

## CONTROLADORES DE MOVIMENTO

*“A revolução industrial foi sem dúvida um marco inigualável na história moderna. A produção artesanal, dependente da habilidade individual deu lugar a produção em massa, reduzindo os custos de produção, elevando a qualidade e permitindo o acesso a bens de consumo e bens duráveis a uma parcela cada vez maior da população. A automação de máquinas e equipamentos é a força propulsora da indústria moderna. Este artigo visa ilustrar o funcionamento básico dos Controladores de Movimento e sua contribuição ao desenvolvimento da indústria em geral.*

### INTRODUÇÃO

O crescente aumento do uso de servo acionamentos e inversores de frequência em máquinas de processos dedicados, fizeram surgir os controladores de movimentos, agregando características de controladores numéricos computadorizados (CNC's) com as mesmas funções e a facilidade de programação de um controlador lógico programável (CLP).

Os controladores de movimentos são equipamentos desenvolvidos para automação de máquinas que necessitam de controle de posição, de trajetória, de velocidade ou torque. Possuem funções específicas para controle de servos acionamentos como posicionamentos simples, interpolação linear, interpolação circular, interpolação helicoidal, comes eletrônico, engrenagem eletrônica e outros.

Tais funções são geralmente reunidas em blocos funcionais permitindo fácil programação, reduzindo o custo de desenvolvimento do projeto visto que as mesmas já se encontram prontas para uso evitando a criação de algoritmos complexos e demorados. Para facilitar a compreensão das funções dos controladores de movimentos, iremos a seguir descrever algumas das funções principais normalmente encontradas nos controladores de movimento disponíveis no mercado.

### CONTROLE DE TORQUE

Permite o controle preciso do torque do servo motor independente da velocidade e posição do mesmo.

O controle de torque é normalmente utilizado em aplicação onde a grandeza fundamental de controle é o torque e/ ou a força aplicada a carga. Podemos citar como exemplo as operações de rosqueamento de tampas como o de embalagens de dentífrico,

potes, frascos, etc, onde o torque de aperto deve ser o suficiente para garantir o perfeito fechamento da embalagem, porém não tão elevado que impeça sua abertura.

O controle de torque também é utilizado para aperto de parafusos em blocos de motores e de máquinas, como também no controle de tração em bobinadeiras e desbobinadeiras.

## CONTROLE DE VELOCIDADE

É uma das funções básicas de um controlador. O controle de velocidade é realizado em malha fechada por realimentação de um encoder ou gerador de pulsos. O controle em malha fechada proporciona alta precisão de controle mesmo com grandes variações de carga.

É essencial no controle de “spindles” ou eixo árvores em tornos e/ou máquinas operatrizes, principalmente em operações de usinagens de roscas, onde um desvio de velocidade irá representar alteração no passo do filete, inutilizando a peça.

## POSICIONAMENTO

Existem vários tipos de posicionamentos dependendo da função a ser realizada pela máquina. No caso de um posicionamento, o importante é levar o servo motor a posição solicitada com a máxima precisão.

O posicionamento pode ser incremental ou absoluto. No posicionamento incremental, o controlador de movimentos conta os pulsos do encoder incremental e controla o servo motor de forma a atingir a posição solicitada. No caso de perda de energia, a máquina deverá ser reiniciada a partir da posição zero, visto que o encoder incremental não memoriza a sua última posição. A maioria dos controladores possuem uma função específica denominada de “Home Position” ou busca da posição zero ou referenciamento, permitindo referenciar automaticamente a máquina. A função “Homing” normalmente utiliza o pulso “C” do encoder como referência de posição zero.

No posicionamento absoluto é necessário a utilização do encoder absoluto o qual informa em tempo real sua posição, mesmo com queda de energia, não sendo necessário reiniciar ou referenciar a máquina.

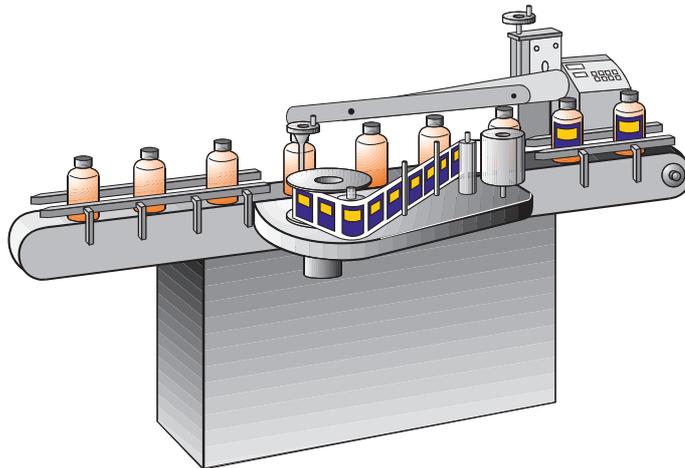


Figura 02: Posicionamento simples em uma máquina rotuladora

A precisão do posicionamento é dada pelo número de pulsos do encoder. Para um posicionamento preciso é recomendável que a resolução seja 10 vezes maior que a resolução da máquina. Por exemplo para uma máquina que trabalhe com posicionamentos variando em 0,1 mm, o encoder utilizado deverá indicar 0,01 mm por pulso. Esse procedimento é necessário, visto que o posicionamento perfeito não existe.

O mesmo varia dentro de uma faixa aceitável de desvio, sendo normal o erro de mais ou menos um ou dois pulsos no final do posicionamento.

Na maioria dos controladores, é possível se estabelecer a faixa de desvio de posição aceitável, sendo o erro sinalizado pelo mesmo. A figura 2 ilustra uma máquina rotuladora, controlada por um controlador de movimentos com posicionamento simples do tipo de puxa e para.

## INTERPOLAÇÃO LINEAR

Para interpolação linear é necessário a utilização de dois eixos. Eixo é o nome genérico dado a um acionamento individual. A figura 03 ilustra uma mesa posicionadora X,Y, responsável pelo deslocamento do cabeçote de corte a laser.

Na interpolação linear os eixos X e Y são controlados de forma que a somatória dos dois movimentos resulte em uma trajetória linear, também denominada de interpolação linear.

Na maioria dos Controladores de Movimento é possível programar com facilidade trajetórias lineares para formação de figuras geométricas definidas ou compor figuras lineares por justa posição de trajetórias.

A figura 03 ilustra uma interpolação linear formando um triângulo que será cortado por um feixe de laser ou maçarico.

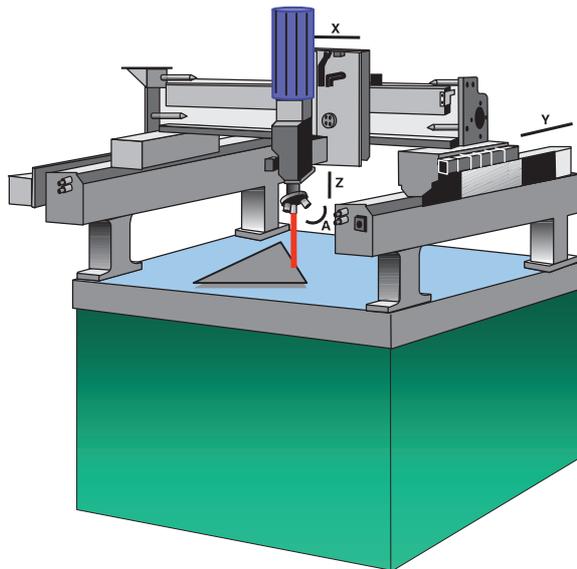


Figura 03: Exemplo de Interpolação Linear

### INTERPOLAÇÃO CIRCULAR

A interpolação circular é obtida por dois eixos de forma que o resultado da ação conjunta dos mesmos resulte em um círculo.

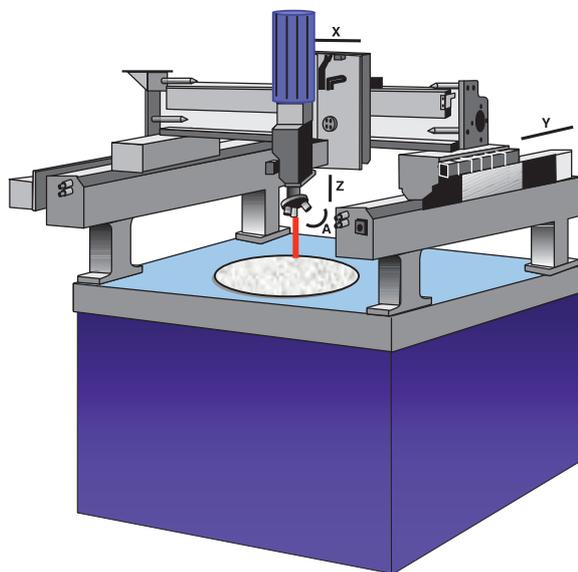


Figura 04: Exemplo de Interpolação Circular

Normalmente é necessário informar ao controlador apenas o diâmetro e a posição inicial do círculo e o controlador se encarregará de mover os eixos X e Y de forma a gerar o movimento circular solicitado.

A figura 04 ilustra uma mesa X,Y produzindo um movimento circular.

## INTERPOLAÇÃO HELICOIDAL

Necessita de três eixos sendo formada pelas interpolações linear e circular resultando em uma trajetória helicoidal, como o filete de uma rosca, conforme ilustra a figura 05.

Normalmente é necessário informar apenas o diâmetro e o passo ao controlador assim como as coordenadas de partida.

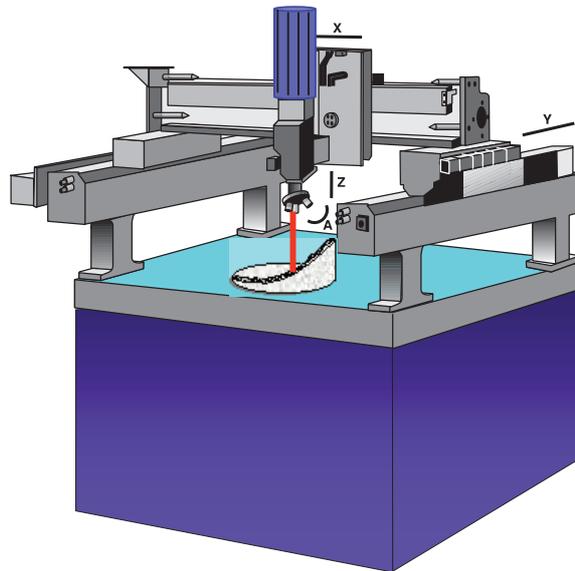


Figura 05: Exemplo de Interpolação Helicoidal

## ENGRENAGEM ELETRÔNICA

Essa é uma das funções típicas dos Controladores de Movimentos. O controlador garante o sincronismo de fase mecânica da mesma forma que um conjunto de engrenagens.

A figura 06 ilustra a aplicação em uma máquina impressora de quatro cores.

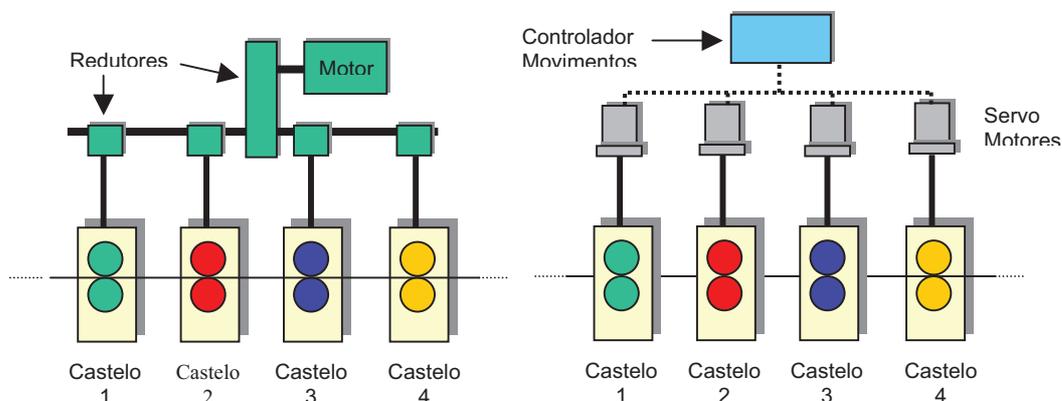


Figura 06: Exemplo de Engrenagem Eletrônica em uma máquina gráfica

No arranjo a esquerda os castelos de impressão são acionados por um eixo único que distribui o movimento para cada castelo através de engrenagens. O motor de acionamento é único e como a transmissão de movimentos é mecânica, existe um perfeito sincronismo entre os castelos de impressão.

No arranjo a direita, os eixos e engrenagens foram substituídos por servo motores acionados por um Controlador de Movimentos. Esse arranjo é chamado de “Shaftless”, pois elimina o eixo único, reduzindo a complexidade de construção da máquina e permitindo maiores velocidades de operação.

A função de engrenagem eletrônica permite ainda alterar o valor de engrenamento eletronicamente, como também avançar ou atrasar a fase de um dos servo motores, permitindo fácil ajuste das cores de impressão.

## CAMES ELETRÔNICO

Esta função permite criar um movimento complexo sincronizado a um movimento de referência externo. A figura 07 ilustra o arranjo mecânico típico onde um motor aciona através de um redutor uma cames mecânica, que por sua vez aciona um embolo produzindo um movimento horizontal de acordo com o formato externo da cames.

A utilização de um Controlador de Movimentos substitui a cames mecânica e seus acessórios por um servo acionamento e um fuso de esferas.

Através de programação adequada, o controlador de movimentos reproduz eletronicamente o movimento da cames no eixo do servo. Normalmente é utilizado um encoder instalado em um ponto da máquina, como referência de posição. Caso a máquina varie de velocidade, o controlador irá seguir essa variação em fase mecânica variando sincronizadamente a execução do cames eletrônico.

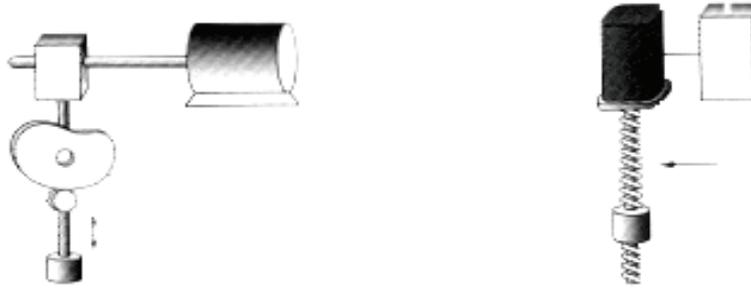


Figura 07: Exemplo de Cames Eletrônico

## FUNÇÕES LÓGICAS

Normalmente os Controladores de Movimentos oferecem além das funções específicas de controle de movimentos, funções lógicas programáveis em diagrama de blocos do tipo “Ladder” permitindo a implementação de lógicas de intertravamento e comando, facilitando o projeto e instalação visto que todo o controle torna-se residente em um único equipamento.

## CONCLUSÃO

Podemos concluir que os Controladores de Movimentos foram desenvolvidos para facilitar a automação de máquinas e linhas de produção, através da inserção de complexas rotinas de posicionamento e interpolação em simples comandos de programação. Inicialmente destinados a máquinas de maior grau de complexidade, atualmente os controladores pela sua razoável redução de custos, já são utilizados em um número cada vez maior de máquinas e equipamentos, reduzindo custos de produção e permitindo ampliar a produtividade e qualidade das máquinas e linhas de produção.

### Plasma / Laser Cutting - Safety

July 22, 2008

#### Issues / Problems / Challenges

- 1) Motion Safety issue occurred in existing system, need integrated safety in servo drives.
- 2) Need to meet European Safety Regulations
- 3) Need simple spare part handling and avail
- 4) Heavy competition from LENZE

#### Solution

**Controller:** Customer's own controller  
**Controller Software:** Proprietary  
**Interface:** +/-10V Speed Ref  
**Servo:** Sigma-5 SGDv (5-8 axis)  
**Power Level:** 400 W up to 7.5 kW  
**Voltage Level:** 400 VAC 3 Ph.

#### Performance Achieved:

**Throughput:** up to 30 m/min cut spd  
**Accuracy:** ??  
**Auxiliary Functions:** Safe torque off STO, SIL2, and Safety Category 3 achieved.

#### Customer Information

**Industry:** Machine Tool  
**Application:** Plasma and Laser Cutting

#### Customer Controller

+/- 10V Analog Velocity Reference  
 (5 to 8 Axis)

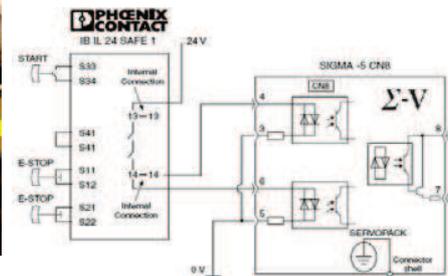
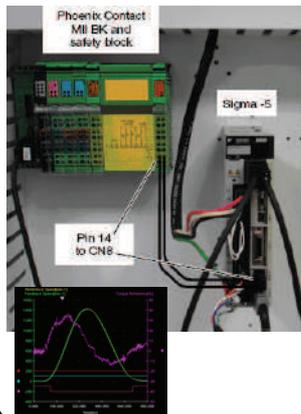
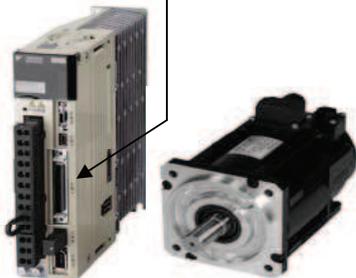
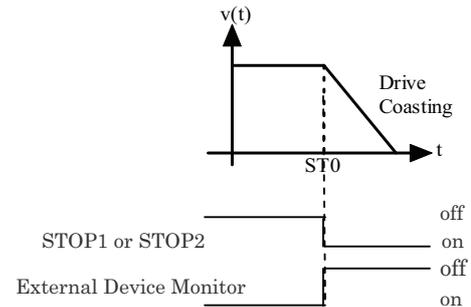


Figure 1. Connection diagram between Sigma-5 and IB IL 24 SAFE 1 safety terminal

1: Safe Stop 0 (stop category 0)



#### Application Description:

This OEM builds Plasma/Laser cutting machines that cut steel, throughput depends on the cutting tool used. Experienced a watchdog problem in their own controller which led to uncontrolled motion. Several incidents occurred where the machine crashed because it didn't know to stop. Although nobody was hurt, the OEM views this as a serious safety concern that needed to be addressed. They requested integrated safety stop in the servo drive to act as a backup if the controller experienced an issue. The result is a safe machine with with increased performance. According to the customer, these machines deliver "exceptional unrivalled" cutting accuracy, productivity and quality throughout the plasma cutting thickness range from 0.75 to 30mm. In combination with its sophisticated process integration, it delivers the highest cut quality parts at the most economical price. Machine speeds up to 30m/min. Low maintenance and now with added safety requirements are additional features.

#### Differentiating Solution Features

- 20bit encoder, 1600Hz bandwidth, advanced and intelligent filter and load modeling.
- Built-in Safety features
- Globally supported products
- Established relationship between US and European facilities

#### Resulting Solution Benefits

- Settling time less than 2 msec!
- Able to meet European Safety Regulations.
- Motion Stopping interlock prevents human injury.
- Stock components that are available multi region
- Future plans to build Mechatrolink into controller to use Mechatrolink Sigma-5 versions for higher performance and data diagnostics.

### Web Tension & Inspection

July 24, 2008

#### Issues / Problems / Challenges

- Require web tension control that minimizes web vibration at all speeds from 2 to 120 ft/min.
- Running out of time, previous selected vendor had 8wks and couldn't get system working.
- Competition was DANAHER.

#### Solution

**Controller:** Galil DMC4030  
**Controller Software:** Customer  
**Interface:** Step/Dir  
**Servo:** Sigma-5 (SGDV) 3 axis  
**Power Level:** 400 W, SGMAH  
**Voltage Level:** 230 VAC, 1 Ph.

#### Performance Achieved:

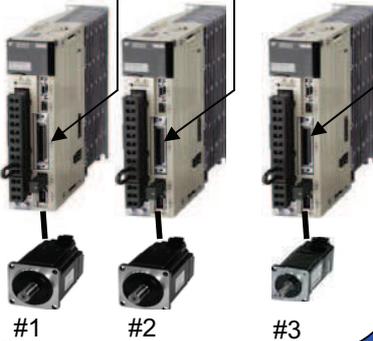
**Throughput:** 2-120ft/min  
**Accuracy:** <5% torq variation  
 <1% spd regulation  
 3 micron pos (axis 3)  
**Auxiliary Functions:** Adaptive Tuning

#### Customer Information

**Industry:** Solar Energy  
**Application:** Web Tension & Inspection



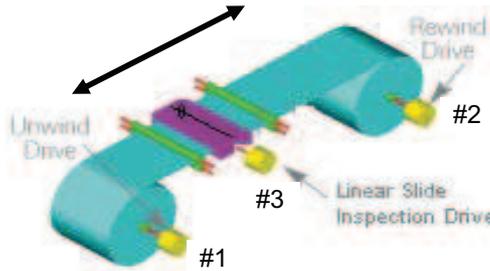
Galil Control Step/Dir Signal



#1

#2

#3



Previous system - unable to achieve at all speeds without retuning servos.

New system - better control of torque disturbances without retuning.

**Distributor Comment:** "Cabling and connection to the amplifier was easy. This was the only system that could have been pulled off in this short time."  
**OEM Comment:** "These guys did in 1 week, what the other supplier couldn't even accomplish in 8 weeks."  
**End User Comment:** "Its unbelievable how much progress they made in one week. I'm very impressed"

#### Application Description:

This three-axis machine controls an inline inspection/validation process on a stainless steel web that is later used in solar panel production. A 22" wide by couple thousands of an inch thick steel web is unwound from the pay-out roll and re-wound on the take-up roll. An inspection laser is "zone" positioned laterally by a 3mm pitch precision ball screw to validate the solar film previously adhered to the steel web, and the web is ran back and forth through full unwind/rewind periods until all inspection zones are covered. Inspection data is later used to notch out failed web. The control challenges are: 1) load variation caused by diameter change, 2) requirement for accurate torque control at a wide range of production speeds, and 3) run at different tension settings from 5 to 60lbs --> all of these must be provided without producing excessive vibration in the web. As the diameter changes from 4" to 18", the motor sees from 2 to 19:1 inertia mismatch. The line speed must operate anywhere from 2 to 120 ft/min. Payout and takeup axis have a 40:1 gearhead and are in a master/slave configuration with master in pos and slave in torque modes.

Idler wheel with encoder provides secondary feedback to close position loop for the master in upper controller, resulting in a simplified control system (simply jog the master). Analog input for load sensor directly into upper controller.

#### Differentiating Solution Features

- Product in Stock
- Adaptive tuning algorithm, 2 min tuning time.
- One set of tuning gains valid for ALL speeds!
- Anti-vibration filter, 20bit encoder, 1600Hz resp.
- Technical support from Certified Distributor

#### Resulting Solution Benefits

- Received & installed within 2 days.
- System was running within spec in 5 days.
- Smoothness of motion within the web.
- System could handle changing inertia loads
- OEM and End User gained significant confidence in the products and support mechanisms.

## LabView Mlink-II Test Machine

July 22, 2008

### Issues / Problems / Challenges

- 1) Motion System in previous test rig is crude, uses pulse/direction output to servos.
- 2) Needs improved integration motion/LabVIEW
- 3) Simple point to point positioning by LabVIEW
- 4) Three Axis of Motion controlled by PC
- 5) Existing design uses Parker/Compumotor Servos

### Solution

**Controller:** Customer's Industrial PC  
**Controller Software:** Vista and LabVIEW 8.5  
**Interface:** MECHATROLINK II  
**Servo:** Sigma-5 SGDV (3 axis)  
**Power Level:** 200 W up to 1.5 kW  
**Voltage Level:** 200 VAC 3 Ph.

### Performance Achieved:

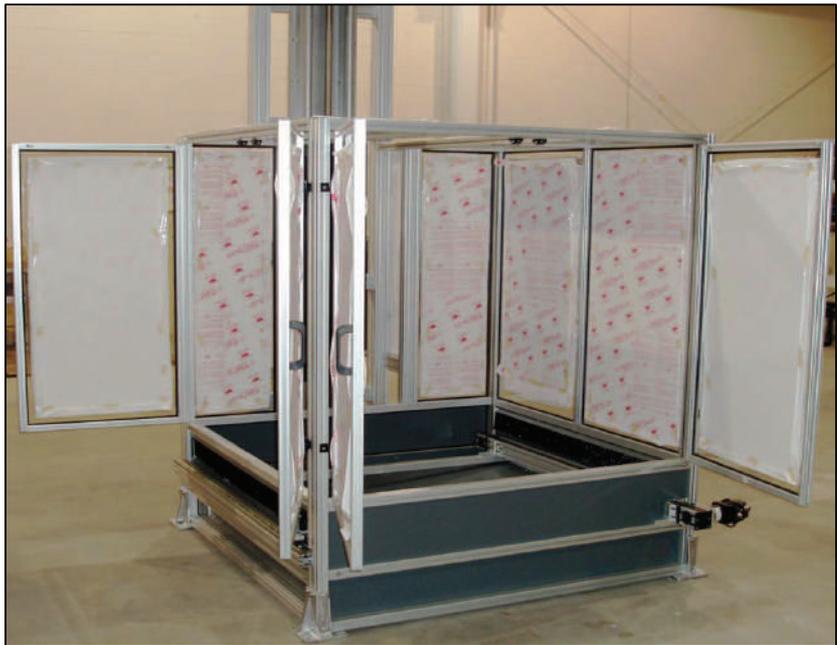
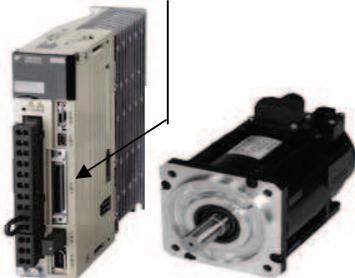
**Throughput:** System speed was tripled  
**Accuracy:** Increased due to 20 bit encoder  
**Auxiliary Functions:** ABS encoder less limits switches & faster startup & recover from power loss.  
 Fast setup due to TuneLess Auto Tuning

### Customer Information

**Industry:** Test and Measurement  
**Application:** Flow Measurement



MECHATROLINK II  
 BY NT110 PCI  
 (3 Axis)



### Application Description:

A Global Manufacturer of Air Flow Meters needed to update its testing procedures to for quality assurance of its products. Their standard software in Test Lab is LabVIEW. In fact it is the global standard for all of their factories around the world. Their goal is to use LabVIEW on a PC to control both the test and measurement needs but also any motion control required. Yaskawa's local distributor worked with the Mfr. to replace the existing pulse input servos from Parker and replace them with Yaskawa servos that were used in a new light aluminum frame design for the new test setup. The whole system was operational in a short time. Simply adding NT110 card to PC, downloading NI Driver from Yaskawa's website and connecting servos over MECHATRONLINK II network.

### Differentiating Solution Features

- 20bit encoder, 1600Hz bandwidth, advanced and intelligent filter and load modeling.
- LabVIEW driver made it easy
- Globally supported products
- Global support for N.A., Europe. and Asian facilities

### Resulting Solution Benefits

- Easy to Use integrated solution
- Digital interface for control and data collection
- EZ to meet Motion Control requirements
- Stock components that are available multi region
- Future plans to build same test rig in 3 overseas plants, so they can benefit from higher performance and data diagnostics.



## **PWM 3 - Níveis - A Nova Tecnologia para Inversores de Freqüência**

### **I. INTRODUÇÃO**

A tecnologia 3-Níveis, também conhecida internacionalmente como “Neutral Point Clamped (NPC)”, foi inicialmente introduzido por A. Nabae, I. Takahashi e H. Akagi em 1980 e publicado em 1981 [1]. Com essa configuração de circuito, o stress de tensão nos componentes de chaveamento de potência é metade do encontrado nos inversores convencionais de dois níveis. Devido a essa característica, esse circuito é normalmente aplicado em inversores de media e alta tensão. As mais recentes aplicações incluem indústrias siderúrgicas e área de tração elétrica para ferrovias na Europa [2][3] e Japão [4].

Além da capacidade de atuar com alta tensão, o inversor 3-Níveis têm características favoráveis como; tensão fase-fase e de modo comum com pulsos de menor amplitude de tensão, portadora com maior quantidade de pulsos de tensão por ciclo e menor ripple na corrente de saída para a mesma freqüência portadora.

Essas características proporcionam significantes vantagens no acionamento de motores de indução em relação aos inversores de freqüência convencionais de dois níveis, como a redução considerável do stress na isolação dos enrolamentos do motor, redução da corrente de fuga a terra e na corrente de circulação a terra através dos rolamentos e redução no ruído audível do motor. Combinado com sofisticados algoritmos PWM, torna-se possível à melhoria da performance dinâmica do acionamento através do emprego do método de “ Observador de Fluxo Dual”.

De maneira a tornar as vantagens acima disponíveis para aplicações gerais, os inversores 3-Níveis foram desenvolvidos para aplicações em baixa tensão [5], [6]. Para sucesso dessa nova topologia desenvolveu-se um exclusivo processo de balanceamento de carga dos capacitores [7].

Detalhes serão apresentados e comentados nas seções a seguir.

### **II. CONFIGURAÇÃO BÁSICA DO CIRCUITO**

A Fig. 1 mostra o circuito de potência de um inversor 3-Níveis. Cada fase tem quatro dispositivos de chaveamento (IGBTs) conectados em serie. Tomando a fase U como exemplo, o circuito se comporta conforme descrito a seguir.



Quando os IGBTs  $Q_{U1}$  e  $Q_{U2}$  são ligados, a saída U é conectada ao terminal positivo (P) do barramento CC. Quando  $Q_{U2}$  e  $Q_{U3}$  são ligados, os mesmos são conectados ao ponto médio (O) no barramento CC e quando  $Q_{U3}$  e  $Q_{U4}$  são ligados, os mesmos são conectados ao terminal negativo (N). Assim a saída assume três diferentes níveis de tensão, enquanto os inversores convencionais atuam com apenas dois níveis de tensão. A relação entre a seqüência de chaveamento dos IGBTs e a tensão de saída com relação ao ponto médio é ilustrada na Tabela 1.

Capacitores são conectados em serie de forma a se obter o ponto médio, responsável pela criação da tensão zero de saída. Essa conexão em serie é largamente utilizada em inversores da classe 400V(380 a 480V), em virtude da indisponibilidade de obtenção de capacitores eletrolíticos de tensão de trabalho mais elevada. Um ponto importante nessa topologia é manter o balanceamento de carga nos capacitores, pois a corrente irá fluir em diversas direções a partir do ponto médio.

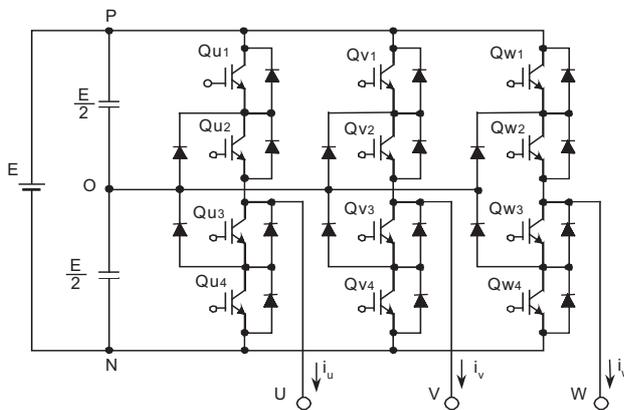


Fig. 1. Topologia dos inversores 3-Níveis.

Tabela 1. RELAÇÃO ENTRE CHAVEAMENTO E TENSÃO

|                   | $Q_{u1}$ | $Q_{u2}$ | $Q_{u3}$ | $Q_{u4}$ | $V_u$ |
|-------------------|----------|----------|----------|----------|-------|
| Estado dos IGBT's | ON       | ON       | OFF      | OFF      | +E/2  |
|                   | OFF      | OFF      | ON       | ON       | -E/2  |
|                   | OFF      | ON       | ON       | OFF      | 0     |

De forma a ilustrar as formas de onda de saída de tensão, consideremos o sinal de referencia do PWM para as fases U, V e W como,

$$e_U = A \text{ sen } (\omega t) \quad (1)$$

$$e_V = A \text{ sen } (\omega t - 120^\circ) \quad (2)$$

$$e_W = A \text{ sen } (\omega t - 240^\circ) \quad (3)$$

onde A é o indexador de modulação. Assume-se a não existência de injeção de componentes da terceira harmônica de forma a melhorar a utilização da tensão do barramento CC.

As formas de onda da tensão de saída variam de acordo como indexador de modulação e do ângulo de fase. Para ilustrar o comportamento da tensão de saída, vamos adotar o indexador de modulação A igual a 1.0, o que significa que a tensão total de comando é aplicada. Consideremos ainda o ângulo de fase  $\omega t$  igual a  $75^\circ$  para a fase U. Essa condição é mostrada na Fig. 2, onde as tensões de fase em “per-unit” são expressas como,

$$E_U = 1.0 \text{ sen } 75^\circ = 0.966 \quad (4)$$

$$E_V = 1.0 \text{ sen } (75^\circ - 120^\circ) = -0.707 \quad (5)$$

$$E_W = 1.0 \text{ sen } (75^\circ - 240^\circ) = -0.259 \quad (6)$$

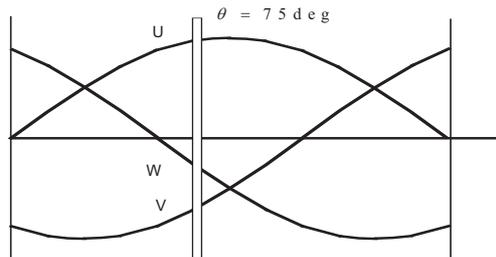


Fig. 2. Escolha do angulo de fase para ilustração das formas de onda

A Figura 3 a seguir ilustra, as formas de onda da tensão de fase em relação ao ponto médio, a tensão de linha e a tensão de modo comum para um ciclo PWM.



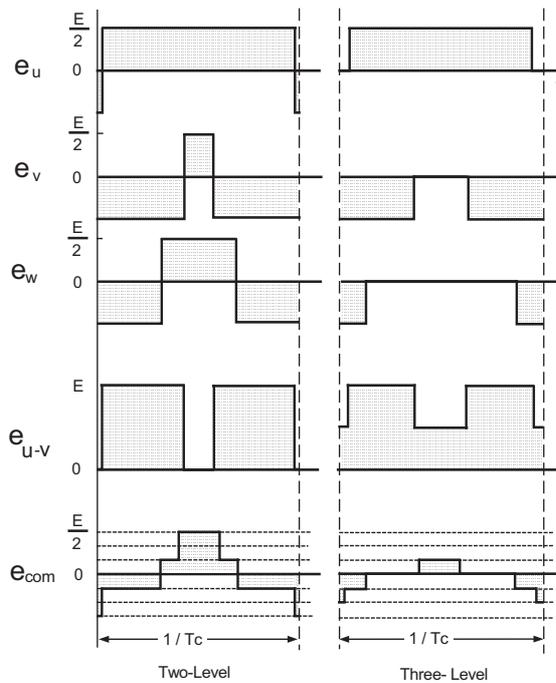


Fig. 3. Comparação entre as formas de onda de tensão dos inversores 2-Níveis (Two Level) e 3-Níveis (Three Level)

Na Fig. 3,  $T_c$  é o período de um ciclo PWM.

A tensão de linha  $e_{u-v}$  é definida como segue;

$$e_{u-v} = e_u - e_v \quad (7)$$

Essa é a tensão aplicada ao motor.

A tensão de modo comum  $e_{com}$  é definida como;

$$e_{com} = (e_u + e_v + e_w) / 3 \quad (8)$$

A tensão de modo comum se relaciona com a corrente de fuga a terra, tensão do eixo e corrente de rolamento do motor.

As formas de onda das tensões de linha obtidas para configuração 2-Níveis e 3-Níveis é ilustrada na figura 4. A Figura 5 compara as tensões de modo comum.

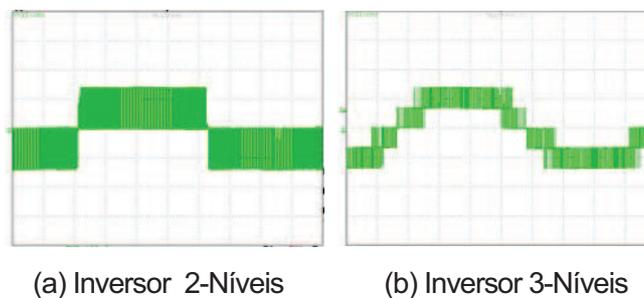
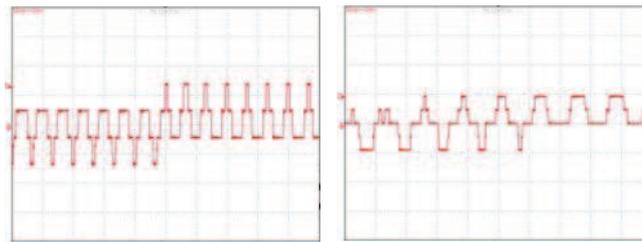


Fig. 4. Forma de onda da tensão de linha





V: 500V/div, T: 2 ms/div



(a) Inversor 2-Níveis

(b) Inversor 3-Níveis

Fig. 5. Forma de onda da tensão de modo comum

V: 250V/div, T: 110  $\mu$ s/div

As forma de onda acima foram obtidas sobre os terminais de um motor de 460V, 7,5kW acionado por inversores de 2 e 3 Níveis.

Conforme ilustram as Figs. 3-5, os inversores de 3-Níveis tem pulsos de tensão de linha e de modo comum de menor amplitude que os inversores 2-Níveis. Essas características proporcionam significantes benefícios para o acionamento de motores descritas na seção IV.

### III. BALANCEAMENTO DA TENSÃO DO LINK CC

O ponto médio dos capacitores do barramento CC é conectado ao circuito da ponte inversora através dos diodos como mostra a Fig. 1. A corrente que vai e volta desse ponto causa desbalanceamento de tensão entre os capacitores superiores e inferiores.

Na topologia 3-Níveis, existem 27 ( $3^3$ ) combinações de estados ligados e desligados dos IGBT's. Entretanto existem redundâncias nessas combinações e elas são categorizadas dentre um dos seguintes casos, na ordem da menor para a maior tensão.

**Caso 1:** Três terminais são combinados juntos e conectados ao barramento positivo (P), o ponto médio CC (O) ou barramento negativo (N). Isto é chamado de "zero vector". A corrente do motor é completamente independente do circuito dos capacitores.

**Caso 2:** Um ou dois terminais do motor são conectados ao ponto médio e os remanescentes (são) conectados aos barramentos positivo ou negativo. Neste caso o fluxo da corrente do ponto médio causa desbalanceamento de tensão nos capacitores. Isto pode ser controlado pela escolha do chaveamento apropriado de forma a produzir a mesma tensão no motor, mas causando a corrente do capacitor a fluir em direção oposta.

**Caso 3:** Três terminais do motor são conectados ao P, O ou N. A magnitude e polaridade da corrente de ponto médio mudam dependendo das condições de carga e do ângulo da fase em operação. Esta corrente causa desbalanceamento de tensão nos capacitores e geralmente não controlável para uma





determinada tensão. O Case 2 é utilizado para compensar o desbalanceamento causado por esta condição.

**Caso 4:** Um ou dois terminais do motor são conectados ao P, e os remanescentes (são) conectados ao N. Neste caso não existe corrente fluindo no ponto médio.

A Fig. 6 mostra exemplos típicos para o caso 2 mencionado acima. As conexões (a) e (b) fornecem ao motor a mesma tensão e corrente em ambas direções. Desta forma, o balanceamento de tensão no capacitor pode ser realizado pela escolha apropriada de (a) ou (b). As conexões (c) e (d) tem relações similares, em relação à tensão do ponto médio e corrente do motor.

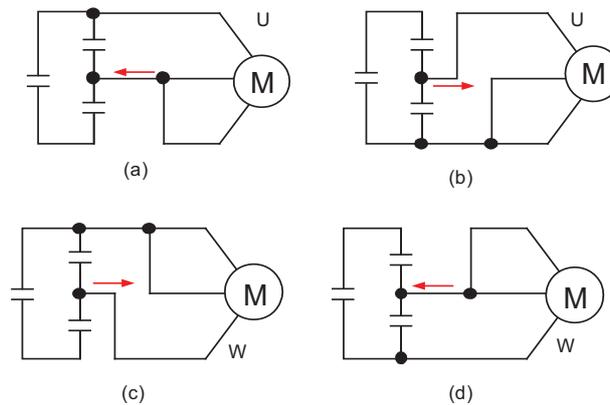


Fig. 6. Seleção da polaridade da corrente do ponto médio

O inversor 3-Níveis aqui apresentado utiliza um sofisticado método de controle baseado na tecnologia “space vector”, a qual seleciona o vetor ótimo ou combinação de chaveamento para a melhor performance do motor e o melhor balanceamento de tensão nos capacitores [7]. Neste método, a corrente que entra ou do ponto médio não necessita ser detectada diretamente podendo ser determinada a partir da corrente do motor e do estado de chaveamento dos IGBT’s.

#### IV. CARACTERÍSTICAS E VANTAGENS DOS INVERSORES 3-NÍVEIS

Esta seção compara os transientes de tensão nos terminais do motor, a corrente de fuga, a tensão no eixo e a corrente no rolamento do motor entre os inversores de 2-Níveis e 3-Níveis.

##### A. Forma de Onda da Corrente

O ripple da corrente nos inversores 3-Níveis é menor que nos inversores convencionais devido a menor amplitude de tensão dos pulsos do PWM. A frequência portadora do PWM pode ser reduzida mantendo-se a mesma qualidade de corrente dos inversores 2-Níveis, porém com a vantagem adicional de poder reduzir as perdas por efeito Jaule nos IGBT’s em consequência da redução do número de chaveamentos por ciclo.





### B. Transientes de Tensão nos terminais dos motores

Quando a distancia entre o inversor e o motor é grande, a tensão nos terminais do motor é elevada em virtude dos transientes de tensão ocasionados pela reação da indutância e capacitância distribuída do cabo. Valores elevados de tensão aparecem nos terminais do motor podendo danificar e a te romper a isolamento dos enrolamentos do motor. A aplicação continua desses pulsos de tensão elevada contribuem ainda para a redução da vida dos motores.

A amplitude dos pulsos de tensão dos inversores 3-Níveis é metade da amplitude dos pulsos de tensão dos inversores 2-Níveis, desta forma os transientes de tensão nos terminais do motor são significativamente menores que nos motores acionados por inversores convencionais. As formas de onda da Fig. 7 são baseadas no conceito que os transientes de tensão no extremidade final dos cabos, ou terminais do motor, atingem cerca de duas vezes o valor da tensão de saída do inversor. Esse efeito é decorrente da aplicação de pulsos de tensão em um circuito ressonante L-C formado pelos cabos e sua capacitância distribuída.

Na Fig. 7 (a), Sobre o pulso PWM é adicionado um transiente de tensão atingido o valor de pico de  $2E$ . Na Fig. 7 (b), sobre o pulso é adicionado um transiente de valor  $0,5E$ , o valor de pico passa para  $1,5E$  menor que a figura (a).

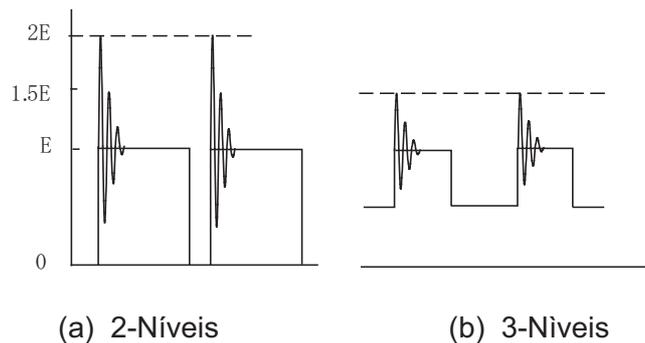
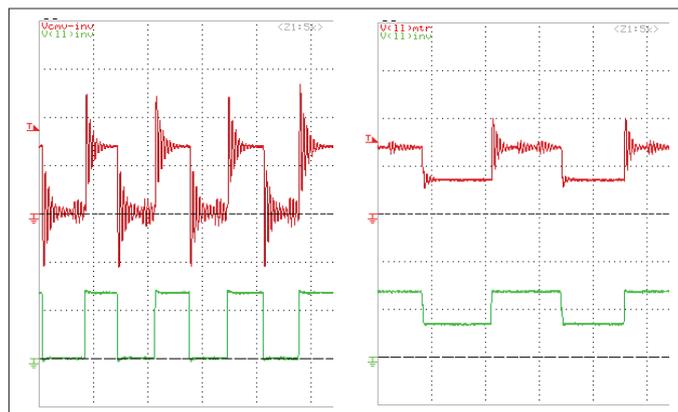


Fig. 7. Transiente de tensão nos terminais do motor

A Fig. 8 mostra as forma de onda da tensão medida sobre os terminais do motor para uma distancia de cabo de 100 metros. Essas formas de onda mostram claramente a diferença dos picos de tensão. O comportamento das oscilações amortecidas dos transientes são facilmente identificáveis em ambas as configurações de inversores.





(a) 2-Níveis

(b) 3-Níveis

Fig. 8. Oscilograma dos Transientes de tensão nos terminais do motor

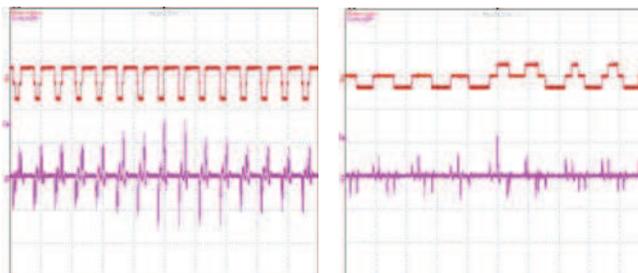
V: 500V/div, T: 50µs/div

### C. Corrente de Fuga

O valor elevado da tensão de modo comum causa o aparecimento da corrente de fuga entre os cabos de interligação e os enrolamentos do motor para o terra, através das capacitâncias parasitas das mesmos. Essa corrente de fuga costuma criar problemas de ruído de rádio frequência em equipamentos sensíveis instalados próximos ao inversor/motor.

Devido à amplitude reduzida dos pulsos de tensão em modo comum dos inversores 3-Níveis a corrente de fuga a terra é sensivelmente menor nos inversores 3-Níveis quando comparado aos inversores convencionais.

A Fig. 9 mostra uma redução significativa nos picos da corrente de fuga a terra para os inversores 3-Níveis. A medição foi realizada com motor de 460V, 7.5kW instalado a uma distância de 100m do inversor.



(a) 2-Níveis

(b) 3-Níveis

Fig. 9. Corrente de fuga a terra

Escala Superior: Tensão de mod comum, 500V/div

Escala Inferior: Corrente de fuga, 2A/div

T: 100 µs/div

### D. Tensão no eixo e Corrente no rolamento do motor

Danos em rolamentos de motores acionados por inversores tem sido relatados em casos onde o eixo do motor não estava devidamente aterrado. Esse problema é causado pela tensão de modo comum que aparece no eixo do motor gerando uma corrente de fuga a terra a qual atravessa o rolamento.

Quando o motor esta rodando o rolamento encontra-se isolado pela graxa formando um filme de graxa, isso provoca o aparecimento de capacitâncias entre o rotor e a carcaça e conseqüentemente ao terra. Essas capacitâncias são carregadas pela tensão de modo comum entre estator e rotor. Isso resulta na tensão do eixo, cuja forma é similar a tensão de modo comum. Essa tensão ocasiona descargas nas bordas do rolamento criando estrias e pontos que acabam por danificar completamente o rolamento.





Nos inversores 3-Níveis, a tensão de modo comum é significativamente reduzida em relação aos inversores convencionais reduzindo significativamente a corrente no rolamento do motor e conseqüentemente proporcionando redução no desgaste do rolamento. A Fig. 10 mostra o resultado do teste da tensão e corrente de rolamento em inversores 3-Níveis e 2-Níveis. Apesar da Fig. 10 mostrar que os inversores 3-Níveis produzem uma corrente de rolamento significativamente menor, ainda é um pouco difícil de se estimar precisamente o quanto se acrescentou ao tempo de vida do rolamento de uma forma em geral. No momento são realizados testes de longa duração para verificação desse efeito. A Fig. 11 mostra claramente que o uso de inversores 3-Níveis pode resultar em aumento significativo do tempo de vida dos rolamentos do motor.

Condições extremas incluindo temperatura, tipo de graxa, e velocidade do motor foram empregadas no teste de vida do rolamento ilustrado na Fig. 11. Nesse momento podemos afirmar de forma pratica, que o tempo de vida dos rolamentos será significativamente maior com a utilização de inversores 3-Níveis, no mínimo o aqui mostrado.

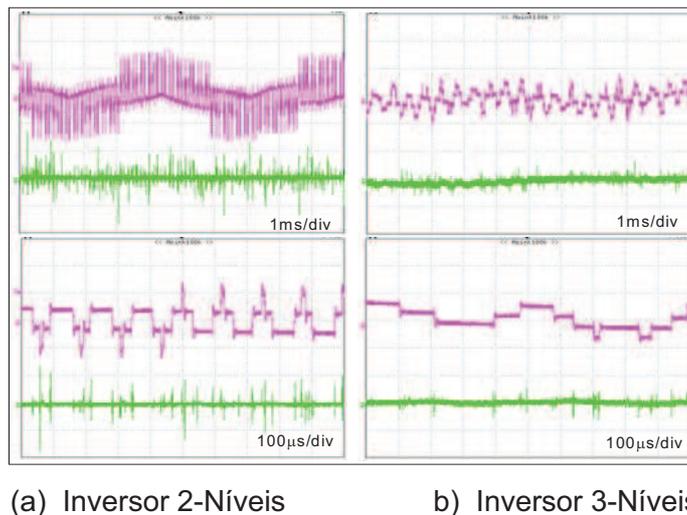


Fig. 10. Tensão no eixo e corrente no rolamento

Acima em cada figura: Tensão do eixo, 10V/div

Abaixo em cada figura: Corrente de Rolamento, 20mA/div

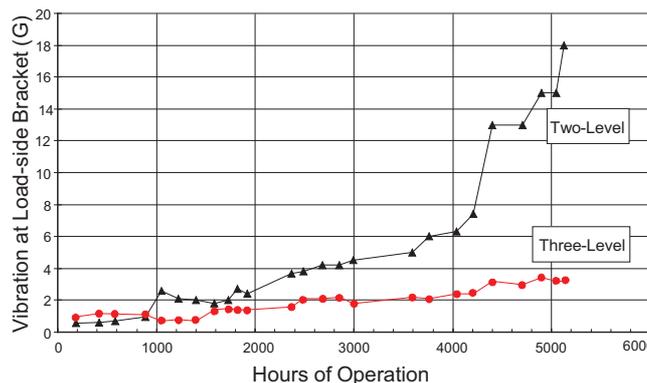




Fig. 11. Resultado do teste de vida dos rolamentos  
Motor 0,7 kW, 2.100 rpm

### V. PRODUTOS QUE EMPREGAM A TECNOLOGIA 3-NÍVEIS

A Yaskawa Europe (Germany) introduziu ao mercado o inversor Varispeed G7 empregando a tecnologia 3-NÍVEIS durante a feira de Hannover em 2002.

Conforme mencionado na seção anterior, a topologia 3-Níveis resulta em baixas correntes de rolamento. Isso elimina a necessidade de utilização de rolamentos isolados reduzindo o custo de fabricação de motores.

A próxima vantagem para tecnologia 3-Níveis é a redução dos transientes de tensão. Isso é muito importante em casos de modernização onde se deseja manter o motor existente. Motores antigos normalmente se encontram com sua isolação deteriorada e o uso de inversores convencionais irá sem duvida ajudar a romper essa isolação.

A baixa amplitude dos transientes de tensão reduzem o “stress” sobre a isolação dos motores. Em aplicações com longa distância de cabos, a topologia 3-Níveis resolve o problema dos transientes de tensão sobre o motor evitando o uso de filtros de saída (filtros dv/dt). Em aplicações com transformadores de elevação de tensão na saída de inversores de baixa tensão, a topologia 3-Níveis possibilita reduzir o tamanho dos componentes de filtragem normalmente utilizados entre inversor e transformador.

O ruído audível do motor também é reduzido em virtude dos pulsos de menor tensão. O ruído é comparável ao ruído produzido pelo motor conectado diretamente a rede elétrica.

Outra vantagem é a melhoria da performance dinâmica. Combinado com um sofisticado controle space vector e estratégia PMW específica para pulsos de baixa tensão, é possível o emprego de modernas tecnologias de controle destinadas a melhorar a performance do motor. A Fig. 12 mostra um diagrama de blocos simples de controle de velocidade sem sensor, “sensor less”, com a nova tecnologia do “ Observador de Fluxo Dual” resultando em um excelente controle de torque [5], [6].

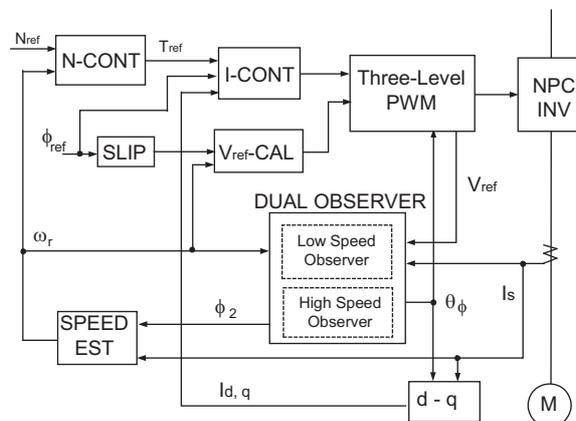


Fig. 12. Controle Vetorial Sensorless utilizando “Dual Flux Observer”



Utilizando esse método, é possível alcançar mais que 150% de torque a baixíssimas freqüência como 0,3Hz, como ilustra a Fig. 13.

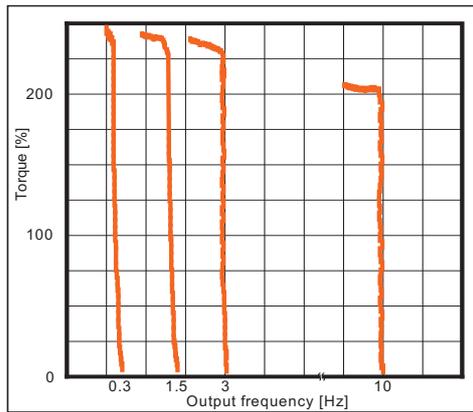


Fig. 13. Características de torque em baixas velocidades

O “Dual Flux Observer” também ajuda na melhoria da precisão de controle do torque do motor. A limitação do torque de saída protege maquinas e materiais contra mudanças súbitas de carga como ilustra a Fig. 14.

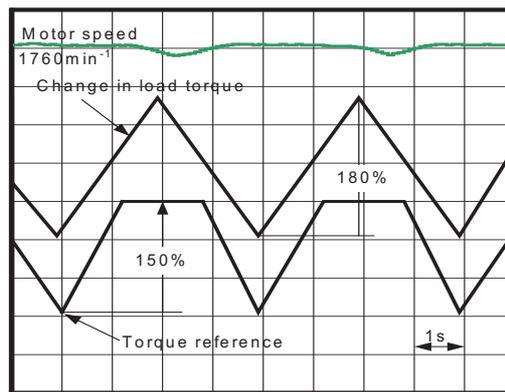
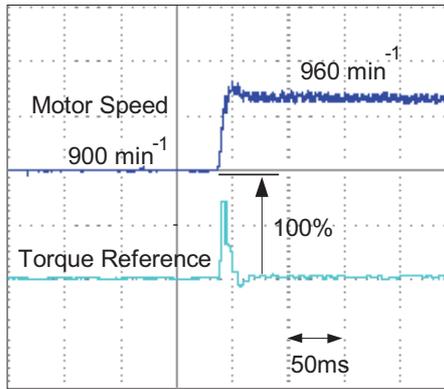
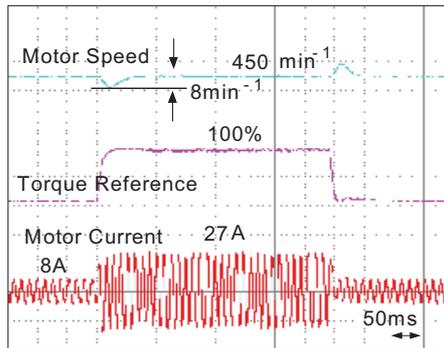


Fig. 14. Função de limitação de torque

O modelo de “tracking control” assegura respostas rápidas mesmo em operação “sensorless” ou sem realimentação. Em adição, o uso do realimentação por encoder pode atingir altíssima performance, com rápidas respostas as mudanças nas referências de velocidade e torque conforme ilustra a Fig. 15. A Fig. 15(a) mostra um exemplo de uma rápida resposta a uma mudança abrupta na referência de velocidade. A Fig. 15(b) é o caso onde ocorre um repentino aumento de carga. A alteração de velocidade é praticamente insignificante em virtude da rápida resposta de torque do sistema.



(a) Resposta rápida a alterações na velocidade



(b) Mudanças bruscas na carga

Fig. 15. Melhoria da performance dinâmica

Em virtude dessas características de controle é necessário o conhecimento preciso dos parâmetros do motor. Para alcançar a melhor performance, o Varispeed G7 possui a função de auto ajuste de parâmetros, “auto tuning”, que busca essas informações do motor, baseado apenas nas informações externas da placa do mesmo.



Fig. 16. Inversor Varispeed G7, 400V, 1.5kW





## VI. APLICAÇÕES TÍPICAS

Baseados nas categorias e benefícios da topologia 3-Níveis incluindo controles mais precisos de torque e velocidade e melhor dinâmica existem muitas aplicações em potencial. Algumas aplicações típicas são o acionamento de bobinadeiras e desbobinadeiras, eixo arvore em máquinas operatrizes, elevadores de passageiros, elevação de cargas e outras.

Baseados na redução dos transientes de tensão que proporcionam utilização com longas distâncias de cabos podemos citar aplicações como; acionamentos de bombas em unidades de tratamento de água e/ou esgoto onde o motor é normalmente instalado a longa distância do inversor, pontes rolantes com longas distâncias de cabos, áreas onde o inversor deve ser instalado longe do motor em virtude da área ser classificada ou agressiva, com grande concentração de poeira, calor, água e ou umidade como o caso de siderúrgicas, petroquímicas, papel, celulose e etc.

Em áreas alimentícias lavadas freqüentemente, os inversores 3-Níveis podem ser instalados a distância segura sem necessidade de armários especiais a prova de água, barateando o custo da instalação.

Outra aplicação é o acionamento de motores antigos com isolação já reduzida. Os inversores 3-Níveis possuem menor geração de transientes de tensão no motor reduzindo a possibilidade de queima dos mesmos.

Os inversores 3-Níveis produzem menor ruído audível permitindo aplicações internas a prédios comerciais e residenciais onde o ruído não é aceitável. Aplicações típicas nesse caso são o acionamento de bombas e ventiladores para unidades de ar condicionado, elevadores, máquinas comerciais para lavagem de roupas e outras.

## VII. ANÁLISE DE CUSTOS

A tecnologia 3-Níveis para baixa tensão ainda é recente e ainda não é possível quantificar com exatidão os ganhos financeiros de utilização da mesma. A Tabela 2 a seguir compara o preço orientativo de inversores 3-Níveis com o valor orientativo de inversores 2-Níveis, acrescidos de filtros de saída, de forma a atender a aplicação com longas distâncias de cabos entre inversor e motor. Para baixas potências a diferença de custos praticamente inexistente. Nas potências maiores a distância aumenta.

Não foi ainda possível tabular os efeitos financeiros das demais características dos inversores 3-Níveis como, maior vida útil dos motores, maior intervalo de tempo entre troca de rolamentos. Se considerarmos que na maioria das aplicações industriais o custo de paradas de produção em decorrência de troca de





motores é muito elevado, as diferenças de preço acima apresentadas para maiores podem perfeitamente serem justificadas por uma maior confiabilidade de operação dos acionamentos.

Tabela 2. RELAÇÃO ENTRE INVERORES 2-NÍVEIS E 3-NÍVEIS

| CV | 2-Níveis |        |          | 3-Níveis | $\Delta$ |
|----|----------|--------|----------|----------|----------|
|    | Inversor | Filtro | Total    | Inversor | (%)      |
| 10 | 975,00   | 525,00 | 1.500,00 | 1.520,00 | +1,33    |
| 20 | 1.640,00 | 595,00 | 2.235,00 | 2.135,00 | -4,47    |
| 50 | 3.570,00 | 945,00 | 4.515,00 | 4.900,00 | +8,64    |

$\Delta$  : Comparação 2-Níveis Total / 3-Níveis

Valores de referência em US Dolares

### VIII. CONCLUSÃO

Foi mostrado que a tecnologia dos inversores 3-Níveis não foi desenvolvida apenas para a satisfação dos técnicos de pesquisa e desenvolvimento, mas também para aplicações praticas no mundo moderno. É um passo em direção ao futuro das novas tecnologias de acionamentos de motores.

### REFERÊNCIAS

- [1] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," IEEE Trans. Ind. Applications, vol. 17, pp. 518-523, Sept./Oct. 1981.
- [2] R. A. Timer, "PWM Frequency Converters in the metal Industry," EPE Firenze 1991.
- [3] V. Cascone, L. Mantica and M. Oberti, "Three level inverter DSC control strategy for traction Drives," EPE Firenze 1991.
- [4] K. Nakata and K. Nakamura, "A three-level traction inverter with IGBTs for electric trains," IEEE Tokyo Section, Denshi TOKYO, No. 33, 1994, pp. 188-191.
- [5] E. Watanabe, et al., "New Inverter Drive Technology," Yaskawa Technical Review Vol. 65, No. 2, 2001, pp. 104-111
- [6] H, Takasaki, et al., "High-performance & Environmentally Friendly General Purpose Inverter Varispeed G7," Yaskawa Technical Review Vol. 65, No. 2, 2001, pp. 122-126



- [7] K. Yamanaka, A. M. Hava, H. Kirino, Y. Tanaka, N. Koga and T. Kume, "A novel neutral point potential stabilization technique using information of output voltage vector and currents," IEEE Trans. Ind. Applications, Vol. 38, No. 6 November/December, 2002 pp. 1572-1579.



## Servo Motores Lineares – Linha SIGMA II

A Yaskawa Electric continuamente desafiando as barreiras da performance, lança os servomotores da Série Linear Servo Drive para otimizar a velocidade e precisão de suas máquinas. Baseado na enorme experiência alcançada pela Yaskawa nos avançados sistemas de servoacionamentos rotatórios, o Linear Servo Drive irá elevar o desempenho da sua máquina ao próximo nível do novo milênio.

### ***Vantagens do produtos da Série $\Sigma$ Linear Servo Drive:***

**Melhora a performance da máquina :** Por ser acoplado diretamente ao eixo da carga, o Linear Servo Drive da Yaskawa alcança uma alta precisão de posicionamento em uma vasta gama de velocidades operacionais em comparação com os motores convencionais. Um tamanho de curso ilimitado pode ser alcançado acoplando-se vários trilhos magnéticos conforme a necessidade.

**Reduz o custo da máquina:** O Linear Servo Drive dispensa o uso de dispositivos mecânicos tais como acoplamentos, redutores, engrenagens, correias e guias lineares, reduzindo sensivelmente o custo da máquina. Vários motores podem ser utilizados no mesmo trilho, permitindo uma variedade de movimentos em um espaço reduzido.

**Redução dos ruídos:** O Linear Servo Drive da Yaskawa é muito silencioso, mesmo trabalhando em altas velocidades uma vez que o único contato mecânico existente no sistema está nas guias de movimentação. A confiabilidade do sistema é aumentada ao ponto que as necessidades de manutenção são consideravelmente reduzidas.

### **Características:**

**Densidade e Linearidade de Força:** O Linear Servo Drive foi desenhado para obter alta densidade de força em um motor de dimensões compactas além de uma excepcional linearidade de força mesmo próximo da região de pico. Isto foi possível graças à vasta experiência da Yaskawa no uso de magnetos de Terras raras de alta energia, as características otimizadas de construção de seus motores, a tecnologia utilizada na construção de bobinas de alta densidade e ao elaborado método de controle de corrente dos Servo Drives da linha SIGMA-II.

**Precisão na Malha de Velocidade :** O Linear Servo Drive possui uma elevada precisão na malha de velocidade graças à combinação dos sofisticados algoritmos de controle do Servopack SIGMA-II trabalhando em um sistema de malha fechada com o motor linear o que permite um movimento extremamente suave com um mínimo de distúrbios na malha de velocidade.

**Velocidade:** O Linear Servo Drive da Yaskawa pode alcançar velocidades de até 5 m/s com sua 100% de força nominal disponível.

**Aceleração:** Os Servomotores da Série  $\Sigma$  Linear Servo Drive podem acelerar acima da capacidade de qualquer outro sistema mecânico de movimentação linear, podendo alcançar sozinho assombrosos 20 Gs de máxima aceleração.

**Forças de Atração Magnéticas :** Os Servomotores Lineares do tipo GW são Coreless ( s/ núcleo de ferro ), não possuindo forças de atração entre as partes do motor, eliminando a possibilidade de laminação ou desgaste da guiar durante a movimentação natural do motor.

Os Servomotores Lineares do tipo FW e TW são Iron-Core ( com núcleo de ferro ), possuindo forças de atração entre as partes móveis e fixas dos motores , que variam de baixas a altas dependendo do tamanho dos motores. Estas forças de atração podem representar benefícios em alguns sistemas ao promover Forças de Pré-Carga aos movimentos lineares, aumentando a rigidez do sistema.

Inversamente, estas forças de atração podem afetar negativamente o sistema uma vez que devem ser consideradas no dimensionamento mecânico de forma a suportar estes esforços. Os Servomotores Lineares do tipo TW superaram esta limitação do sistema Iron-Core através de uma estrutura patenteada onde as forças de atração são anuladas devido ao seu designer único. Os motores TW oferecem alta densidade de força com alta capacidade de carga em um espaço compacto.

**Alta Eficiência :** Os Servomotores da Série  $\Sigma$  Linear Servo Drive são extremamente eficientes em termos do aproveitamento de energia. Graças ao designer dos seus circuitos magnéticos e a alta densidade de suas bobina, o efeito de aquecimento do motor transferido as outras partes da máquina são consideravelmente minimizados.