândia • Omã • Panamá • Paquistão • Peru • Polônia • Porto Rico • Portugal • Quênia • Reino Unido • República Dominicana • República Popular da China • República Tcheca • Romênia • Rússia • Suécia • Suíça • Tailândia • Taiwan • Trindade • Tunísia • Uruguai • Venezuela • Vietnã • Zimbábwe

**Rockwell Automation, Sede Central:** 1201 South Second Street, Milwaukee, WI 53204, USA, Tel.: (1) 414 382-2000, Fax: (1) 414-382-4444

**Rockwell Automation, Sede Européia:** Avenue Hermann Debroux, 46, 1160 Bruxelas, Bélgica, Tel.: (32) 2 663 06 00, Fax: (32) 2 663 06 40

**Brasil: Rockwell Automation do Brasil Ltda.,** R. Comendador Souza, 194, São Paulo (05037-900), Brasil, Tel.: (55-11) 3874-8912, Fax: (55-11) 3874-8968

**Portugal: Rockwell Automation,** Taguspark, Edifício Inovação II, n 314 e 324, 2780 Oeiras, Portugal, Tel.: (351) 1 422 55 00, Fax: (351) 1 422 55 28