

# Controle e Acionamentos Eletrônicos de Máquinas de Corrente Alternada

**Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo**

[melo@dee.feis.unesp.br](mailto:melo@dee.feis.unesp.br)

**Desenvolvido por: Prof. Dr. João Onofre**

**Adaptado por: Prof. Dr. Jean Marcos de Souza Ribeiro e  
Prof. Dr. Guilherme de Azevedo e Melo**

**1º Semestre de 2018 – Aula 01**

28 de Fevereiro, de 2018

# Conteúdo Programático

- 1 - Modelos dinâmicos das máquinas CC (Revisão);
- 2 - Modelos dinâmicos das máquinas de CA (Revisão);
- 3 - Decomposição em do sistema trifásico em sistema bifásico e ortogonal (eixo direto e eixo em quadratura);
- 4 - Modelagem dos sistemas de acionamentos em CA;
- 5 - Técnicas de Controle Escalar;
- 6 - Técnicas de Controle Vetorial, e
- 7 - Controle Sensorless.

# Metodologia

*Esta disciplina será composta de aulas teóricas e de aulas experimentais em laboratório.*

*As aulas teóricas (4h/sem) serão de caráter expositivo, com utilização de recursos audiovisuais, resoluções de exercícios e simulações através de ferramentas computacionais (Matlab/Simulink).*

*As aulas práticas (2h/sem) serão realizadas no Laboratório de Acionamento de Máquinas (Lab 09, Lab 22 e Lab 23), cujo enfoque principal é comprovação dos resultados teóricos e de simulações.*

# Base Bibliográfica

1. JOÃO ONOFRE, *Material audio-visual utilizado na disciplina “Controle e Acionamentos Eletrônicos de Máquinas de Corrente Alternadas” do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da FE-IS/UNESP, 2005.*
2. ***Modern Power Electronics and AC Drives, 2002, Bimal K. Bose, University of Tennessee, Knoxville.***
3. *Vector Control and Dynamics of AC Drives, 1996, D.W.Novotny and T.A.Lipo University of Wisconsin.*
4. *Electric Motor Drives – Modeling Analysis and Control , 2001, R. Krishnan, Virginia Tech.*
5. *Analysis of Electric Machinery and Drive Systems, 2002, P.C.Krause, C.Wasyncruck, S.D.Suchoff*
6. *The Power Electronics Handbook, 2001, T.L.Skaverina, Purdue University.*
7. *Control of Electrical Drives- Springer-Verlag – 1985 - W.Leonhard.*
8. *Acionamento, comando e controle de máquinas elétricas, R. M. Stephan, 2009 - UFRJ*

# Critério de Avaliação

A média final (MF) será calculada por:

$$MF = 0,7P + 0,2L + 0,1T \quad \text{se } P, L \geq 5 \text{ ou } P, L \leq 5,$$

sendo:

$P$  = média das provas ;  $P = (2P1 + 3P2) / 5$  ;

$L$  = média das notas de laboratório;

$T$  = trabalho final.

Haverá uma prova substitutiva, caso  $MF < 5$ , que será relativa a toda a matéria ministrada no final do semestre. Esta nota substituirá  $P1$  ou  $P2$  (a menor delas), caso seja vantajoso ao aluno.

Haverá exame final.

# Critério de Avaliação

## *Entrega de relatórios e trabalhos:*

- *A data de entrega será definida pelo professor;*
- *Os relatórios podem ser feitos de maneira manuscrita ou digitais;*
- *Trabalhos caracterizados como cópia de textos confeccionados por outros alunos terão nota proporcional à parte desenvolvida pelo próprio aluno.*
- *A entrega poderá ser feita no escaninho do professor;*
- *Entregas atrasadas serão penalizadas em 10% por dia útil e não serão aceitas se o atraso for maior que 7 dias corridos;*
- *O trabalho final será composto por simulação e apresentação em forma de seminário de técnicas de controle de velocidade de MIT.*

## Introdução:

- *O que é um drive?*
- *Principais componentes eletrônicos.*
- *Tipos de drives existentes.*

## O que é um drive?

**Drive é todo tipo de acionamento eletrônico para controlar um dispositivo, o qual pode ser motor trifásico de indução.**

- Por exemplo:
  - *Conversores CA/CC*
  - *Chaves de partida suave (Soft-Starters)*
  - *Conversores de frequência (Inversores)*
  - *Servo Conversores (SCA)*



# Componentes

## Principais componentes de um acionamento eletrônico.

- ***Os componentes mais comuns são:***
  - *Diodos*
  - *Tiristores*
  - *Transistores*

# *Tipos de Drives*

## **Tipos de drives**

**Existem vários tipos de drives.**

- Os mais comuns são:
  - *Conversores CA/CC*
  - *Chaves de partida suave (Soft-Starters)*
  - *Conversores de frequência (Inversores)*
  - *Servo Conversores (SCA)*

# *Tipos de Drives*

## **Conversores CA/CC**

Os conversores CA/CC são circuitos eletrônicos que podem ser utilizados para controlar a velocidade de motores de corrente contínua.

São alimentados com a rede trifásica alternada e através de uma ponte retificadora trifásica “semicontrolada” (composta de tiristores), ajustam a tensão CC aplicada ao motor de corrente contínua.

# *Tipos de Drives*

## **Chaves de partida Soft-Starters**

As Chaves de partida suave tipo Soft-Starters são acionamentos eletrônicos utilizados para realizar a partida, parada e proteção de motores trifásicos de indução tipo gaiola de esquilo em corrente alternada.

São alimentados com a rede trifásica alternada e através de uma ponte trifásica “semicontrolada”, controlam a tensão CA aplicada aos motores trifásicos de indução tipo gaiola de esquilo em corrente alternada.

# Tipos de Drives

## Servo Acionamento CA

Os Servo acionamentos (SCA) são circuitos eletrônicos utilizados para controlar a velocidade e realizar as proteções dos Servos Motores em corrente alternada.

Tem o princípio de funcionamento dos inversores empregados em motores de indução, porém tem as proteções ajustadas exatamente para o servo motor, por isso somente podem ser utilizados em conjunto com os Servo Motores. Este princípio vale também para todos os outros fabricantes de servo motores e servoacionamentos.

# Tipos de Drives

## Conversores de CC/CA

Os conversores CC/CA (conversores de frequência), denominados erroneamente de “*inversores de frequência*”, são dispositivos eletrônicos utilizados para proteger e variar a velocidade de motores trifásicos de indução tipo gaiola de esquilo em corrente alternada.

Sua estrutura é composta por uma ponte retificadora CA/CC, a diodos na maioria dos inversores, um circuito intermediário em corrente contínua com um banco de capacitores para estabilizar a tensão CC, e um conversor CC/CA a transistores, normalmente do tipo IGBT, para criar a forma de onda com tensão e frequência variável na saída para o motor.

# Introdução

## Principal função do “Inversor”

Embora o termo esteja equivocado, o nome comercial utilizado pelos fabricantes é “Inversor”, e será utilizado no material.

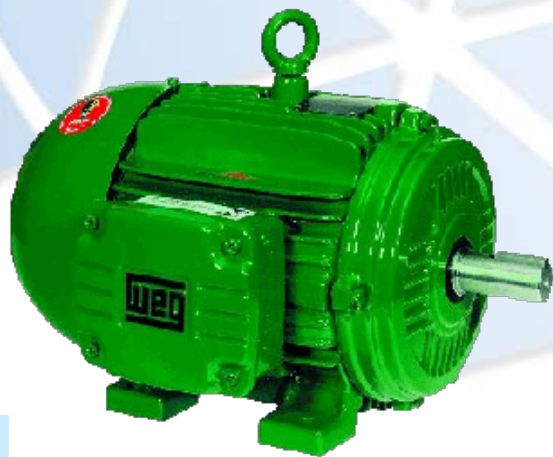


**Variar a velocidade do motor de indução trifásico.**

**Através da frequência**

# Introdução

## Motor de Indução Trifásico



**É utilizado em 70% das aplicações industriais**



# Aplicações

## Aplicações do “Inversor”

Máquinas que utilizem motor de indução e necessitem de:

✓ **Velocidade variável;**

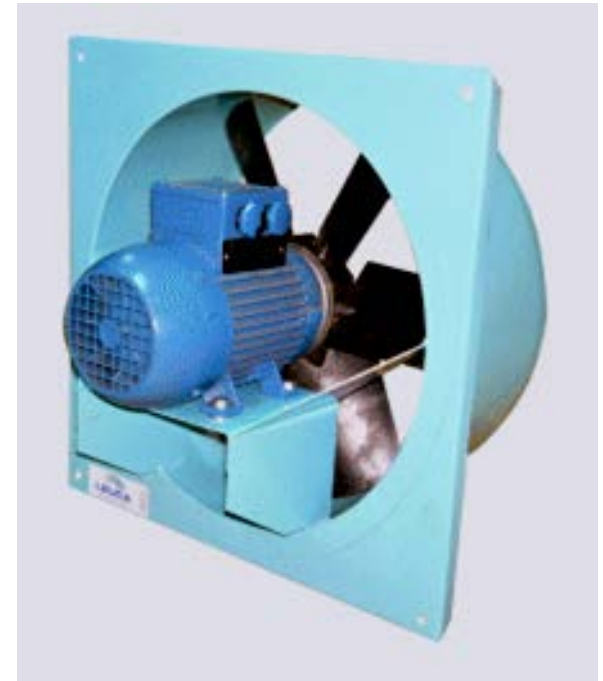
✓ **Controle de torque;**

✓ **Automação;**

✓ **ECONOMIA DE ENERGIA.**

# Aplicações

✓ Esteiras



✓ Ventiladores

# Aplicações

✓ Misturadores



✓ Bombas

# Aplicações

✓ Compressores



# Aplicações

✓ Pontes Rolantes



# Aplicações

✓ Centrífugas de Açúcar



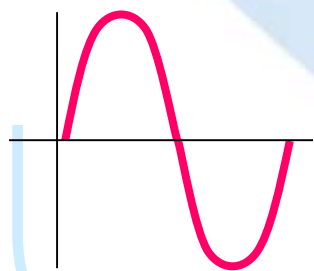
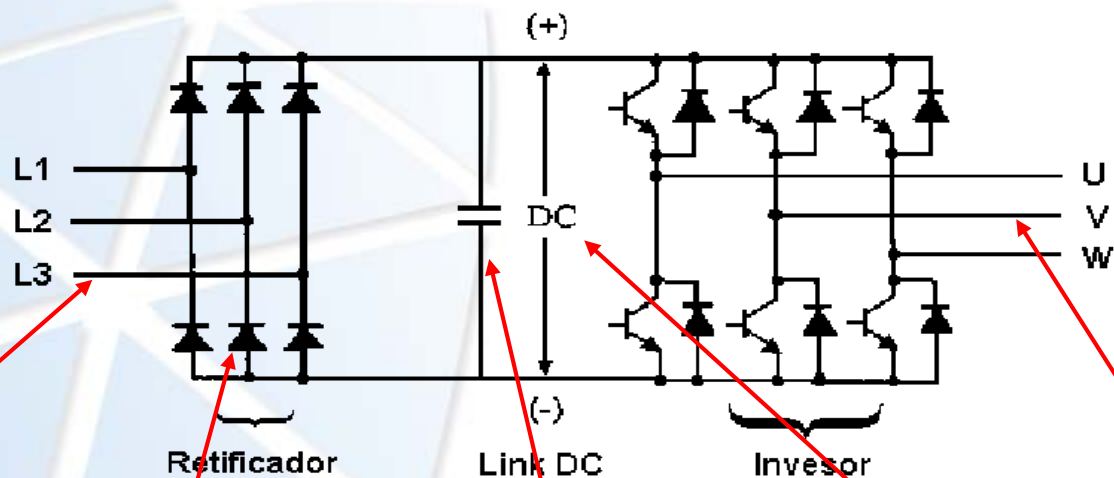
# Variação de Velocidade

## Vantagens do “Inversor”

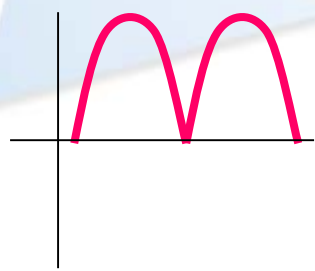
- ✓ **Varia a velocidade do motor mantendo o torque;**
- ✓ **Indica condições de funcionamento do motor;**
- ✓ **Permite comando e controle à distância;**
- ✓ **Protege o motor eletricamente;**
- ✓ **Atende qualquer aplicação com motor de indução;**
- ✓ **Proporciona ECONOMIA DE ENERGIA;**
- ✓ **Pode ser reprogramado infinitas vezes.**

# Variação de Velocidade

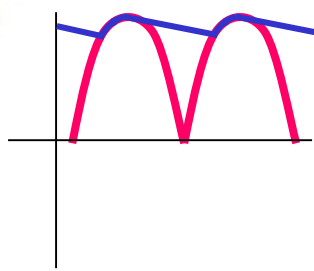
## Retificador 6 Pulsos (Padrão)



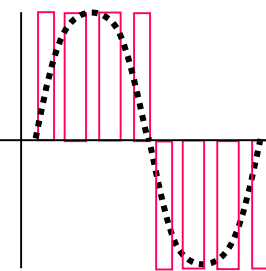
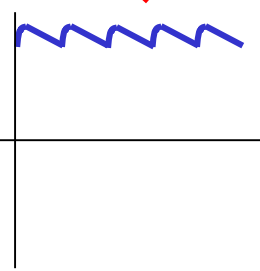
Tensão alternada



Tensão retificada



Tensão contínua no link cc



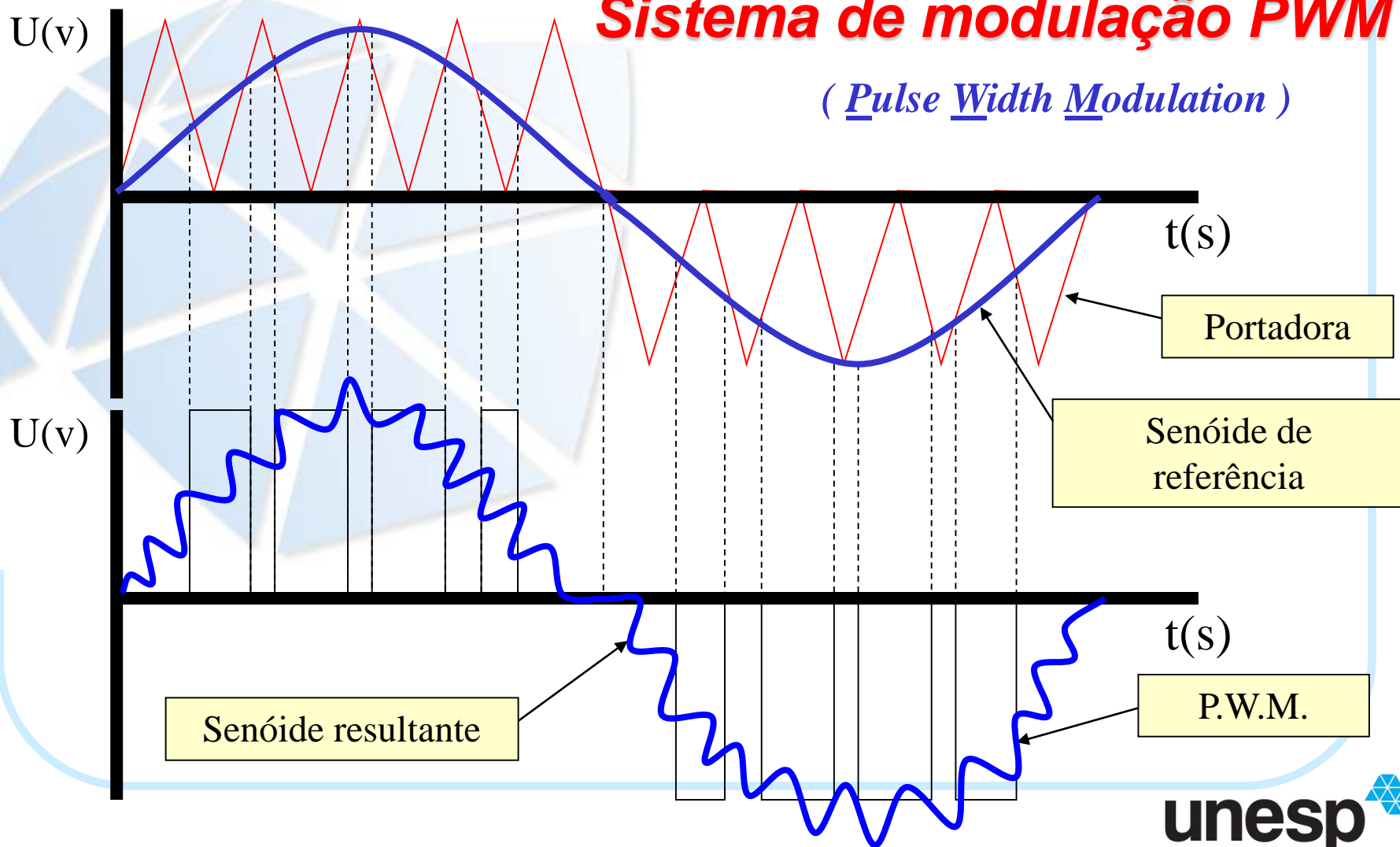
Tensão alternada PWM



# Variação de Velocidade

## Sistema de modulação PWM

( Pulse Width Modulation )



# Variação de Velocidade

## Cálculos do Motor de Indução

$$n = \frac{120 \cdot f \cdot (1-s)}{p}$$

$$\phi \approx \frac{U}{f}$$

$$C \approx \phi \cdot I_2$$

***n*** = Velocidade do motor

***f*** = frequência

***s*** = escorregamento

***p*** = número de pólos

***ϕ*** = fluxo magnético

***U*** = Tensão

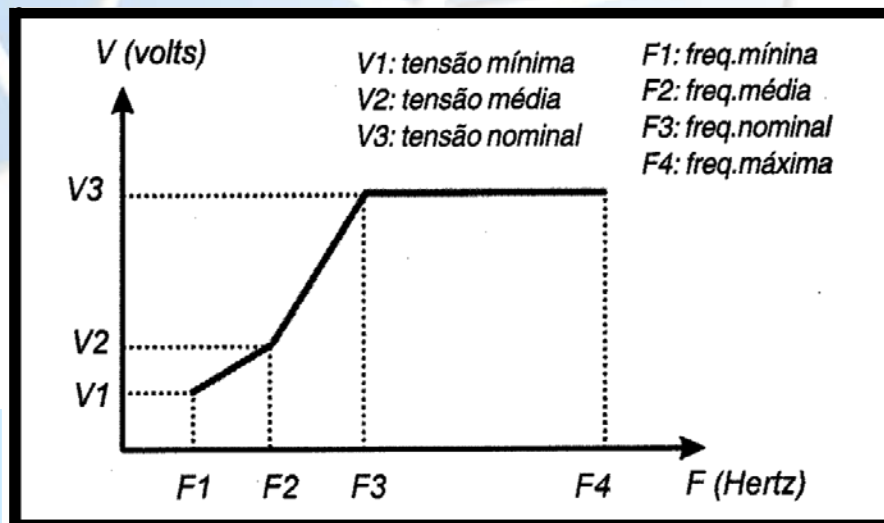
***C*** = torque

***I<sub>2</sub>*** = corrente rotórica

# Variação de Velocidade

## Inversor Escalar

### Curva de Tensão e Frequência



- **Varia a frequência para controlar a velocidade do motor.**
- **Varia a tensão do motor de acordo com a frequência.**
- **Não detecta as variações de rotações devido as variações de carga**

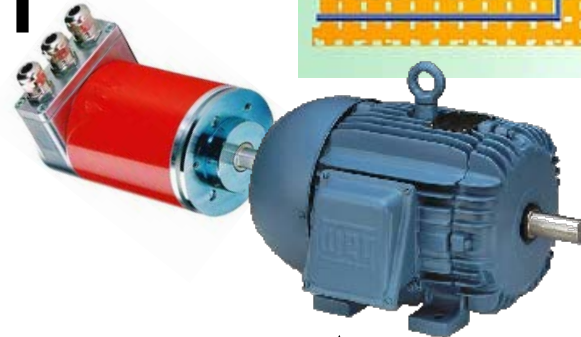
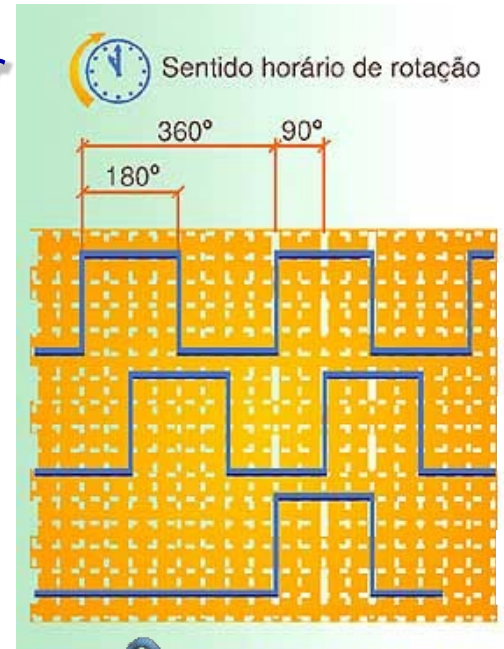
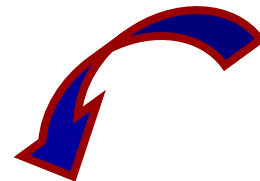
# *Variação de Velocidade*

## **Inversor Vetorial**

- ✓ **Varia a frequência para controlar a velocidade do motor.**
- ✓ **Controla o torque do motor conforme as variações de carga para manter a rotação desejada.**

# Variação de Velocidade

## Inversor Vetorial com Encoder



# Variação de Velocidade

## Inversor Vetorial Sensorless



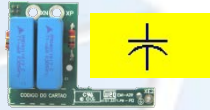
# Variação de Velocidade

## Performance dos tipos de controle

<b>Item</b>	<b>Inversores Escalares</b>	<b>Inversores Vetoriais</b>	
		<b>Sensorless</b>	<b>C/ encoder</b>
<b>Faixa ideal de trabalho</b>	<i>De 6Hz a 60Hz</i>	<i>De 3Hz a 60Hz</i>	<i>De 0,5Hz a 60Hz</i>
<b>Regulação de velocidade</b>	<i>Depende do escorregamento (+/- 1%)</i>	<i>0,5 %</i>	<i>0,01 %</i>
<b>Resposta dinâmica</b>	<i>0,5 a 1 s</i>	<i>0,2 s</i>	<i>0,03 s</i>
<b>Controle de torque</b>	<i>Não disponível</i>	<i>Limitado</i>	<i>Disponível</i>
<b>Torque com velocidade zero</b>	<i>Não disponível</i>	<i>Não disponível</i>	<i>Disponível</i>

# Características CFW11

**Filtro de RFI**  
Evitar Interferência  
eletromagnética - EMI



**Incorporado**  
Indutores no link  
CC (+UD e -UD)

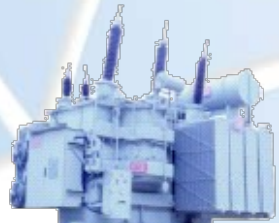


Superdrive/SoftPLC



Rede

I/Os



PE | R | S | T - BR + U | V | W | PE



PE | U | V | W

Fusíveis Ultra -  
Rápido (aR)

Contator


Relé  
Térmico

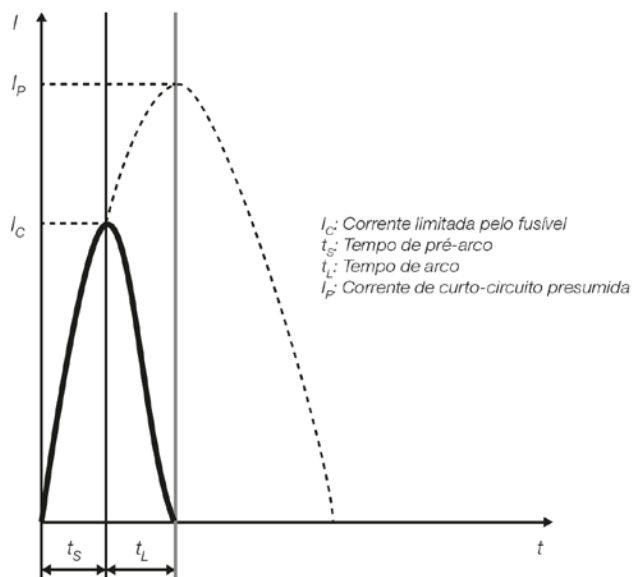
Resistor de  
Frenagem

Distâncias > 100m

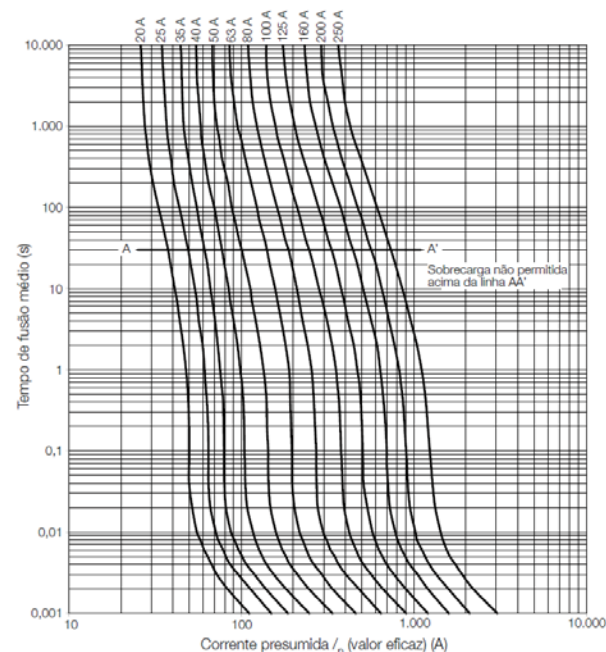


# Características CFW11

	Referência	Corrente (A)	Pt - pré-arco	Pt total - arco
			690 V CA (A <sup>2</sup> s)	
	FNH00-20K-A	20	16	240
	FNH00-25K-A	25	19	255
	FNH00-35K-A	35	23	430
	FNH00-40K-A	40	56	580
	FNH00-50K-A	50	130	1.430
	FNH00-63K-A	63	180	2.170
	FNH00-80K-A	80	270	2.710
	FNH00-100K-A	100	400	4.530
	FNH00-125K-A	125	810	6.350
	FNH00-160K-A	160	2.100	15.270
FNH00-200K-A	200	2.900	25.870	
FNH00-250K-A	250	6.200	43.980	



Fusíveis FNH00 aR

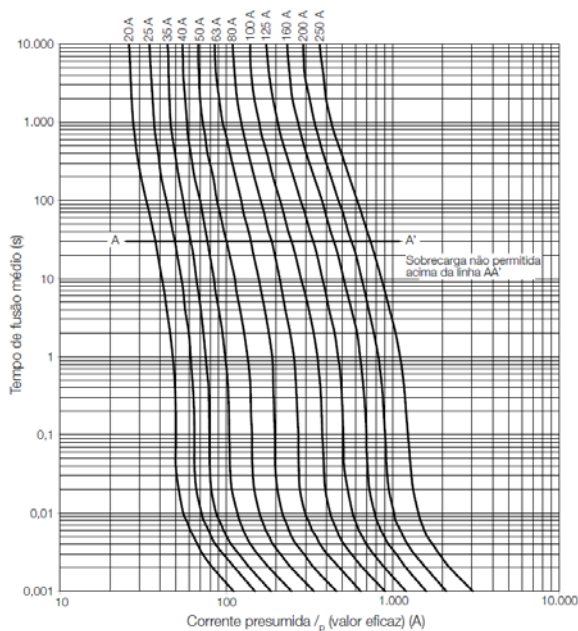


# Características CFW11

Referência	Corrente (A)	PI - pré-arco	PI total - arco
		690 V CA (A%)	
FNH00-20K-A	20	16	240
FNH00-25K-A	25	19	255
FNH00-35K-A	35	23	430
FNH00-40K-A	40	56	580
FNH00-50K-A	50	130	1.430
FNH00-63K-A	63	180	2.170
FNH00-80K-A	80	270	2.710
FNH00-100K-A	100	400	4.530
FNH00-125K-A	125	810	8.350
FNH00-160K-A	160	2.108	15.270



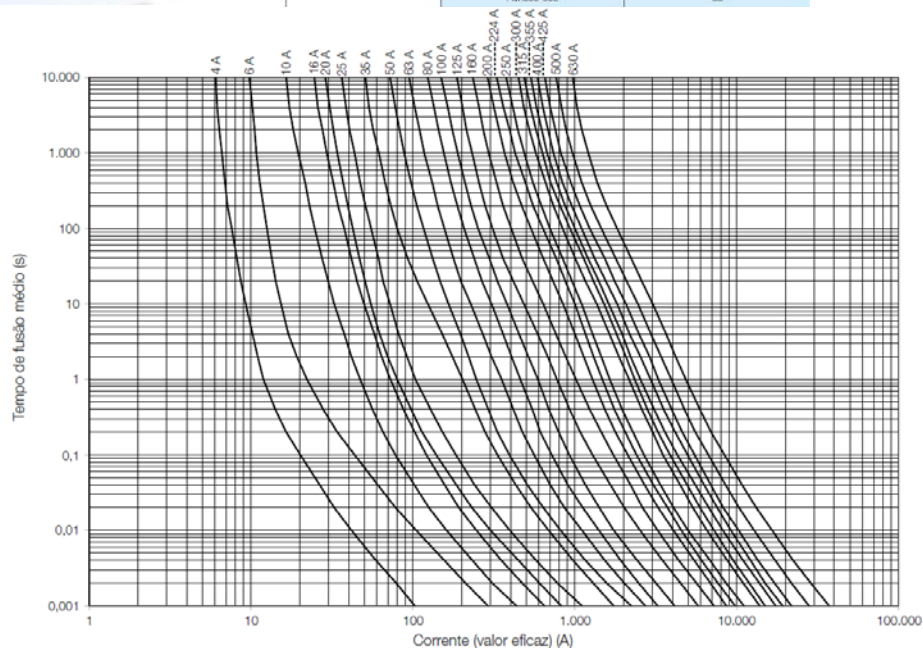
Fusíveis FNH00 aR



Fusível NH Contato Faca gL/gG - Retardado



Referência	Corrente (A)
FNH00-4U	4
FNH00-6U	6
FNH00-10U	10
FNH00-16U	16
FNH00-20U	20
FNH00-25U	25
FNH00-35U	35
FNH00-50U	50
FNH00-63U	63
FNH00-80U	80



Fusíveis com Contato Faca gL/gG FNH000, FNH00, FNH1, FNH2 e FNH3

# THD


$$FP = \cos(\varphi_1)$$

# THD

$$FP = \frac{P[W]}{S[VA]} = \frac{\cos(\varphi_1)}{\sqrt{1 + THD_i^2}}$$

**FP** = Fator de potência

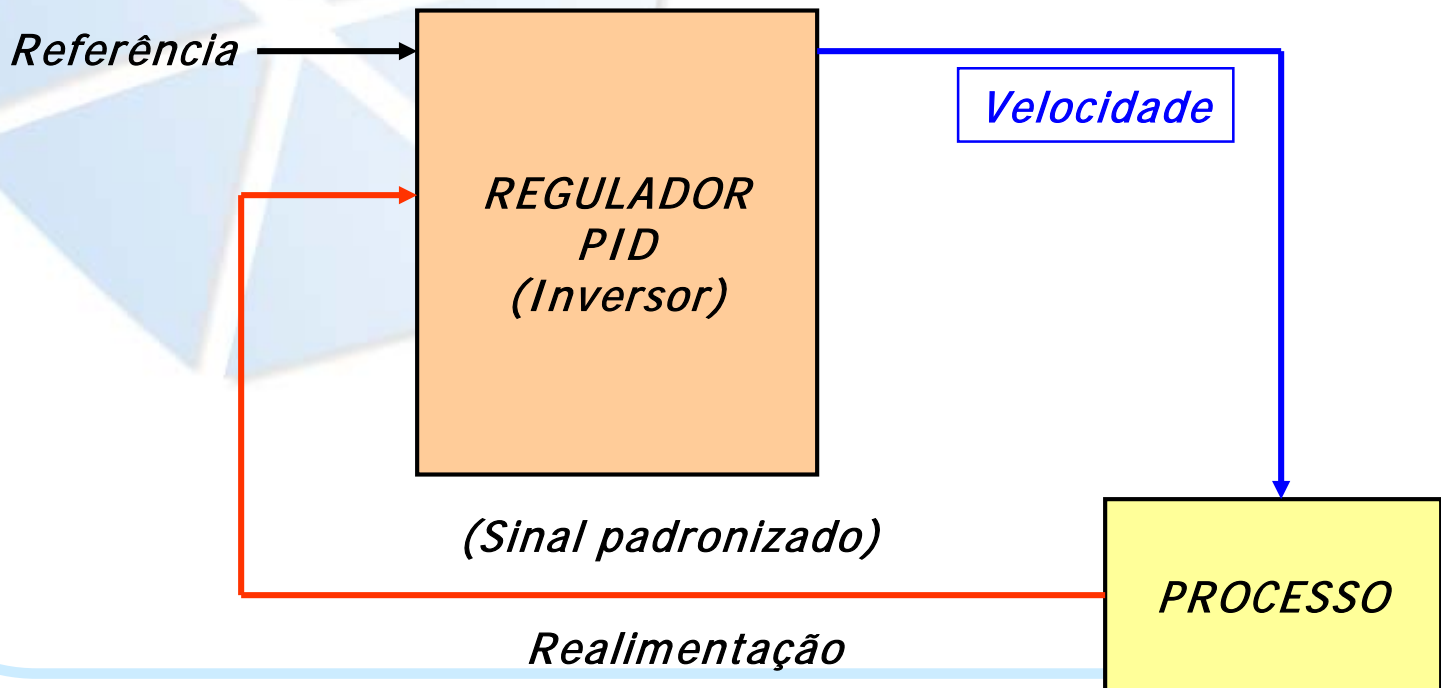
**$\cos(\varphi_1)$**  = Deslocamento de fase entre  $v_1$  e  $i_1$

**$THD_i$**  = Taxa de distorção harmônica em corrente

# Funções Especiais

## Regulador PID

Esta função destina-se a aplicações onde há necessidade do controle de uma variável do processo (vazão, pressão, nível, peso, etc) indiretamente pela variação da velocidade do motor.

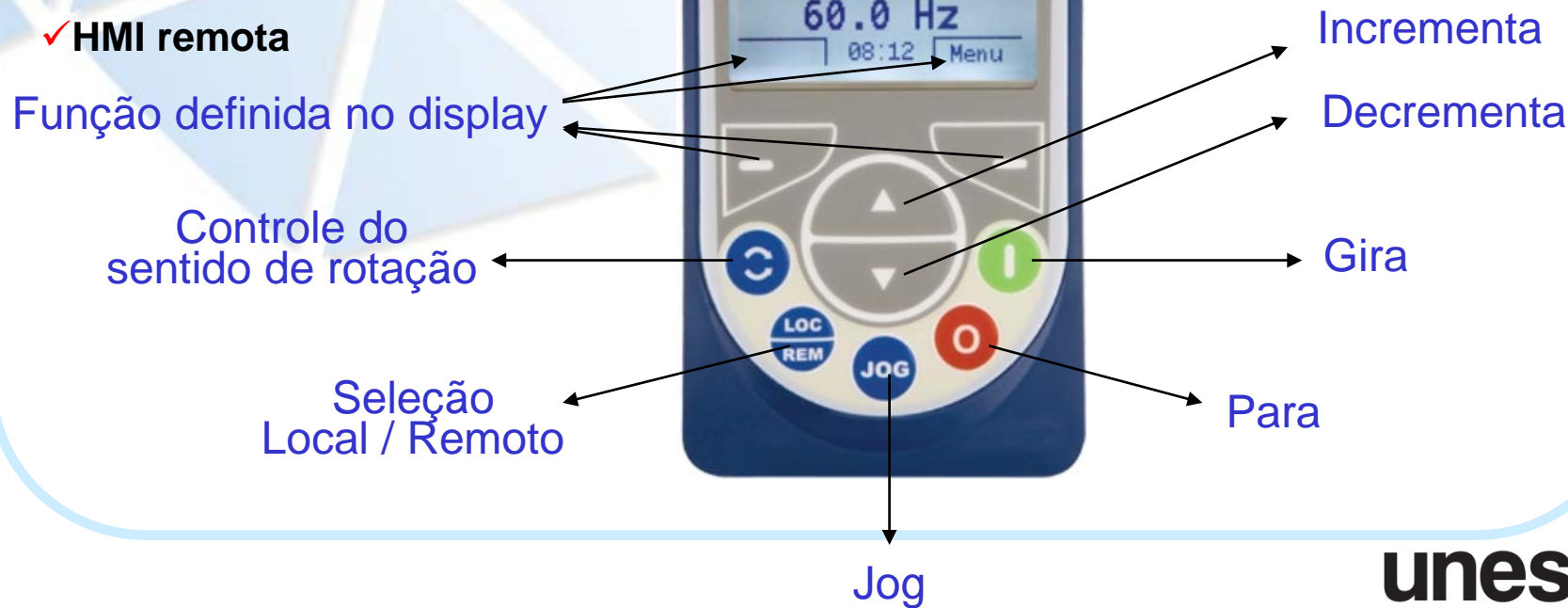




**CARACTERÍSTICAS  
GERAIS  
DOS  
CFW11**

# Características CFW11

- ✓ Display gráfico
- ✓ Soft Keys para fácil operação
- ✓ Backlight
- ✓ Relógio em tempo real
- ✓ Função copy
- ✓ Plug-in
- ✓ Seleção de idiomas
- ✓ HMI remota



# Características CFW11



## Indicação modo:

- LOC: modo local;
- REM: modo remoto.

Indicação da velocidade do motor em rpm.

## Status

- Run
- Ready
- Configuração
- Ajuste
- Última falha
- Último alarme

Run	e LOC	1800rpm
1800	rpm	
1.0	A	
60.0	Hz	
	12:35	Menu

## Parâmetros de monitoração:

- P0205;
- P0206;
- P0207.

## Indicação da hora.

Ajuste em:  
P0197, P0198 e P0199.

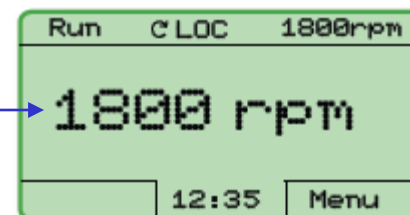
Funções das soft keys.



# Características CFW11



Conteúdo de um dos parâmetros definidos em P0205, P0206 ou P0207 com números maiores.



**Obs.:** Parâmetros não mostrados devem ser programados para 0 em P0205, P0206 ou P0207.

# Características CFW11



## Parâmetros de monitoração:

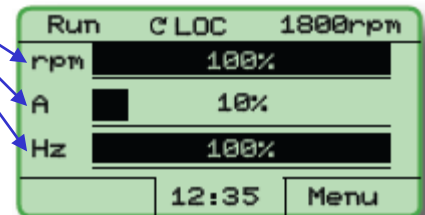
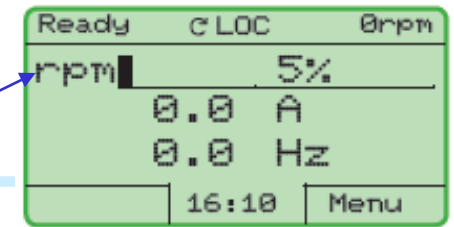
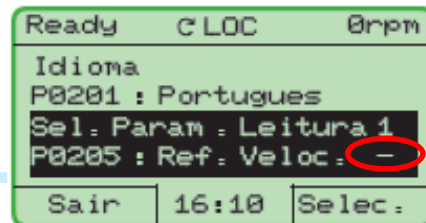
- Velocidade do motor em rpm;
- Corrente do motor em Amps;
- Frequência de saída em Hz.

P0205, P0206 e P0207: seleção dos parâmetros que serão mostrados no modo monitoração.

P0208 a P0212: unidade de engenharia para indicação de velocidade [rpm].

**Obs.:** Para configurar a monitoração no modo gráfico de barras, acesse os parâmetros P0205, P0206 e/ou P0207 e selecione as opções finalizadas com o sinal – (valores na faixa de 11 a 20).

**Ex.:**



# Características CFW11

O “inversor de frequência” CFW-11 incorpora a tecnologia **Plug and Play**.

Reconhece e configura automaticamente os acessórios e opcionais utilizados, possibilitando fácil instalação, operação segura, dispensando a configuração manual.



# Características CFW11



**Módulo de  
Memória FLASH**

**Slot 5**

**Slot 1**

**Slot 2**

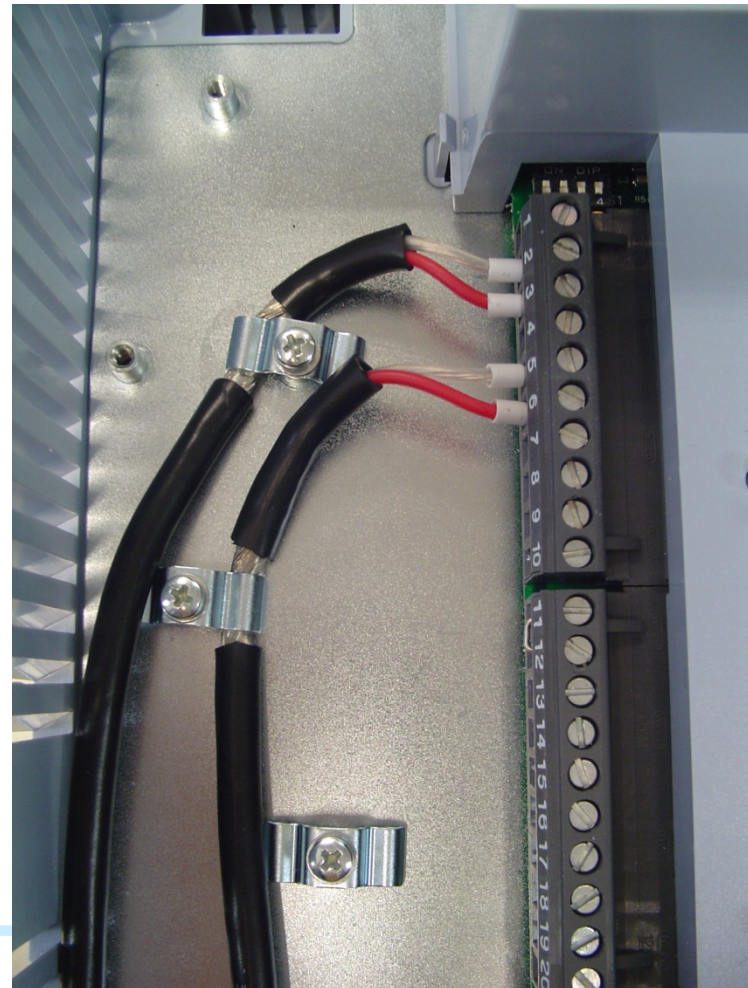
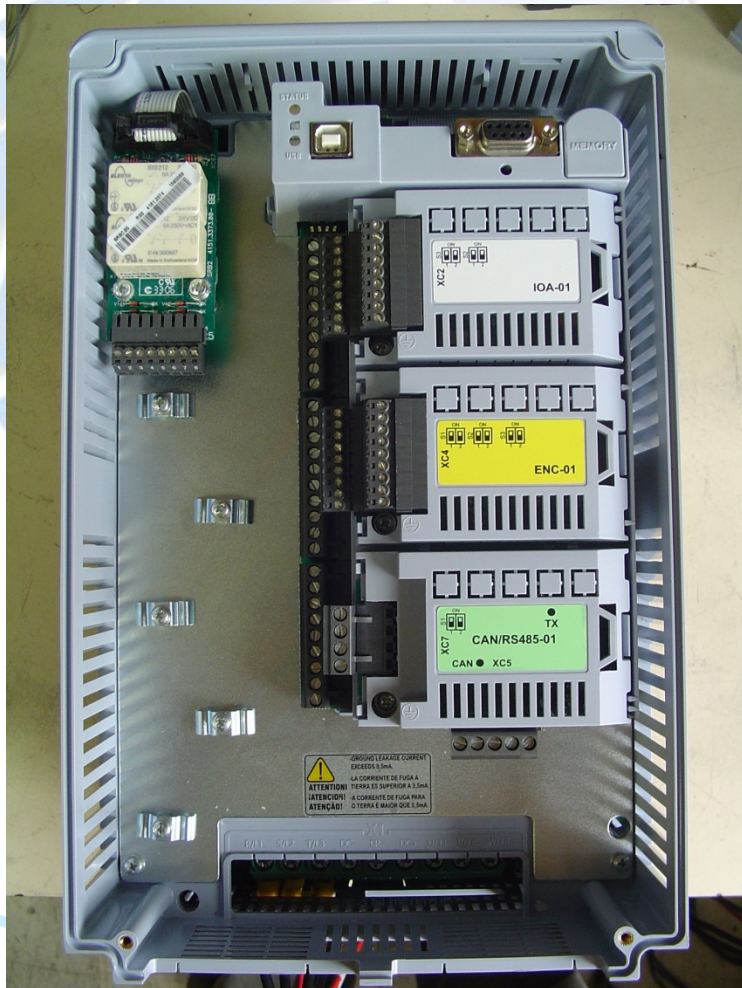
**Slot 3**

**Slot 4**

# Características CFW11

## BLINDAGEM DOS CABOS DE CONTROLE

### Bornes de controle plug-in



# Características CFW11

## Software para parametrização comando e monitoração dos inversores

- Programação, comando e monitoração
- Lê parâmetros do drive
- Escreve parâmetros no drive
- Conexão USB
- Função Trace / Scope
- Documentação da aplicação



# Características CFW11



**SuperDrive**  
Project Drive Help

CFW11v0.54404607A5.5A  
Drive Network  
CFW-11 V0.50 440-460 V 7A / 5.5A

**Monitor Parameters: Address 1**

Number	Function	Minimum	Maximum	Factory Se...	User Setting	Unit
0	Access to Par...	0	9999	0	5	
1	Speed Refere...	0	18000	0	90	rpm
2	Motor Speed	0	18000	0	0	rpm
3	Motor Current	0	4000	0	0	A
4	DC Link Volta...	0	2000	0	528	V
5	Motor Freque...	0	300	0	0	Hz
6	VFD Status	0	5	0: Ready	0: Ready	
7	Motor Voltage	0	2000	0	0	V
9	Motor Torque	-1000	1000	0	0	%
10	Output Power	0	6553,5	0	0	kW
12	DI1 to DI8 St...	0	255	0	0	
13	DO1 to RL3 S...	0	248	0	32	
1R	AI1 Value	-100	100	0	5	%

**Monitor Using HMI**  
Parameter: 2  
User Setting: 0  
Unit: rpm  
Function: Motor Speed

JOG

24 ms

**Monitor Speed Reference**

Parameter: 683  
User Setting: 3749  
Minimum: 0  
Maximum: 65535  
New User Setting: 3749

6 ms

**Monitor Status**

Ready

Forward

Local

General Enabling

Ramp Enabling

Jog

44 ms  Always on top

**Monitor Using HMI**

Parameter: 2  
User Setting: 0  
Unit: rpm  
Function: Motor Speed

JOG

LOC REM

0

RESET

12 ms  Always on top

**Monitor Parameters: Address 1**

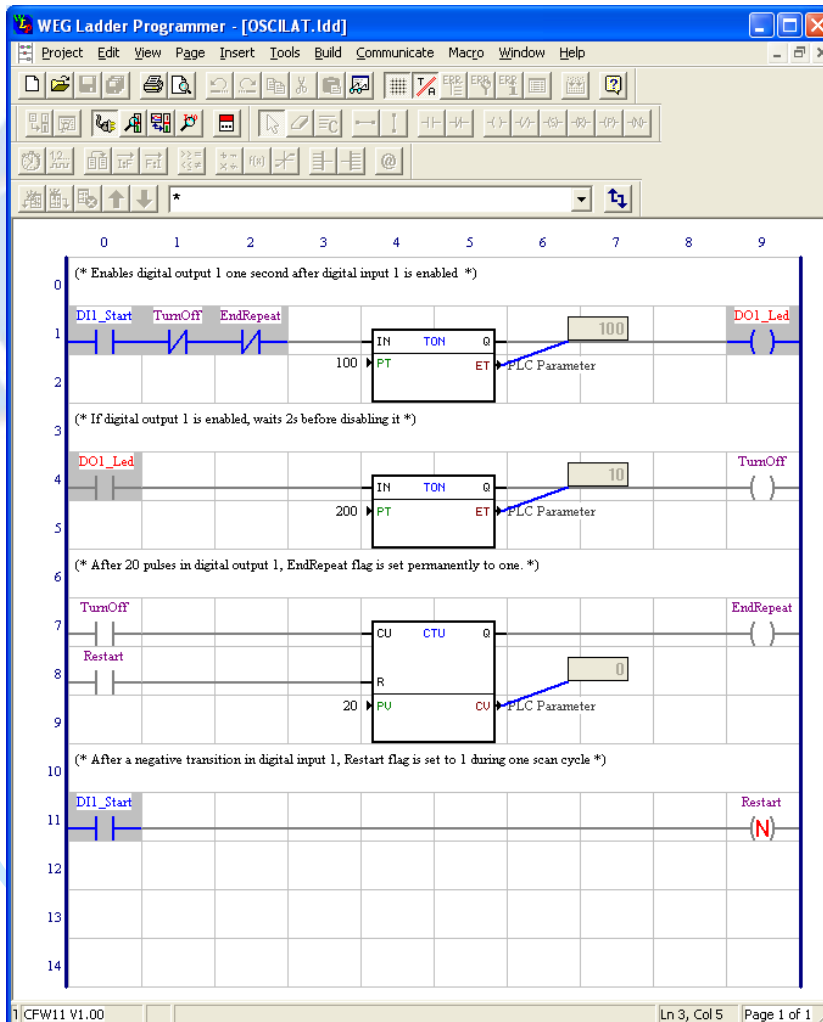
Number	Function	Minimum	Maximum	Factory Se...	User Setting	Unit
0	Access to Par...	0	9999	0	5	
1	Speed Refere...	0	18000	0	824	rpm
2	Motor Speed	0	18000	0	0	rpm
3	Motor Current	0	4000	0	0	A
4	DC Link Volta...	0	2000	0	528	V
5	Motor Freque...	0	300	0	0	Hz
6	VFD Status	0	5	0: Ready	0: Ready	
7	Motor Voltage	0	2000	0	0	V
9	Motor Torque	-1000	1000	0	0	%
10	Output Power	0	6553,5	0	0	kW
12	DI1 to DI8 St...	0	255	0	0	
13	DO1 to RL3 S...	0	248	0	40	
1R	AI1 Value	-100	100	0	5	%

Always on top

Ok Cancel

# Características CFW11

**SoftPLC** é um recurso que incorpora ao inversor CFW11 as funcionalidades de um CLP, agregando flexibilidade ao usuário e permitindo-lhe desenvolver seus próprios aplicativos (programas do usuário). **Incorporado no inversor padrão**



## Exemplo de Aplicação

