

Tese realizada sob orientação de
Professor Doutor Sílvio José Pinto Simões Mariano

Professor Auxiliar do
Departamento de Engenharia Electromecânica da
UNIVERSIDADE DA BEIRA INTERIOR

*Dedico este trabalho, como tudo o que realizo,
à sempre presente no meu coração e no meu pensamento,
Lénia.*

*Aos meus queridos pais, Manuel e Maria
e irmão, Carlos,
que sempre me apoiaram e deram força,
para superar os momentos de dificuldade durante o mestrado.*

Quem conhece a sua ignorância revela a mais profunda sapiência.

Quem ignora a sua ignorância vive na mais profunda ilusão.

Lao-Tsé

RESUMO

Este trabalho tem como objectivo principal o desenvolvimento do arranque e controlo de velocidade do motor de indução utilizando técnicas de automação. Efectuou-se inicialmente um estudo sobre o motor e as suas características, bem como as técnicas tradicionais de controlo. Numa fase posterior contrapôs-se as técnicas tradicionais de controlo do motor de indução com os dispositivos electrónicos actuais, quer seja, o soft-starter como também o inversor de frequência.

Foi estudado também o soft-starter, o inversor de frequência, bem como o autómato, com vista a implementação prática. Implementação essa realizada de forma genérica, ou seja, com a possibilidade de se adaptar aos mais diversos processos, quer industriais ou comerciais.

Desta forma aperfeiçoamos a automação do arranque e controlo de velocidade do motor de indução presente em muitos processos industriais. Consequentemente optimizamos os processos industriais e com isso aumentamos a segurança, produtividade e qualidade do produto final.

PALAVRAS CHAVE

Automação, Autómato Programável, Controlo Velocidade, Inversor de Frequência, Motor de Indução, Soft-Starter.

ABSTRACT

The aim of this work is to develop the start and speed control of an induction motor using automation techniques.

First, a study was carried on the motor and its characteristics, as well as the traditional control techniques. Later, traditional control techniques of the induction motor were compared to current electronic devices, both in terms of the soft-starter and the variable speed drive.

The soft-starter, the variable speed drive, as well as the programmable controller were also studied with a view to their implementation. The implementation was carried out in general, that is, with the possibility of adapting it to the most diverse industrial or commercial processes.

Thus, we improved the automation of the start and speed control of the induction motor in many industrial processes. Consequently we optimized the industrial processes and thereby increased safety, productivity and the quality of the final product.

KEYWORDS

Automation, Programmable Controller, Speed Control, Variable Speed Drive, Induction Motor, Soft-Starter.

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Sílvio José Pinto Simões Mariano, Professor Auxiliar no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, pela honra de desenvolvermos juntos este trabalho e pela oportunidade de crescimento profissional, adquirido através dos importantes ensinamentos transmitidos, fruto dos seus profundos conhecimentos neste tema.

À Professora Doutora Maria do Rosário Alves Calado, Professora Auxiliar no Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior, desejo expressar o meu agradecimento pelo interesse continuado que manteve sobre o trabalho desenvolvido, bem como, pela cedência de material bibliográfico, contribuindo assim para o sucesso do mesmo.

Aos restantes docentes e funcionários do Departamento de Engenharia Electromecânica da Universidade da Beira Interior desejo expressar o meu agradecimento pelo apoio e incentivo sempre demonstrado.

Aos colegas e amigos, criados ao longo dos anos dentro e fora da universidade, em especial ao Sérgio José do Vale Martins, desejo manifestar o meu agradecimento pelo apoio e convivência amiga.

A todos aqueles que contribuíram directa ou indirectamente para a elaboração desta dissertação desejo ainda expressar o meu agradecimento.

ÍNDICE

RESUMO	I
ABSTRACT	II
AGRADECIMENTOS	IV
ÍNDICE	VII
LISTA DE TABELAS	XIII
LISTA DE FIGURAS	XIII
ABREVIATURAS.....	XV
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 ENQUADRAMENTO	1
1.2 OBJECTIVOS	2
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	3
2. MOTOR DE INDUÇÃO	4
2.1 INTRODUÇÃO	4
2.2 PARTES PRINCIPAIS DO MOTOR ASSÍNCRONO	6
2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	8
2.4 VELOCIDADE E ESCORREGAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO	10
2.5 POTÊNCIA E BINÁRIO DOS MOTORES DE INDUÇÃO.....	11
2.6 PONTO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	12
2.7 CARACTERÍSTICAS NOMINAIS.....	13
2.7.1 Potência Nominal	13
2.7.2 Tensão Nominal	13
2.7.3 Corrente Nominal.....	14
2.7.4 Frequência Nominal	14
2.7.5 Binário Nominal.....	14
2.7.6 Velocidade Nominal	15
2.7.7 Rendimento Nominal	15
2.7.8 Factor de Serviço	15
2.8 BALANÇO ENERGÉTICO DO MOTOR DE INDUÇÃO.....	16
2.9 ARRANQUE DOS MOTORES DE INDUÇÃO.....	17
2.9.1 Arranque Directo	17
2.9.2 Arranque Estatórico com Resistências	18
2.9.3 Arranque com Autotransformador	18
2.9.4 Arranque Estrela-Triângulo	19
2.9.5 Arranque Electrónico	20

3.	SOFT-STARTER.....	23
3.1	INTRODUÇÃO	23
3.2	CARACTERÍSTICAS	24
3.3	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	26
3.4	CIRCUITO DE POTÊNCIA	27
3.5	CIRCUITO DE CONTROLO.....	29
3.6	PARAMETRIZAÇÃO E FUNÇÕES DO SOFT-STARTER	29
3.6.1	Rampa da Tensão de Aceleração	29
3.6.2	Rampa da Tensão de Desaceleração	30
3.6.3	Função Boost	31
3.6.4	Função Limite de Corrente	32
3.6.5	Função <i>Pump Control</i>	33
3.6.6	Função Economia de Energia	34
3.7	PROTECÇÕES DO SOFT-STARTER.....	35
3.7.1	Falta de Fase	35
3.7.2	Curto-Circuito	35
3.7.3	Sobre-Corrente.....	35
3.7.4	Protecção Térmica	36
3.8	CIRCUITO <i>BY PASS</i>	36
4.	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	37
4.1	INTRODUÇÃO	37
4.2	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO.....	37
4.3	CURVAS CARACTERÍSTICAS	41
4.4	INVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE.....	43
4.5	INVERSOR DE FREQUÊNCIA PWM.....	44
4.6	HARMÓNICOS.....	46
4.7	INTERACÇÃO ENTRE A REDE E O INVERSOR	48
4.8	INTERACÇÃO ENTRE CONVERSOR E MOTOR	49
4.9	CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO RENDIMENTO	50
4.10	MÉTODOS DE CONTROLO DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM.....	51
4.10.1	Controlo Escalar.....	51
4.10.2	Controlo Vectorial	54
4.11	INTERACÇÃO ENTRE O MOTOR/INVERSOR E O TIPO DE CARGA	56
4.11.1	Cargas com Binário Variável	56
4.11.2	Cargas com Binário Constante.....	57
4.11.3	Cargas com Potência Constante	58
5.	AUTÓMATOS PROGRAMÁVEIS.....	59
5.1	INTRODUÇÃO	59
5.2	HISTÓRIA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS.....	60
5.3	CARACTERÍSTICAS DOS PLC'S	62
5.4	ARQUITECTURA DOS PLC'S	63
5.4.1	CPU.....	64
5.4.2	Sistema de Entradas e Saídas	64
5.5	INTERFACE DE COMUNICAÇÃO.....	67
5.5.1	Memória.....	68
5.5.2	Variações na Arquitectura.....	69
5.6	PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PLC'S	70
5.7	LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO PARA AUTÓMATOS	71
5.8	LINGUAGEM DE DIAGRAMA DE CONTACTOS	73
5.9	INSTRUÇÕES DO TIPO RELÉ.....	74
5.10	INSTRUÇÕES DE TEMPORIZAÇÃO E CONTAGEM.....	76
5.10.1	Descrição dos Contadores	76
5.10.2	Descrição dos Temporizadores	79
5.11	INSTRUÇÕES DE MANIPULAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE DADOS	82
5.12	INSTRUÇÕES ARITMÉTICAS	82

5.13	INSTRUÇÕES DE CONTROLO DO PROGRAMA.....	82
6.	IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA.....	84
6.1	INTRODUÇÃO	84
6.2	MOTOR DE INDUÇÃO UTILIZADO	84
6.3	SOFT-STARTER ALTISTART 01	85
6.3.1	Descrição	85
6.3.2	Características Eléctricas	87
6.3.3	Circuito de Controlo	88
6.3.4	Circuito de Potência	90
6.4	INVERSOR DE FREQUÊNCIA ALTIVAR 11	92
6.4.1	Descrição	92
6.4.2	Características Eléctricas	95
6.4.3	Circuito de Controlo	96
6.4.4	Circuito de Potência	98
6.5	AUTÓMATO TWIDO	100
6.5.1	Circuitos de Entradas e Saídas	100
6.5.2	Software Desenvolvido	101
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
7.1.	CONCLUSÕES	104
7.2.	RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	105
8.	REFERÊNCIAS	106
9.	ANEXOS	109
9.1	ANEXO A	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Classificação dos harmónicos	47
Tabela 4.2 - Métodos e características de redução dos harmónicos	50
Tabela 5.1 - Características dos contadores	77
Tabela 5.2 - Características dos temporizadores	80
Tabela 6.1 - Correspondência entre a designação dos contactos e as diferentes funções	86

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Detalhes de um motor de indução trifásico	7
Figura 2.2 - Chapa de características de um motor de indução trifásico	8
Figura 2.3 - Enrolamento Monofásico	8
Figura 2.4 - Enrolamento Trifásico	8
Figura 2.5 - Sistema trifásico de tensões	9
Figura 2.6 - Campo magnético resultante	9
Figura 2.7 - Ponto de Funcionamento do Motor de Indução	12
Figura 2.8 - Balanço energético de um motor eléctrico	16
Figura 2.9 - Principais perdas num motor de indução	17
Figura 2.10 - Curvas de binário e corrente no arranque estrela-triângulo [WEG, 2009]	20
Figura 3.1 - Relação de binário e corrente do motor utilizando soft-starter e arranque directo	24
Figura 3.2 - Comparação entre alguns métodos de arranque	25
Figura 3.3 - Esquema simplificado do soft-starter	26
Figura 3.4 - Disparo dos tiristores a 150°	27
Figura 3.5 - Disparo dos tiristores a 90°	27
Figura 3.6 - Disparo dos tiristores a 45°	28
Figura 3.7 - Disparo dos tiristores a 15°	28
Figura 3.8 - Rampa da tensão de arranque	28
Figura 3.9 - Rampa da tensão de desaceleração	29
Figura 3.10 - Rampa da tensão aplicada ao motor na aceleração	30
Figura 3.11 - Comportamento da tensão na desaceleração	31
Figura 3.12 - Representação gráfica da função "Boost"	32

Figura 3.13 - Limite da corrente	33
Figura 3.14 - Equilíbrio entre o conjugado e a tensão	34
Figura 4.1 - Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a frequência fundamental da tensão de alimentação	38
Figura 4.2 - Esquema eléctrico dos componentes de um inversor de frequência	38
Figura 4.3 - Curva representativa da tensão em função da frequência	41
Figura 4.4 - Curva características de binário em função da frequência	42
Figura 4.5 - Curva característica da potência de saída do inversor de frequência	42
Figura 4.6 - Configuração do circuito inversor e ligação ao motor	43
Figura 4.7 - Inversor de tensão trifásico.....	43
Figura 4.8 - Forma das tensões de saída do inversor	44
Figura 4.9 - Modulação por largura de impulsos.....	45
Figura 4.10 - Modulação por largura de impulsos e formas de onda da tensão	46
Figura 4.11 - Corrente à entrada de um inversor PWM	48
Figura 4.12 - Tensão PWM aos terminais do motor	49
Figura 4.13 - Corrente aos terminais do motor	49
Figura 4.14 - Potência útil no motor em função da frequência de trabalho	51
Figura 4.15 - Variação da tensão Versus Frequência com corrente constante	53
Figura 4.16 - Compensação da corrente com o aumento da resistência	53
Figura 4.17 - Variação quadrática do binário	56
Figura 4.18 - Variação linear do binário	57
Figura 4.19 - Cargas de binário constante	57
Figura 4.20 - Cargas de potência constante	58
Figura 5.1 - Arquitectura de um autómato programável	63
Figura 5.2 - Esquema eléctrico de uma entrada analógica	65
Figura 5.3 - Esquema eléctrico de uma entrada digital	66
Figura 5.4 - Esquema eléctrico de uma saída analógica	66
Figura 5.5 - Esquema eléctrico de uma saída digital a relé.....	67
Figura 5.6 - Esquema eléctrico de uma saída digital a transístor	67

Figura 5.7 - Esquema eléctrico de uma saída a triac	67
Figura 5.8 - Ciclo de funcionamento de um PLC	70
Figura 5.9 - Exemplos básicos de programas escritos utilizando as linguagens da norma IEC	72
Figura 5.10 - Exemplo de um programa básico em SFC	72
Figura 5.11 - Malha num diagrama de contactos.....	73
Figura 5.12 - Exemplos de contador ascendente	78
Figura 5.13 - Exemplo de contador descendente	79
Figura 5.14 - Exemplo de contador ascendente/descendente.....	79
Figura 5.15 - Temporizador com atraso à operação - TON (On-Delay Timer).....	81
Figura 5.16 - Temporizador com atraso ao cancelamento da operação - TOF (Off-Delay Timer)	81
Figura 5.17 - Temporizador por impulsos – TP (Pulse Timer).....	81
Figura 6.1 - Motor de indução trifásico da LN	85
Figura 6.2 - Descrição do soft-starter Altistart 01	86
Figura 6.3 - Variação da tensão quando aplicamos a função BOOST	87
Figura 6.4 - Esquema de ligação com comando a dois fios	88
Figura 6.5 - Esquema temporal do comando a dois fios	88
Figura 6.6 - Esquema de ligação no comando a três fios	89
Figura 6.7 - Esquema temporal do comando a três fios	89
Figura 6.8 - Circuito de potência soft-starter + motor	91
Figura 6.9 - Painel frontal do Altivar 11	92
Figura 6.10 - Bornes de controlo	93
Figura 6.11 - Exemplo de funcionamento com 4 velocidades pré-seleccionadas.....	94
Figura 6.12 - Exemplo da segunda rampa com a entrada LI4.....	94
Figura 6.13 - Esquema de ligação no comando a dois fios	96
Figura 6.14 - Esquema de ligação no comando a três fios	97
Figura 6.15 - Esquema temporal do comando a três fios	97
Figura 6.16 - Circuito de potência do inversor de frequência + motor	99
Figura 6.17 - Esquema das entradas no autómato.....	100
Figura 6.18 - Esquema das saídas no autómato	101

ABREVIATURAS

AC - Corrente Alternada

ADC - Conversor Analógico/Digital

CPU - Unidade Central de Processamento

DAC - Conversor Digital/Analógico

DC - Corrente Contínua

E/S - Entrada/Saída

EEPROM - Electrically-Erasable Programmable Read-Only Memory

EPROM - Erasable Programmable Read-Only Memory

F.E.M. - Força Electromotriz

FBD - Function Block Diagram

IEC - International Electrotechnical Commission

IHM - Interface Homem Máquina

IL - Instruction List

LD - Ladder Diagram

LN - Lucas Nulle

PC - Computador Pessoal

PID - Proporcional Integral Diferencial

PLC - Programmable Logic Controller

PWM - Pulse Width Modulation

RAM - Random Access Memory

RMS - Root Mean Square

SCR - Silicon Controlled Rectifier

SFC - Sequential Function Chart

ST - Structured Text

SVM - Space Vector Modulation

TCP - Transmission Control Protocol

TCS - Torque Control System

THD - Distorção Harmónica Total

INTRODUÇÃO

1.1 ENQUADRAMENTO

A competitividade dos mercados mundiais imposta pela actualmente globalização e pela grave crise económica, obriga as empresas a uma constante busca pela qualidade e maior produtividade com custos mais reduzidos. Isto leva a procurar soluções tecnológicas com o objectivo de melhorar qualitativamente e quantitativamente a produção.

Na actualidade, a automação aliada ao accionamento de motores eléctricos controlados electronicamente, são áreas técnico-científicas essenciais para o desenvolvimento industrial. Estes possibilitam uma gestão integrada dos processos produtivos, de forma a garantir uma maior optimização e simultaneamente uma melhoria da eficiência, da segurança, da produtividade e da qualidade, com a consequente redução de custos.

A integração e simbiose entre a técnica de accionamento de motores eléctricos e as técnicas de automatização industrial, tradicionalmente domínios de especialidades diferentes, são factores essenciais na modernização das empresas.

É neste contexto que surge a proposta de desenvolver um trabalho em que a automação tem um papel preponderante. Mais concretamente a automação será um suporte ao arranque e controlo de velocidade do motor de indução largamente utilizado nos processos industriais.

A utilização do autómato, do soft-starter e do inversor frequência no controlo do motor de indução é a chave principal deste trabalho.

O soft-starter e o inversor de frequência são utilizados basicamente para controlar o arranque de motores de indução, em substituição dos métodos tradicionais de arranque (estrela-triângulo, autotransformador, resistências estatóricas e arranque directo). Têm a vantagem de, limitar a corrente de arranque, evitar picos de corrente, efectuar paragens suaves e incorporam protecções.

Estes equipamentos contribuem para a redução dos esforços sobre os dispositivos de transmissão durante o arranque e para o aumento da vida útil do motor e equipamentos mecânicos, devido à eliminação de choques mecânicos.

Por tudo o que foi dito anteriormente, o presente trabalho é importante pelo facto de a implementação a realizar servir de forma concreta para um aumento das competências técnicas na área da automação e ainda contribuir na modernização dos processos industriais onde esta for adoptada, com consequente aumento da competitividade das empresas.

1.2 OBJECTIVOS

Com o presente trabalho pretende-se adquirir um *know-how* na área da automação e dos accionamentos eléctricos, concretamente desenvolver o controlo do arranque e velocidade do motor de indução, utilizando o soft-stater Altistart 01, o inversor de frequência Altivar 11, e um autómato compacto Twido, todos da empresa Schneider Electric.

Numa fase inicial tem-se como objectivo o estudo do motor de indução de forma a compreender o seu princípio de funcionamento, as características eléctricas e mecânicas, bem como os tipos de arranque (arranque directo, arranque com resistências, arranque com autotransformador e arranque estrela-triângulo).

Numa fase posterior comparamos os tipos de arranque referidos anteriormente com o arranque electrónico, quer seja através do soft-starter como também do inversor de frequência. Relativamente ao soft-starter o objectivo é compreender o seu princípio de funcionamento, as funções disponíveis e respectiva parametrização e por fim compreender as vantagens da utilização no arranque do motor de indução.

O inversor de frequência terá também uma componente de compreensão do seu princípio de funcionamento, das curvas características, da interacção do inversor com a rede e a carga e ainda a compreensão do tipo de controlo aplicado ao inversor. Concretamente o controlo escalar e vectorial com modulação PWM.

Finalmente objectivo mais proeminente deste trabalho visa a implementação prática do arranque e controlo de velocidade do motor de indução, utilizando as duas soluções electrónicas (soft-starter e inversor). O controlo das duas soluções é realizado no autómato Twido através de software desenvolvido em linguagem ladder. Como este trabalho não visa a implementação do motor de indução num processo em concreto todas as parametrizações e ajustes do soft-starter e do inversor serão realizados de forma genérica.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Esta tese é composta por 8 capítulos e um apêndice. O capítulo 1 pretende enquadrar o trabalho e traçar, na generalidade, os objectivos a atingir.

O capítulo 2 é um capítulo introdutório, que serve para familiarizar o leitor sobre o motor de indução. Passa por um estudo do seu funcionamento, características eléctricas e mecânicas. Por outro lado, descreve-se as diversas formas de arranque e controlo clássicas que se irão contrapor com as actualmente utilizadas.

O capítulo 3 descreve o funcionamento e estrutura do soft-starter, bem como algumas das funções no controlo do motor de indução. Referimos ainda as diversas vantagens do arranque com soft-starter em comparação com os diversos tipos de arranque clássicos.

O capítulo 4 faz o estudo do inversor de frequência, que vai desde o seu funcionamento até às formas de controlo, passando pela descrição das diversas características. Por fim, referimo-nos ainda à interacção do inversor no sistema, rede, inversor, motor, carga.

O capítulo 5 apresenta o estudo sobre os autómatos programáveis. Começamos por perceber o seu aparecimento e aplicações industriais, bem como, as características, arquitectura e princípio de funcionamento. Numa fase final, descrevemos as principais linguagens de programação de autómatos, em especial a linguagem de contactos, utilizada na realização deste trabalho no autómato TWIDO da empresa Schneider Electric.

A implementação prática de todos os “módulos” descritos nos capítulos anteriores, foi concretizado no capítulo 6. Apresentamos o motor, o soft-starter, o inversor de frequência e o autómato, bem como os circuitos de potência e controlo do arranque e velocidade do motor de indução.

O capítulo 7 é um capítulo de conclusões sobre o estudo e implementação realizados, assim como, sugestões e trabalhos futuros a desenvolver.

No capítulo 8 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização deste trabalho.

Em apêndice (Apêndice A) é apresentado o manual de utilização do inversor de frequência Altivar 11.

MOTOR DE INDUÇÃO

2.1 INTRODUÇÃO

O motor eléctrico, mais utilizado actualmente na prática, é o motor de indução trifásico de rotor em gaiola de esquilo. Esta situação deve-se ao facto da maioria dos sistemas actuais de distribuição de energia eléctrica serem em corrente alternada. A sua larga utilização é justificada pela sua robustez (não existem partes que se desgastam facilmente, tais como comutador e escovas), pelo seu baixo custo, pouca necessidade de manutenção e ainda, pela possibilidade de utilização em qualquer tipo de aplicação, incluindo ambientes hostis, ambientes explosivos, ambientes com poeiras, aplicações navais.

Este tipo de motor tem actualmente grandes aplicações, quer na indústria, quer em utilizações domésticas. Na indústria temos, por exemplo, os moinhos, os compressores, os ventiladores, os esmagadores, as misturadoras, entre outros; já no que respeita às utilizações domésticas a utilização vai desde o transporte de produtos e pessoas - sendo realizado por meio de guindastes, tracção eléctrica, tapetes rolantes, elevadores, entre muitas outras aplicações.

Comparativamente com os restantes motores eléctricos convencionais, nomeadamente com o motor de corrente contínua e com o motor síncrono, o motor de indução tem algumas vantagens, tais como [CHAPMAN, 2003] [RASHID, 1998]:

- Pode ser ligado directamente à rede trifásica de distribuição de energia eléctrica;
- Tem facilidade de inversão do sentido de rotação;
- É a máquina eléctrica que apresenta os valores mais elevados de potência e binário específicos (potência e binário por unidade de peso);
- É bastante maleável relativamente ao controlo da sua velocidade e do seu binário;
- É muito mais barato, sobretudo o de rotor em gaiola simples;
- É simples do ponto de vista construtivo e possui uma elevada robustez;

- Está praticamente isento de manutenção pois não tem escovas para verificar ou para substituir, tendo uma fiabilidade elevada;
- Para a mesma potência é menos volumoso e pesado e tem grande capacidade de suportar sobrecargas;
- A ausência de anéis colectores (caso do motor síncrono) ou de colector (motor de corrente contínua) permite uma velocidade de rotação mais elevada;
- Por simples troca de duas fases permite efectuar a inversão do sentido de marcha, o que reduz a complexidade da electrónica de controlo;
- Toleram bem ambientes severos e fortes vibrações, dado que não tem contactos deslizantes na sua parte rotórica, não produzindo por isso faíscas;
- Pode integrar-se directamente no sistema de transmissão mecânico, pois é um motor robusto e fiável;
- É fabricado em gamas bastante alargadas de potência.

Contudo, em accionamentos a frequência constante, o motor de indução trifásico de rotor em gaiola apresenta alguns inconvenientes notáveis, nomeadamente:

- A sua corrente de arranque é bastante elevada, podendo atingir valores superiores a 100% da corrente nominal;
- O seu binário de arranque é reduzido.

Todavia, com a utilização de conversores electrónicos de potência, tornou-se possível regular as características de desempenho do motor, através da variação simultânea ou independente da tensão e da frequência, eliminando desse modo todos os inconvenientes acima mencionados.

A generalização da electrónica de potência permitiu assim que os accionamentos eléctricos com motores de indução trifásicos se propagassem, impondo-se como uma tendência natural de excelência. Inclusivamente, o motor de indução impôs-se já como motor de tracção eléctrica exclusivo quer em corrente contínua, quer em corrente alternada monofásica, destronando definitivamente o motor de corrente contínua com excitação em série. Neste domínio, as vantagens do motor de indução são esmagadoras face ao motor de corrente contínua - para o mesmo volume, a sua potência é 35% superior e, para a mesma potência nominal, o volume e o peso são 30% inferiores.

Resta-nos acrescentar que este tipo de motor é designado não só por motor de indução (da literatura técnica angloosaxónica *induction motor*) mas também por motor assíncrono (da literatura técnica francesa *moteur assynchrone*), tendo ambas as designações a sua razão de ser. Ou seja, "indução" na medida em que as correntes que circulam no enrolamento do rotor

têm origem em f.e.m.'s induzidas através da lei geral de indução; “assíncrono” porque a sua velocidade de rotação em carga é ligeiramente inferior à velocidade do campo girante (velocidade de sincronismo)

2.2 PARTES PRINCIPAIS DO MOTOR ASSÍNCRONO

O motor assíncrono é uma máquina eléctrica de campo girante, composto fundamentalmente por duas partes: o estator e o rotor. É caracterizado por ter somente o estator ligado à rede de alimentação; quanto ao rotor, este não é alimentado externamente, e as correntes que circulam nele são induzidas electromagneticamente pelo estator.

Sucintamente, o motor em gaiola é constituído, pelos seguintes elementos [CHAPMAN, 2003]:

- A carcaça é a estrutura que suporta as partes do motor tais como tampas, caixa de ligação, estator, entre outras. Em geral é feita de ferro fundido e dotada de aletas ou nervuras para melhorar a capacidade de dissipação de calor;
- Um núcleo estatórico constituído por chapas ferromagnéticas empilhadas e isoladas entre si, e em cujas cavas longitudinais estão colocados todos os condutores que constituem o enrolamento do estator;
- O rotor, que é igualmente construído por um núcleo de chapas ferromagnéticas empilhadas, cujas cavas longitudinais são em alumínio, obtidas por injeção deste metal em fusão e sob pressão. O curto-circuito das barras é assegurado por dois anéis igualmente em alumínio e que têm a dupla função de condutores e de ventiladores de arrefecimento.

Quanto ao motor de rotor bobinado, o enrolamento do rotor é similar ao enrolamento do estator. Este tipo de motor tem também anéis colectores e escovas que, ao conduzirem a corrente gerada no rotor para o exterior, permitem através de resistências variáveis, limitar a corrente no arranque, aumentar o binário de arranque e controlar a velocidade de rotação do motor.

Como foi salientado anteriormente, a utilização de conversores electrónicos veio permitir o aparecimento de todas as potencialidades do motor de rotor em gaiola, destronando não só o motor de corrente contínua como também o seu homólogo de rotor bobinado, mais volumoso e pesado, mais caro, com menor fiabilidade de funcionamento, e com mais encargos de manutenção devido aos anéis e às escovas

Na figura 2.1 [WEG, 2008] apresenta-se a perspectiva de um motor em gaiola, sendo de acordo com a legenda: 1 - Carcaça; 2 - Núcleo de chapas do estator; 3 - Núcleo de chapas do rotor; 4 - Tampas; 5 - Ventilador; 6 - Protecção do ventilador; 7 - Veio; 8 - Enrolamento trifásico; 9 - Caixa de ligação; 10 - Terminais; 11 - Rolamentos e 12 - Barra de anéis de curto-circuito.

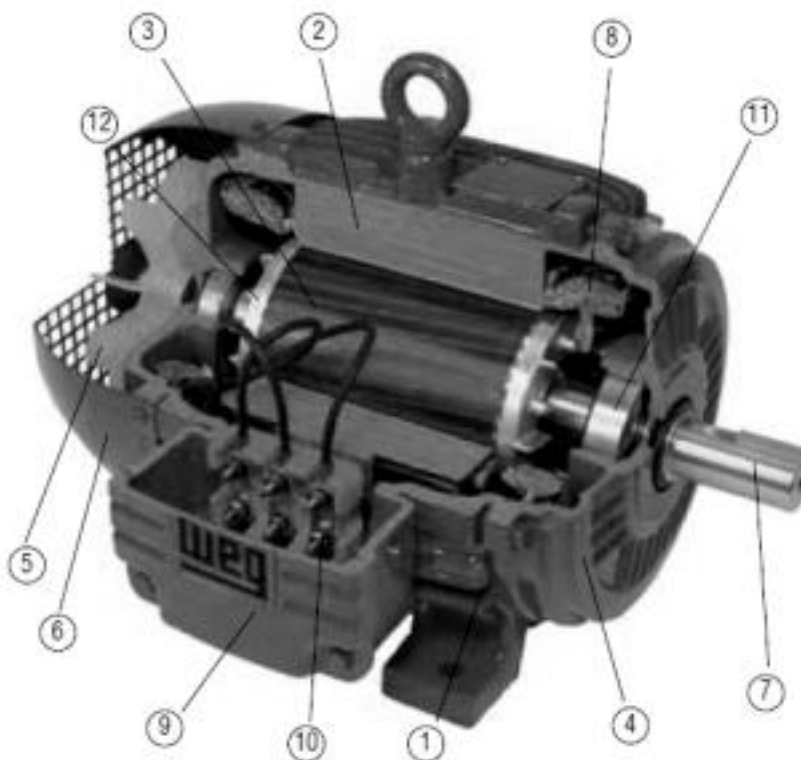


Figura 2.1 - Detalhes de um motor de indução trifásico

Para que o motor seja correctamente identificado é fundamental ver as suas características através da chapa de características como se exemplifica na figura 2.2. Neste caso, o fabricante é de origem francesa e indica que se trata de um motor trifásico (MOT. 3~), modelo FLSB 180M, com o número de série 596059 GH com 208 Kg. O símbolo IP 55 IK 08 diz respeito ao índice de protecção, em que a carcaça impede qualquer contacto com o interior do motor bem como a penetração de jactos de água em todas as direcções. O isolamento é da classe F, para uma temperatura de 40 °C. São ainda indicados os valores nominais de funcionamento do motor ligado em estrela ou triângulo da tensão (V), da frequência (Hz), da velocidade de rotação (min^{-1}), da potência (kW), do factor de potência ($\cos(\varphi)$) e da corrente (A). [LEROY, 2009].

LERROY SOMER		MOT. 3 ~ FLSB 180 M			CE	
		N° 596 059 GH 001		kg : 208		
IP 55	IK 08	I cl. F	40 °C	S3	40 %	6 d/h
V	Hz	min⁻¹	kW	cos φ	A	
Δ 220	50	1427	17	0.88	60	
○ Y 380	50	1427	17	0.88	35	○
	U_R				I_R	
	250				42	
MASSA LUBRIFICANTE ESSO UNIREX N3						

Figura 2.2 - Chapa de características de um motor de indução trifásico

2.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

Quando uma bobina é percorrida por uma corrente, é criado um campo magnético segundo o eixo da bobine de valor proporcional à corrente.

Na figura 2.3 temos um enrolamento monofásico alimentado por uma tensão U_1 e uma corrente I , que gera um campo magnético. O enrolamento é constituído por um par de pólos, um pólo norte e um pólo sul. O fluxo magnético gerado atravessa o rotor entre os dois pólos e fecha-se através do núcleo do estator [WEG, 2009].

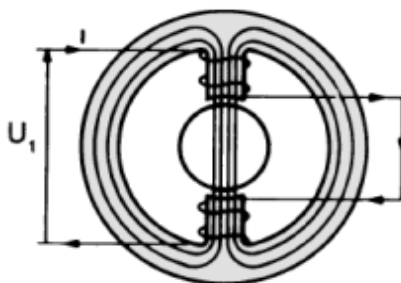


Figura 2.3 - Enrolamento Monofásico

Na figura 2.4 temos um enrolamento trifásico, que é composto por três enrolamentos monofásicos espaçados entre si de 120 graus.

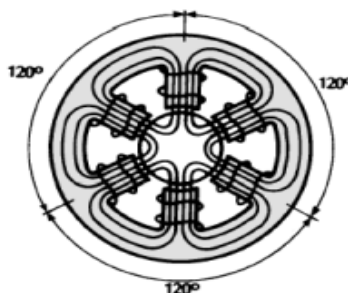


Figura 2.4 - Enrolamento Trifásico

Quando se aplica aos terminais dos enrolamentos um sistema trifásico simétrico de tensões (figura 2.5), as correntes ao circular em geram um campo magnético girante, cujas linhas de força se estabelecem através dos núcleos estatórico, rotórico e do entreferro. O campo magnético total, em cada instante, é igual à soma dos vários campos gerados como mostra a figura 2.6.

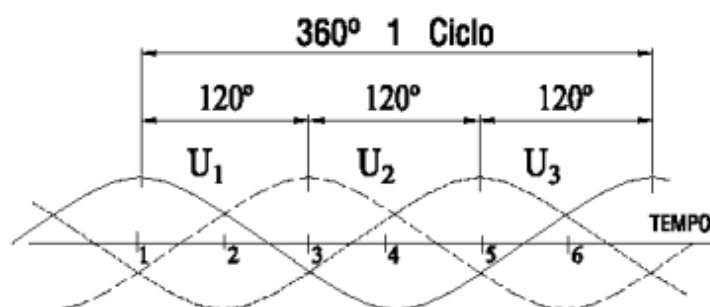


Figura 2.5 - Sistema trifásico de tensões

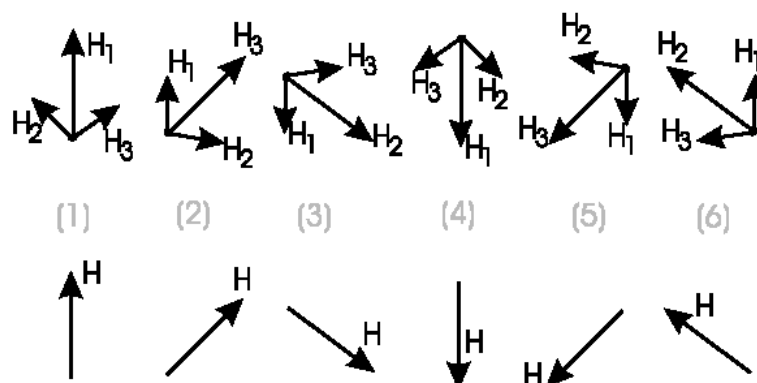


Figura 2.6 - Campo magnético resultante

Devido à lei geral de indução de Faraday, a intensidade do campo magnético, e consequentemente o fluxo magnético, variam no tempo, induzindo f.e.m's naqueles condutores, que por sua vez, dão origem a correntes de curto-circuito. Da interacção electromagnética entre estas correntes e o campo magnético girante, o rotor fica sujeito a forças de Laplace tangenciais, permitindo o seu movimento. Ou seja, gera-se assim um binário no veio que será aplicado à carga mecânica acoplada.

O princípio de funcionamento do motor de indução baseiam-se assim em duas leis do electromagnetismo, a Lei de Faraday e a Lei de Lenz:

Lei de Faraday: *”Sempre que, através da superfície abraçada por um circuito tiver uma variação de fluxo, gera-se nesse circuito uma força electromotriz induzida. Se o circuito é fechado será percorrido por uma corrente eléctrica”.*

Lei de Lenz: *“O sentido da corrente induzida é tal que esta, pelas suas acções magnéticas, tende sempre a opor-se à causa de lhe deu origem”.*

2.4 VELOCIDADE E ESCORREGAMENTO DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Devido à reacção magnética do campo rotórico sobre o campo estatórico, a velocidade de rotação do rotor é ligeiramente inferior à velocidade de rotação do campo girante do estator, não estando por isso o rotor sincronizado com esse campo girante.

Nos motores de indução as bobinas do estator estão dispostas de tal forma que o campo magnético criado gira ao longo do estator e todas as máquinas rotativas de corrente alternada têm uma relação entre a frequência da tensão de alimentação e a sua velocidade de rotação. Os motores de indução possuem uma velocidade de rotação do campo girante constante, denominada velocidade de sincronismo, que está relacionada, de uma forma rígida, com a frequência de alimentação. Esta relação é dada pela seguinte expressão [CHAPMAN, 2003] [CABRITA, 1992]:

$$n_s = \frac{120 f}{p} \quad [2.1]$$

sendo f , a frequência da tensão de alimentação, em Hz; n_s , a velocidade de rotação de sincronismo, em rpm e p o número de pólos do motor. Da expressão 2.1, conclui-se que, quanto maior for o número de pólos magnéticos (sempre em número par), tanto menor será a frequência do campo girante, diminuindo por isso a velocidade de sincronismo. Como o número de pólos é constante para uma dada máquina, verifica-se que a velocidade de rotação depende directamente da frequência de alimentação.

Neste tipo de motores, como já foi salientado, a velocidade de rotação do motor é ligeiramente inferior à velocidade de sincronismo. A esta diferença de velocidades dá-se o nome de escorregamento traduzido pela letra s , sendo determinado através da expressão:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} \quad [2.2]$$

onde n_s é a velocidade de sincronismo e n a velocidade de rotação do motor.

Quando o motor gira em vazio, o escorregamento é praticamente nulo, pois o binário necessário é mínimo. O factor de potência é extremamente baixo, uma vez que a corrente que circula no motor é utilizada apenas para suprimir as perdas no cobre e para a criação do campo magnético necessário para que ocorra conversão electromecânica de energia.

À medida que o pedido de carga aumenta, o escorregamento aumenta igualmente, até ao limite em que o binário resistente é tal que o motor não roda e tem-se $s = 1$. A velocidade

sofre um ligeiro decréscimo quando o motor passa de um funcionamento em vazio para um funcionamento com carga máxima.

Quanto maior é a potência do motor, menor é o seu escorregamento, sendo que, os valores típicos para o escorregamento são da ordem de 0,5% em vazio e 3% a 5% a plena carga (carga nominal), dependendo do tipo de motor.

É também muito importante referir que o escorregamento está relacionado com o rendimento do motor através da expressão teórica:

$$\eta = 1 - s \quad [2.3]$$

Por outro lado o rendimento de um motor é tanto maior, quanto mais elevada for a sua potência, sendo os seus valores típicos de 80% para um motor de 0,75 kW, 95% para potências da ordem de 100 kW e acima de 98% para motores de grandes potências.

2.5 POTÊNCIA E BINÁRIO DOS MOTORES DE INDUÇÃO

A potência traduz-se basicamente, no binário que o motor desenvolve no veio do rotor. Este binário é uma consequência directa do efeito originado pela indução magnética do estator em interacção com a do rotor, e que se pode traduzir pela seguinte expressão [CHAPMAN, 2003]:

$$M = k B_{est} B_{rot} \sin(\alpha) \quad [2.4]$$

onde M é o binário, k uma constante construtiva, B_{est} a densidade de fluxo do estator, B_{rot} a densidade de fluxo do rotor e α o ângulo entre B_{est} e B_{rot} .

O motor de indução em funcionamento normal encontra-se ligado, por um lado a uma carga mecânica, e por outro a uma fonte de energia eléctrica, sendo a potência absorvida traduzida pela expressão [CABRITA, 1992]:

$$P_e = \sqrt{3} U I \cos(\varphi) \quad [2.5]$$

sendo P_e a potência eléctrica absorvida da rede em W, U a tensão aos terminais de cada fase do enrolamento do estator em V, I a corrente em cada fase do enrolamento do estator em A e $\cos(\varphi)$ o factor de potência.

Quanto ao binário do motor à plena carga, encontra-se relacionado com a potência útil e com a velocidade de rotação através da expressão:

$$P_m = \frac{2\pi}{60} n M \quad [2.6]$$

em que P_m é a potência útil em W, M é o binário em N.m e n a velocidade de rotação em rpm.

Em regime transitório, a equação dinâmica que rege o comportamento mecânico do motor é a seguinte:

$$M_a = M - M_r = J \frac{d\omega}{dt} \quad [2.7]$$

sendo M_a o binário acelerador, M o binário desenvolvido pelo motor, M_r o binário resistente, J o momento de inércia das massas girantes, e ω a velocidade angular mecânica.

2.6 PONTO DE FUNCIONAMENTO DO MOTOR DE INDUÇÃO

A característica do binário desenvolvido pelo motor (M), após o arranque e à medida que a velocidade do motor aumenta progressivamente, leva a um ponto em que o binário é máximo, diminuindo até estabilizar num dado ponto como podemos verificar na figura 2.7 [SCHNEIDER, 2009].

Este ponto de funcionamento corresponde à igualdade do binário do motor com o binário resistente (M_r), sendo este o binário que o motor tem de vencer para conseguir accionar a carga à qual esta acoplado.

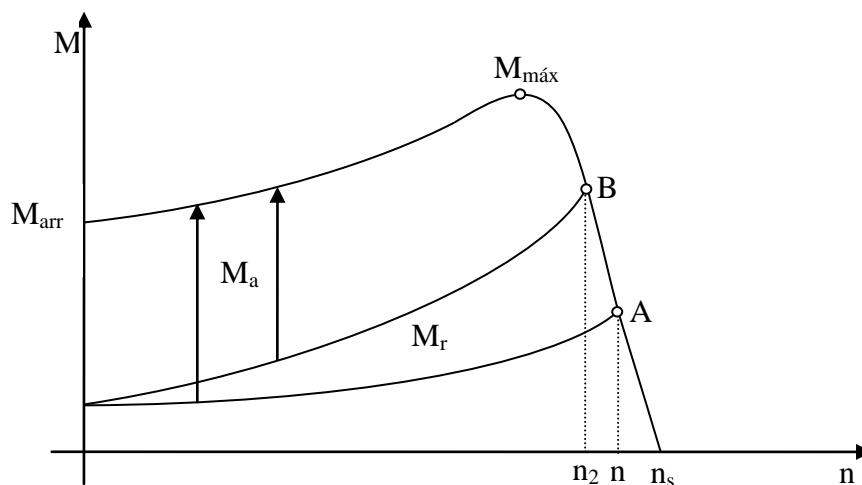


Figura 2.7 - Ponto de Funcionamento do Motor de Indução

O binário acelerador corresponde, em cada instante, à diferença entre o binário do motor e o binário resistente e que é traduzida pela seguinte expressão:

$$M_a = M - M_r \quad [2.8]$$

sendo M_a o binário acelerador, M o binário desenvolvido pelo motor e M_r o binário resistente.

Ao aumentarmos a carga a accionar, o ponto de funcionamento passa de A para B, com conseqüente aumento da corrente. A velocidade diminui, mas o binário motor aumenta para compensar a perda de velocidade e satisfazer a nova potência solicitada.

Se a solicitação de potência continuar a aumentar, o motor continua a perder velocidade até atingir o valor máximo do binário motor ($M_{m\acute{a}x}$). E ao caminharmos no sentido do ponto C a velocidade, assim como o binário motor, diminuem simultaneamente não dando resposta à maior solicitação de carga, o que conduz à paragem do motor.

Os pontos A e B correspondem a pontos de funcionamento estáveis, para os quais o motor consegue dar resposta às solicitações da carga. No limite a solicitação de carga não deve ser superior ao binário máximo.

Relativamente ao ponto C, assim como qualquer ponto da curva ascendente, são pontos instáveis que conduzem a paragem do motor quando a solicitação de carga aumenta.

Normalmente os motores apresentam um coeficiente de estabilidade próximo de 2 para garantir uma boa estabilidade, sendo traduzido pela seguinte expressão:

$$C_e = \frac{M_{m\acute{a}x}}{M_{nom}} \quad [2.9]$$

onde C_e é o coeficiente de estabilidade, $M_{m\acute{a}x}$ o binário máximo e M_{nom} o binário nominal do motor.

2.7 CARACTERÍSTICAS NOMINAIS

As características nominais de uma máquina eléctrica – tensão, corrente, potência, binário, velocidade; são estabelecidas pelo seu construtor na fase de projecto e confirmadas experimentalmente, com base na temperatura máxima admissível pela classe de isolamento dos materiais isolantes utilizados [WEG, 2009].

2.7.1 Potência Nominal

É a potência mecânica máxima que o motor pode fornecer ao veio em regime permanente de trabalho. Trata-se, portanto, da potência de saída do motor, a qual está especificada na chapa de características. Na prática utilizam-se as unidades de CV, HP, W e seus múltiplos.

2.7.2 Tensão Nominal

É a tensão de trabalho do motor em condições normais, não deve ser excedida sob períodos prolongados de tempo sob risco de avariar o motor; é a tensão de projecto do motor.

Os motores são em geral fabricados para operação numa temperatura ambiente máxima de 40 graus centígrados e uma altitude máxima de 1000 metros acima do nível do mar. Fora destas condições existem alterações nas características nominais, especialmente na potência.

2.7.3 Corrente Nominal

É a corrente que o motor solicita da rede sob tensão, frequência e potência nominais. O valor da corrente depende do rendimento e do factor de potência do motor sendo dado pela seguinte relação:

$$I = \frac{P_m}{\sqrt{3} U \left(\frac{\eta}{100} \right) \cos(\varphi)} \quad [2.10]$$

sendo I a corrente nominal em A, P_m a potência útil fornecida ao veio, indicada na chapa de características do motor em W (caso a potência seja indicada em cv devemos convertê-la usando-se a relação: 1 cv = 736 W), η o rendimento em % e $\cos(\varphi)$ o factor de potência nominal.

Durante o período de arranque o motor solicita uma corrente acima da nominal, provocando um aquecimento adicional, motivo pelo qual o tempo de arranque não deve ultrapassar o limite estabelecido pelo fabricante. Além disso, a corrente elevada causa quedas de tensão na rede de alimentação e dispositivos de protecção. A corrente de arranque de um motor de indução é em geral de 5 a 8 vezes a corrente nominal.

2.7.4 Frequência Nominal

É a frequência da rede de alimentação do motor, expressa em Hz, em Portugal a frequência padronizada é de 50 Hz. Salienta-se que é possível utilizar-se um valor de frequência acima do nominal, contudo as características de arranque e de funcionamento são alteradas, existindo por isso uma alteração na potência nominal.

2.7.5 Binário Nominal

É o binário fornecido pelo motor ao veio em condições de tensão e corrente nominais. Além do binário nominal também são importantes o binário máximo e o binário de arranque.

Salienta-se que o motor de indução tem a capacidade de fornecer um binário acima do nominal por curtos períodos de tempo.

2.7.6 Velocidade Nominal

É a velocidade do motor em funcionamento à potência nominal, em condições de tensão e frequência nominais. Conforme visto anteriormente, a velocidade depende do escorregamento, do número de pólos e da frequência da rede de alimentação. A velocidade do motor de indução em vazio e a plena carga, tem uma variação de cerca de 10%.

2.7.7 Rendimento Nominal

O rendimento nominal de cada motor depende dos materiais utilizados na sua construção, das dimensões e da potência do mesmo. Em geral, o rendimento aumenta com as dimensões e a potência do motor. Actualmente existem motores com rendimentos próximos de 100%, chamados motores de alto rendimento, no entanto mais caros.

O rendimento nominal é, então, a relação entre a máxima energia eléctrica absorvida e convertida em energia mecânica disponibilizada ao veio. A eficiência desta relação é traduzida pela seguinte expressão:

$$\eta = \frac{P_m}{P_e} = \frac{P_e - P_p}{P_e} \quad [2.11]$$

onde η é o rendimento, P_m a potência útil no veio, P_e a potência absorvida e P_p o somatório das perdas.

2.7.8 Factor de Serviço

O factor de serviço representa uma reserva de potência do motor que pode ser usada em regime permanente. A potência que pode ser obtida do motor é desta forma a potência nominal (indicada na chapa de características) multiplicada pelo factor de serviço. Por exemplo um motor com potência de 5 kW e com factor de serviço de 1.1 pode permanentemente produzir 5.5 kW. Um factor de serviço de 1.0 significa que o motor não possui reserva de potência. O factor de serviço não deve ser confundido com a sobrecarga momentânea do motor, a qual ocorre em curtos períodos de tempo. Uma indicação típica de sobrecarga é 60% da potência nominal durante 15 segundos [WEG, 2008].

2.8 BALANÇO ENERGÉTICO DO MOTOR DE INDUÇÃO

Como podemos ver na figura 2.8 o motor transforma a potência eléctrica que lhe é fornecida pela rede de alimentação em potência mecânica útil no veio e numa reduzida percentagem de perdas.

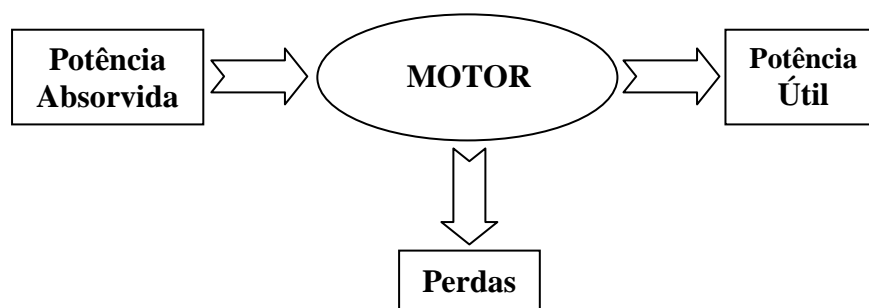


Figura 2.8 - Balanço energético de um motor eléctrico

Relativamente às perdas que ocorrem num motor, estas compreendem quatro tipos [CHAPMAN, 2003]:

- *Perdas Eléctricas*: Perdas por efeito de Joule nos enrolamentos, os condutores das bobinas têm uma resistência não nula, logo, a passagem de corrente vai provocar perdas caloríficas. Deve-se escolher materiais de baixa resistividade, limitar o comprimento dos condutores, aumentar a sua secção e limitar a intensidade da corrente;
- *Perdas Magnéticas*: Perdas que ocorrem nas chapas de ferro do estator e do rotor, inerentes ao meio ferromagnético (perdas por Correntes de Foucault e perdas por histerese) que variam com a densidade do fluxo e com a frequência. Podem ser reduzidas através do aumento da secção do ferro no estator e no rotor, através do uso de lâminas finas e isoladas entre si, escolhendo materiais com boas características ferromagnéticas e com elevada resistividade, podendo mesmo ser adicionado silício para melhorar estas características;
- *Perdas Mecânicas*: Perdas por atrito nos apoios e nos rolamentos e entre as peças móveis em rotação e o ar envolvente, produzindo um binário resistente devido à oposição do ar. As perdas podem ser reduzidas com uma boa lubrificação dos rolamentos e aperfeiçoamento do sistema de ventilação do motor;
- *Perdas Suplementares*: São devidas a fugas do fluxo, distribuição de correntes não uniforme, imperfeições mecânicas nas aberturas para escoamento do ar e irregularidades na densidade do fluxo no entreferro. Podem ser reduzidas através da optimização do projecto do motor e ainda de uma produção cuidadosa.

No gráfico circular da figura 2.9 apresenta-se uma distribuição média das perdas totais nos motores de indução trifásicos de rotor em gaiola. Como se pode constatar, as perdas eléctricas por efeito de Joule no estator e no rotor representam a maior parcela, com 60 % do total [SANTOS, 2006].

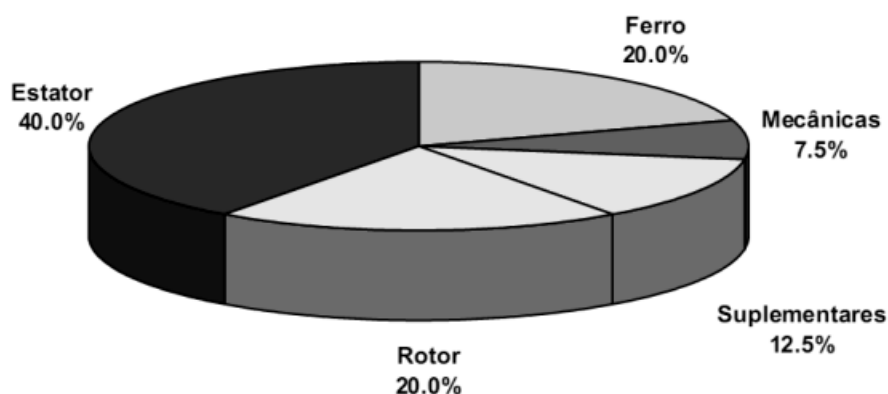


Figura 2.9 - Principais perdas num motor de indução

2.9 ARRANQUE DOS MOTORES DE INDUÇÃO

Durante o arranque, o motor solicita uma corrente muito elevada ao sistema de alimentação, muitas vezes da ordem de 6 a 10 vezes a corrente nominal.

Na prática, deseja-se accionar uma carga, evitando os distúrbios na rede eléctrica limitando a corrente de arranque. Desta forma, a escolha de um sistema de arranque adequado, trás benefícios para a vida útil do motor, redução energética e também redução de custos de manutenção.

Os principais tipos de arranque serão descritos a seguir dando-se maior incidência sobre o accionamento electrónico, uma vez que esta dissertação se concentra exclusivamente no controlo destes.

2.9.1 Arranque Directo

Os motores de indução são suficientemente robustos para arrancarem directamente ligados à rede, isto é, aceleram a carga desde a posição estática até à velocidade nominal, estando aplicada a tensão nominal. No entanto, durante a fase inicial do arranque directo implica um consumo de corrente muito superior à corrente nominal do motor, apresentado esta situação os seguintes inconvenientes [WEG, 2009]:

- Sobreaquecimento do enrolamento estatórico, com risco de degradação térmica dos materiais isolantes;
- Disparo dos órgãos de protecção, sobretudo se os arranques forem lentos, tornando assim este arranque inviável;
- Aparecimento de quedas de tensão, que colocam em risco o normal funcionamento de outros órgãos.

Este processo tem como vantagens a sua simplicidade, binário de arranque elevado, arranque rápido e baixo custo. No entanto, só deve ser utilizado em motores de baixa potência, não sendo possível em casos que exijam um arranque suave e progressivo.

2.9.2 Arranque Estatórico com Resistências

Consiste em intercalar em série, com o enrolamento estatórico, um sistema de resistências provocando uma queda de tensão, e conseqüentemente limita a corrente de arranque. Essas resistências, à medida que o motor acelera, são gradualmente retiradas até ao seu curto-circuito [CHAPMAN, 2003] [SCHNEIDER, 2009]. O valor destas é calculado, em função da ponta de corrente que não deve ser excedida no arranque, ou do valor do binário de arranque necessário, tendo em conta o binário resistente da máquina.

A tensão aos terminais do motor não se mantém constante durante o período de aceleração. Com efeito, a intensidade da corrente absorvida diminui à medida que a velocidade vai aumentando, pelo que a queda de tensão nas resistências diminui e a tensão aos terminais do motor aumenta progressivamente. Dado que o binário é proporcional ao quadrado da tensão nos terminais do motor, aumenta mais rapidamente do que no arranque estrela-triângulo, como iremos ver a seguir.

Este método tem o inconveniente do custo das resistências, assim como das perdas por efeito de Joule sobretudo nas situações de arranque frequente, mas em contra partida tem a vantagem da eliminação das resistências no final do arranque, se efectuar sem interrupções eliminado assim os fenómenos transitórios.

2.9.3 Arranque com Autotransformador

Este processo consiste em, no início do arranque, ligar o motor através de um autotransformador a tensão reduzida. A tensão aplicada ao motor é progressivamente elevada desde zero até ao valor nominal, sendo depois o autotransformador desligado.

O arranque faz-se sem interrupção da corrente do motor, evitando-se os fenómenos transitórios resultantes da interrupção.

Em relação ao arranque estático com resistências, este permite o mesmo binário de arranque com uma ponta de corrente ainda mais baixa. No entanto, implica a aplicação de equipamentos caros, essencialmente devido ao elevado preço do autotransformador [WEG, 2008].

2.9.4 Arranque Estrela-Triângulo

Este processo de arranque consiste em arrancar o motor com os enrolamentos estáticos ligados em estrela, passando a ligação para triângulo quando o motor tiver atingido uma velocidade próxima da sua velocidade nominal. Isto exige que os enrolamentos tenha, duas extremidades acessíveis, ou seja, seis terminais, e cuja tensão de funcionamento, quando ligados em triângulo, seja a tensão da rede.

Deste modo, a tensão aplicada a cada enrolamento do motor reduz-se, no arranque, na relação $\sqrt{3}:1$. Resultando esta da expressão que a seguir apresento:

$$U_Y = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}} \quad [2.12]$$

Como o binário de arranque é proporcional ao quadrado da tensão aplicada a cada enrolamento.

$$M_{arr} = kU^2 \quad [2.13]$$

Das expressões 2.12 e 2.13, vem que:

$$M_{arr_Y} = k \frac{U_{\Delta}^2}{3} = \frac{1}{3} M_{arr_{\Delta}} \quad [2.14]$$

Por outro lado, a corrente pedida à rede pelo motor reduz-se na relação 3:1.

$$I_{arr_Y} = \frac{1}{3} I_{arr_{\Delta}} \quad [2.15]$$

Por conseguinte, se este método de arranque tem a vantagem de reduzir a 1/3 a corrente pedida à rede, tem o inconveniente de reduzir na mesma proporção o binário de arranque como podemos verificar na figura 2.10. Temos ainda outra desvantagem devido a fenómenos transitórios, consequência da interrupção da corrente que percorre os enrolamentos do motor, no momento da abertura do contactor estrela, e no seu brutal restabelecimento quando fechamos o contactor triângulo.

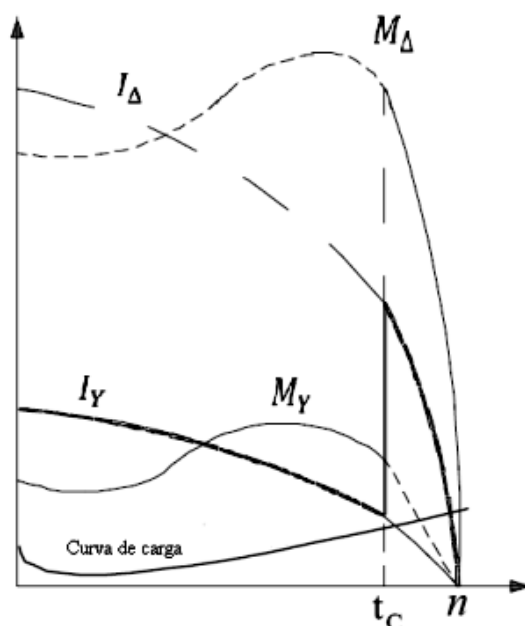


Figura 2.10 - Curvas de binário e corrente no arranque estrela-triângulo [WEG, 2009]

2.9.5 Arranque Electrónico

Sendo este tipo de arranque, o tema central de desenvolvimento desta tese é sobre ele que recaem os capítulos seguintes. Este tipo de arranque só é possível devido aos grandes avanços conseguidos na área de electrónica de potência, tornando-se uma alternativa atraente devido ao seu grande potencial de conservação de energia. O arranque electrónico pode ser usado tanto como método de arranque (soft-starter) ou como método de controlo de velocidade (inversor de frequência).

A energia eléctrica distribuída em Portugal possui uma frequência de 50 Hz, uma vez que, a velocidade do motor de indução trifásico é proporcional à frequência da tensão de entrada. Este pode ser alimentado directamente pela rede, no entanto, ficamos limitados a uma velocidade constante, como já foi referido anteriormente. Porém, em muitas aplicações, o controlo de velocidade é fundamental e com isso, o arranque electrónico apresenta-se com o intuito de satisfazer essa necessidade, a necessidade de um maior controlo do motor, garantindo também uma maior faixa de operação.

Além de garantir uma maior versatilidade ao motor de indução quanto ao seu controlo, os arranques electrónicos também são utilizados como forma de conservar energia eléctrica, substituindo os controlos tradicionais de forma muito mais eficiente [PROCEL, 2009]. O uso de variadores electrónicos faz com que exista uma real redução do consumo de energia.

Esta economia de energia além de trazer benefícios para a conservação dos recursos naturais faz com que o capital investido no equipamento tenha um retomo financeiro num curto período de tempo.

O avanço da electrónica de potência dos últimos anos resultou no aparecimento de novos equipamentos e de novas topologias, destinados a modernizar as técnicas convencionais de arranques eléctricos para motores de indução. O soft-starter, por exemplo, vem substituir os métodos tradicionais de arranque estrela-triângulo, autotransformador e arranque estatórico com resistências trazendo consigo muitas vantagens [OLIVEIRA, 2000].

Um dos equipamentos muito utilizados na alimentação de motores de indução trifásico do tipo gaiola de esquilo é o inversor de frequência, que permite um accionamento a velocidade variável, controlando a tensão e a frequência da rede.

A tecnologia dos inversores evoluiu proporcionando maior versatilidade no controlo de velocidade e binário do motor de indução. Numa primeira instância, apareceram os conversores de frequência com controlo escalar (controlo da relação tensão/frequência - V/f) e comutação PWM (*Pulse width modulation*), e posteriormente, visando melhorar a performance dos inversores de frequência foi desenvolvido o modelo de controlo vectorial [OTTOBONI, 2002].

Os inversores permitem ajustar parâmetros de modo a manter o rendimento do motor na condição nominal de carga ou próximo dela. Assim, o inversor adapta-se consoante as solicitações da carga accionada pelo motor.

O princípio de funcionamento de um inversor de frequência com controlo escalar consiste em aplicar uma tensão de amplitude e frequência variáveis mantendo a relação V/f sensivelmente constante. A tensão aplicada ao motor é gerada por dispositivos electrónicos de potência, comutados a altas frequências. Entretanto, outros tipos de inversores existentes no mercado trabalham com técnicas diferentes da "V/f constante".

A técnica de modulação PWM consiste em aplicar uma sucessão de pulsos de tensão no motor de indução, com amplitude igual a tensão contínua fornecida pelo rectificador, também, os pulsos são modulados com larguras diferentes, de forma a criar uma tensão alternada de amplitude variável como iremos ver nos capítulos seguintes.

No esquema PWM, o inversor cria harmónicos de alta frequência, no entanto a velocidades reduzidas, não existem harmónicos de baixa frequência e o motor não tem binários pulsantes que produzam oscilações e perdas por aquecimento devido à presença destas.

Quando há a necessidade apenas de variação de velocidade e arranque suaves o inversor do tipo escalar (relação V/f) é uma ótima solução. Mas, para um controlo mais eficaz é necessário o uso dos inversores tipo vectorial, como o utilizado nesta tese, pois controlam a tensão e a frequência independentemente uma da outra [ARAÚJO, 2003].

É importante salientar que um inversor vectorial pode substituir um escalar, mas nem sempre o escalar pode substituir um vectorial, contudo, nem todas as aplicações são exigentes ao ponto de ser necessário utilizar um inversor vectorial. O aspecto construtivo destes dois tipos de inversores é semelhante, alguns fabricantes mudam apenas o software para cada tipo de controlo, outros utilizam uma placa extra que, quando presente, transforma o inversor escalar em vectorial. Como o preço do inversor vectorial é maior que o escalar, a utilização de inversores escalares pode representar uma economia razoável.

O inversor escalar não oferece binários elevados para velocidades reduzidas, pois o binário é função directa da corrente de alimentação (depende da tensão - relação V/t). O inversor vectorial por ter o controlo de tensão e frequência independente através das correntes de magnetização e do rotor, consegue adaptar as suas variáveis de acordo com a solicitação de binário da máquina. O inversor vectorial é indicado para binários elevado a velocidades reduzidas, controlo rigoroso de velocidade e binário ajustável. Já o escalar é indicado para arranques suaves, operação acima da velocidade nominal do motor e processos que requerem constantes inversões do sentido de rotação [RODRIGUES e JÚNIOR, 2002].

SOFT-STARTER

3.1 INTRODUÇÃO

Com a crescente necessidade de optimização de sistemas e processos industriais, foram desenvolvidas algumas técnicas, tendo em consideração os conceitos e tendências da automação industrial. Um dos mais claros exemplos, corresponde aos sistemas de accionamento de motores indução, largamente utilizados em quase todos os segmentos, seja ele industrial ou de uso doméstico.

Neste capítulo vai ser abordado, uma técnica que se tornou muito utilizada actualmente em accionamento de motores que são os soft-starters. Estes são utilizados basicamente em arranques de motores de corrente alternada tipo gaiola, em substituição aos métodos de arranque tradicionais abordados no capítulo anterior. Tem a vantagem de não provocar solavancos, limitar a corrente de arranque, evita picos de corrente e ainda permite uma desaceleração do motor de forma suave.

Estes dispositivos, contribuem na redução dos esforços sobre os acoplamentos e dispositivos de transmissão durante o arranque, aumentando desta forma a vida útil do motor e dos equipamentos mecânicos da máquina accionada. Contribuem ainda, para a uma maior economia de energia, sendo muito utilizados em sistemas de refrigeração industrial, compressores, sistemas de bombeamento, pequenas gruas, tapetes rolantes, portas automáticas, entre muitas outras aplicações.

A aplicação de microprocessadores expande-se a cada dia que passa essencialmente devido ao seu custo reduzido e fácil aplicação, o que permite o desenvolvimento de novos dispositivos sem grande esforço. Os microprocessadores actuais são versáteis e consomem pouca energia permitindo, desta forma, que sejam utilizados no circuito de controlo dos soft-starters.

3.2 CARACTERÍSTICAS

Nos processos modernos de arranque do motor de indução, são usados soft-starters que, através do comando com microprocessadores, controlam tiristores que ajustam a tensão aplicada ao estator do motor. Desta forma, conseguimos, por um lado baixar o elevado binário acelerador do motor de indução e, por outro lado, diminuir as elevadas correntes de arranque, protegendo assim a rede eléctrica.

Após o arranque ajustável, dependendo da aplicação, a tensão atinge o seu valor nominal de forma suave, ao contrário do que acontece no método de arranque estrela-triângulo em que a transição é feita de forma brusca. Com isto, consegue-se manter a corrente de arranque próxima do nominal e uma aceleração suave. Na figura 3.1 temos um gráfico da curva característica do binário e da corrente do motor utilizando um soft-starter [MARTINS, 2008].

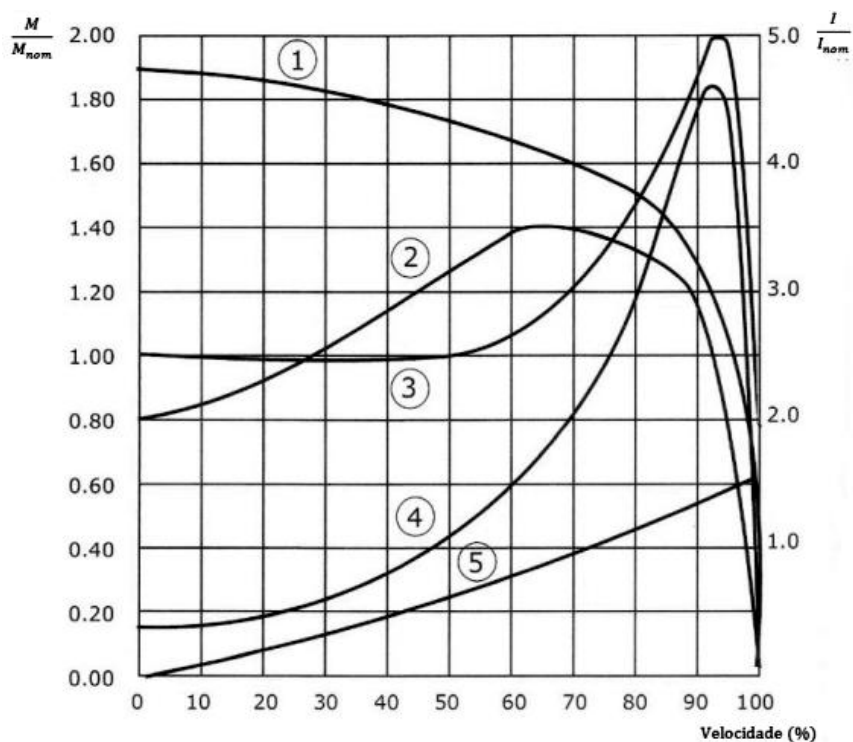


Figura 3.1 - Relação de binário e corrente do motor utilizando soft-starter e arranque directo

- 1 – Corrente no Arranque Directo
- 2 – Corrente no Arranque com Soft-Starter
- 3 – Binário no Arranque Directo
- 4 – Binário no Arranque com Soft-Starter
- 5 – Binário Resistente

As pontes tiristorizadas, são controladas através de um microprocessador, que permite ajustar o ângulo de disparo dos tiristores, permitindo assim o controlo da tensão aplicada ao motor. Com o ajuste correcto das variáveis, o binário e a corrente são regulados às necessidades da carga, ou seja, a corrente exigida será a mínima necessária para acelerar a carga, sem mudanças na frequência.

Algumas das características e vantagens do soft-starter são [SCHNEIDER, 2009]:

- Ajuste da tensão de arranque através de um tempo predefinido, que no Altistart 01 vai de 1 a 10 segundos;
- Impulso de tensão no arranque para cargas com altos binários resistentes através da entrada lógica BOOST;
- Corrente de arranque próxima da corrente nominal;
- Protecção contra falta de fase, sobre-corrente e subcorrente;
- Permite o controlo da desaceleração do motor, sem desgaste e aumento de temperatura;
- Permite um tempo de vida útil maior das partes electromecânicas móveis;
- Reduz o tempo de manutenção;
- Reduz as quedas de tensão na rede;
- Permite supervisionar, proteger e otimizar o funcionamento do motor.

Os motores assíncronos trifásicos de rotor em gaiola, apresentam picos de corrente e de binário indesejáveis no arranque directo. Para facilitar o arranque são utilizados os vários métodos já referidos anteriormente.

Estes métodos conseguem uma redução da corrente de arranque, no entanto, a comutação é feita através de degraus de tensão. Entretanto, nenhum dos métodos de arranque se compara ao arranque suave através de soft-starter. A figura 3.2 compara a corrente para os métodos de arranque mais utilizados [ARAÚJO, 2006].

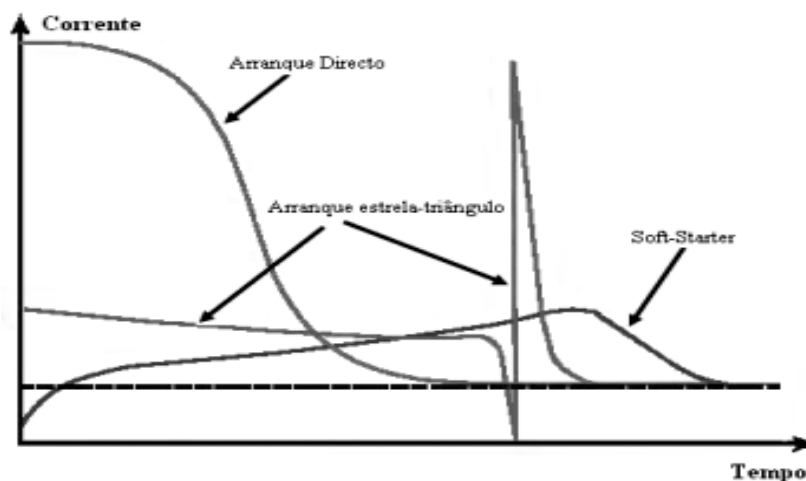


Figura 3.2 - Comparação entre alguns métodos de arranque

3.3 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

O funcionamento do soft-starter baseia-se na utilização de uma ponte a tiristores em anti-paralelo ligada entre a rede e o motor, com podemos verificar no esquema simplificado da figura 3.3. Desta forma os tiristores da ponte (SCR - *silicon controlled rectifier*) são controlados, variando o ângulo de disparo dos mesmos, permitindo o ajuste da tensão entregue ao motor.

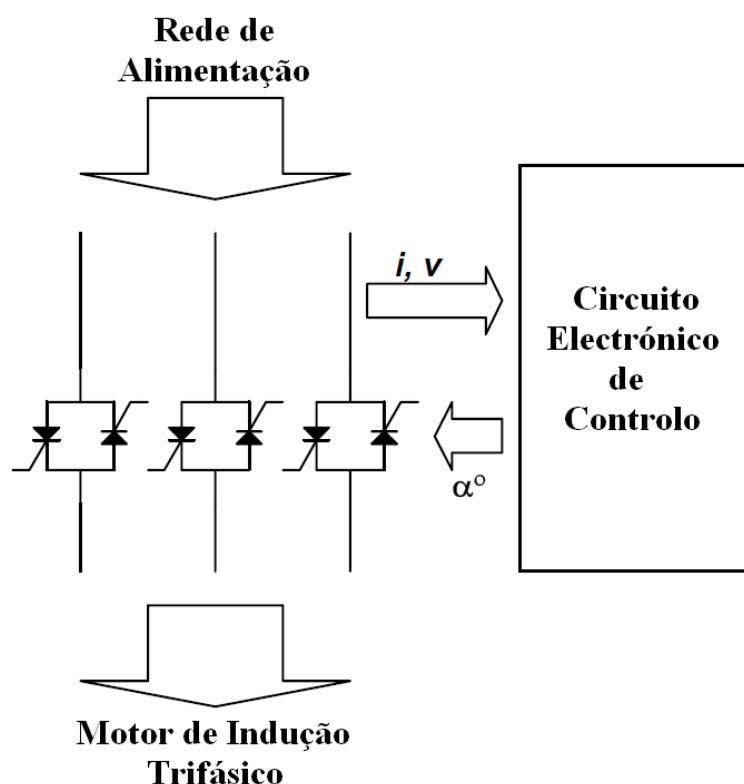


Figura 3.3 - Esquema simplificado do soft-starter

Através do ângulo de disparo dos tiristores, a tensão de arranque é reduzida, diminuindo os picos de corrente gerados pela inércia da carga.

Um dos requisitos do soft-starter é controlar a potência do motor, sem alterar a frequência e consequentemente a velocidade de rotação. Para isso acontecer, o controlo dos SCR's actuam em dois pontos, o controlo da tensão zero e o controlo da corrente zero.

O circuito de controlo temporiza os disparos a partir do último valor de zero da forma de onda, tanto da tensão como da corrente. O sensor pode ser um transformador de corrente, que pode ser instalado numa única fase [MELO e ROSA, 2003]. Em seguida vamos analisar a estrutura do soft-starter de forma mais detalhada, no entanto, pela figura 3.3 podemos verificar que o podemos dividir em duas partes, o circuito de potência e o circuito de controlo.

3.4 CIRCUITO DE POTÊNCIA

Como a rede de alimentação é alternada, é necessário controlar a tensão nos semi-ciclos positivos e negativos, daí a necessidade de termos uma configuração anti-paralela de dois SCR's por fase.

A actuação do circuito de controlo no disparo dos tiristores permite que a tensão aplicada ao motor varie de forma linear, o que permite um controlo sobre a corrente de arranque. Quando o motor atinge a tensão nominal, os terminais são ligados directamente a rede eléctrica, ou seja, é como se os tiristores conduzissem permanentemente.

Nas figuras 3.4 à 3.9 podemos ver a evolução da tensão por fase do motor para diferentes ângulos de disparo dos tiristores [MARTINS, 2008].

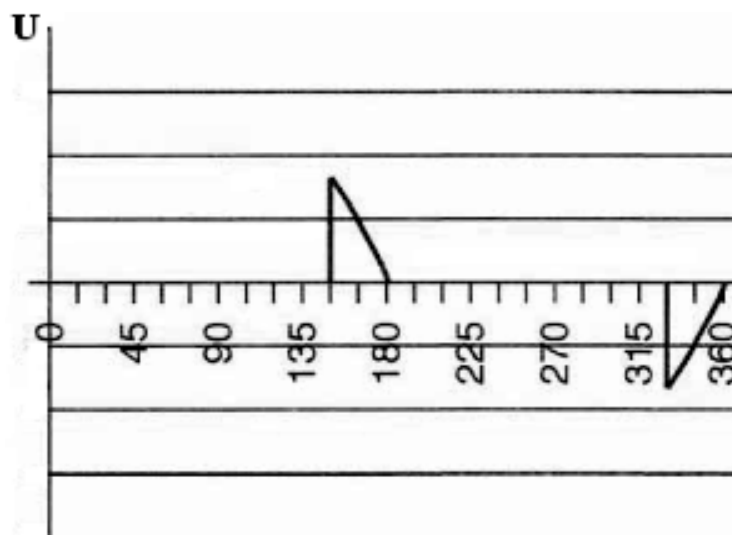


Figura 3.4 - Disparo dos tiristores a 150°

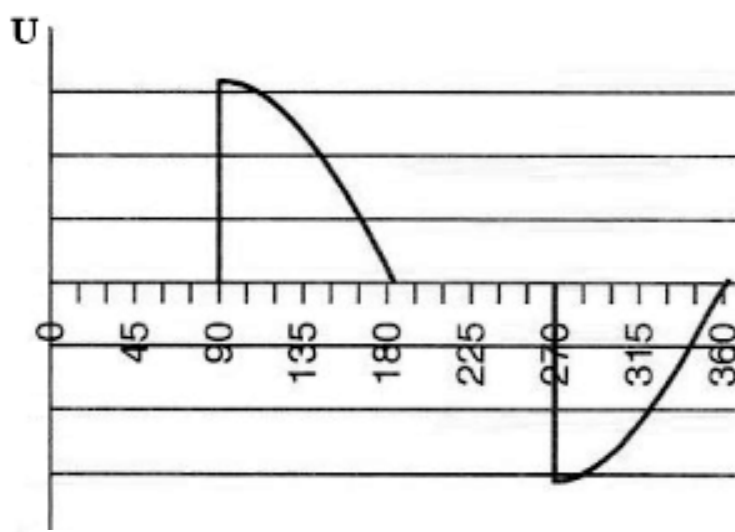


Figura 3.5 - Disparo dos tiristores a 90°

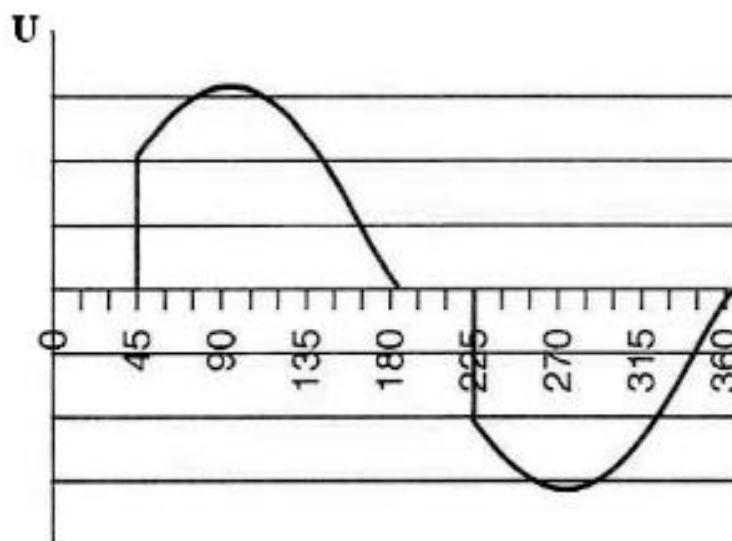


Figura 3.6 - Disparo dos tiristores a 45°

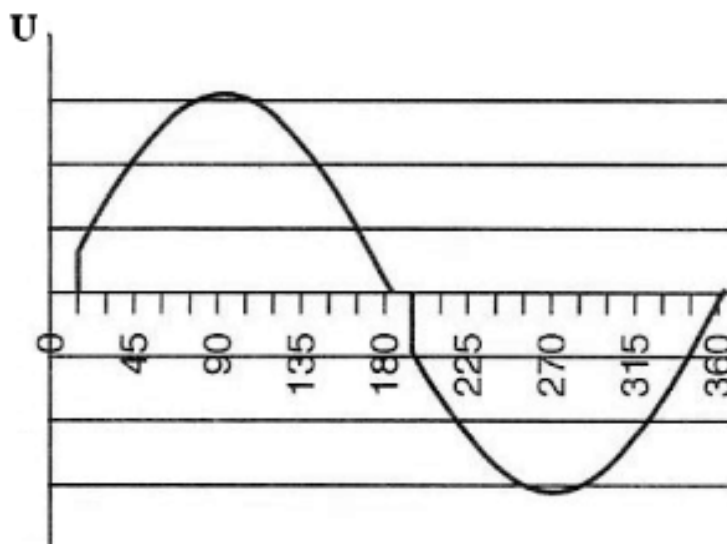


Figura 3.7 - Disparo dos tiristores a 15°

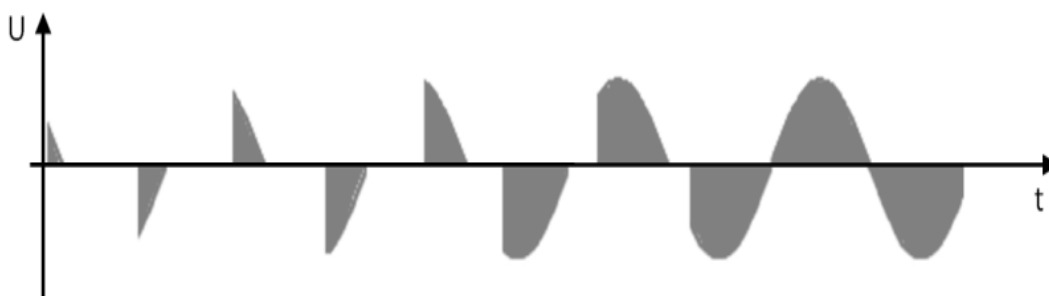


Figura 3.8 - Rampa da tensão de arranque

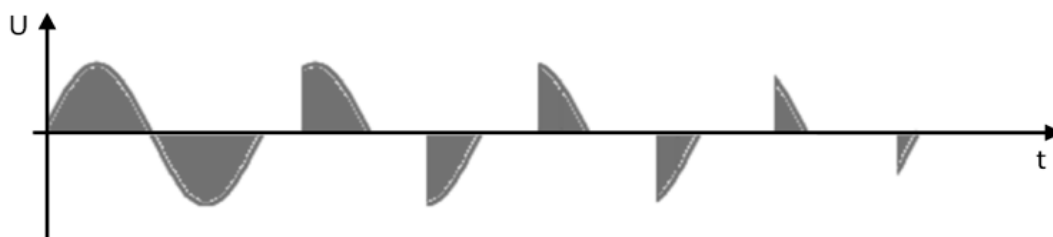


Figura 3.9 - Rampa da tensão de desaceleração

3.5 CIRCUITO DE CONTROLO

O circuito de controlo é constituído pelo conjunto de circuitos responsável pelo comando, monitorização e protecção dos componentes do circuito de potência, assim como dos circuitos de sinalização e interface com o utilizador.

Actualmente, a maioria dos soft-starter são controlados por microprocessadores, sendo por isso, totalmente digitais. Alguns fabricantes como a Schneider produzem alguns modelos analógicos, no sentido de oferecer uma solução mais barata para aplicações onde não são necessárias funções sofisticadas.

A Schneider desenvolveu uma tecnologia de controlo designada por TCS (*Torque Control System*) que permite, o controlo da tensão e da corrente do motor, de forma que, o binário de aceleração e de desaceleração sejam lineares. Esta tecnologia utiliza lógica difusa, (*Fuzzi Logic*) que permite respostas mais rápidas, precisas e estáveis no controlo do binário [SCHNEIDER, 2008].

3.6 PARAMETRIZAÇÃO E FUNÇÕES DO SOFT-STARTER

Além das características referidas anteriormente, os soft-starters também apresentam funções programáveis, que permitem configurar o sistema de accionamento de acordo com as necessidades do utilizador. De seguida, são descritas algumas das funções mais importantes:

3.6.1 Rampa da Tensão de Aceleração

Os soft-starters tem uma função muito simples, que controla o tempo de aceleração através da variação do ângulo de disparo da ponte tiristorizada, gerando na saída, uma tensão eficaz gradual e continuamente crescente, até que seja atingida a tensão nominal da rede como podemos observar na figura 3.10.

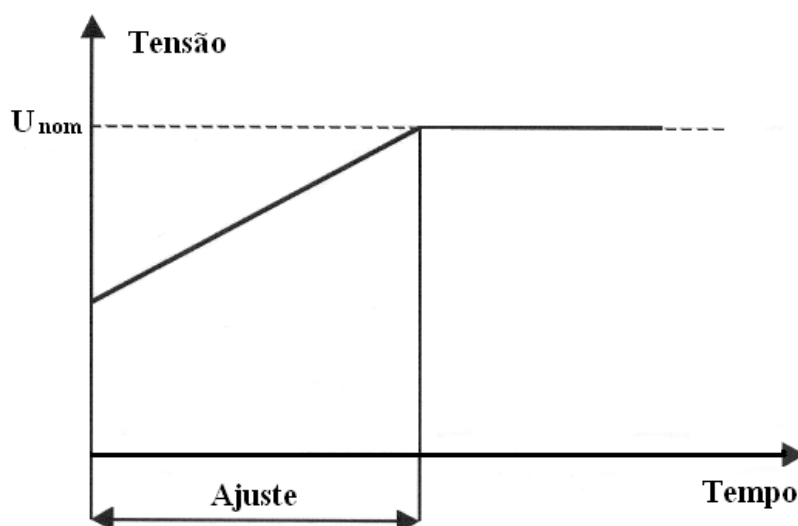


Figura 3.10 - Rampa da tensão aplicada ao motor na aceleração

Quando ajustamos um valor de tempo da rampa, e da tensão de arranque, isto não significa que o motor irá acelerar de zero até a sua rotação nominal no tempo definido no ajuste. Na realidade, depende das características dinâmicas do sistema motor/carga. Tanto o valor da tensão, como o tempo de subida são valores ajustáveis dentro de uma faixa que varia de fabricante para fabricante.

Não existe uma regra prática que possa ser aplicada para definir qual o valor do tempo de ajuste, e qual o melhor valor de tensão para que o motor possa garantir a aceleração da carga, no caso do soft-starter utilizado na parte prática o tempo de ajuste varia entre 1 e 10 segundos.

3.6.2 Rampa da Tensão de Desaceleração

Existem duas possibilidades para efectuar a desaceleração do motor, por inércia ou controlada. Na desaceleração por inércia, o soft-starter leva a tensão de saída instantaneamente a zero, implicando que o motor não produza nenhum binário na carga, que por sua vez, irá perder velocidade, até que toda energia cinética seja dissipada. A equação seguinte mostra matematicamente como se expressa essa energia:

$$E_c = \frac{1}{2} J \omega^2 \quad [3.1]$$

onde E_c é a energia cinética em Joules, J é o momento de inércia total em kg.m^2 e ω é a velocidade angular em rad/s .

Na desaceleração controlada, o soft-starter reduz gradualmente a tensão de saída até um valor mínimo previamente definido pelo utilizador, que no caso do Altivar utilizado pode variar entre 1 e 10 segundos.

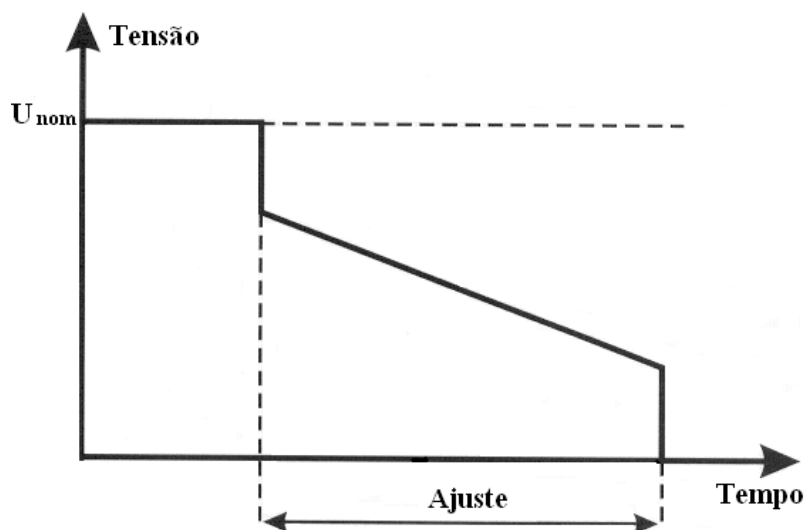


Figura 3.11 - Comportamento da tensão na desaceleração

Neste caso, reduzimos a tensão aplicada ao motor, o que provoca uma diminuição do binário. A perda de binário reflecte-se no aumento do escorregamento e o aumento do escorregamento faz com que o motor perca velocidade. Se o motor perde velocidade a carga accionada também perde. Este tipo de recurso é muito importante, para aplicações em que a desaceleração suave é imperativa do ponto de vista mecânico, como acontece nas centrifugadoras, tapetes rolantes, entre outros. No caso particular das centrifugadoras é importantíssimo este tipo de desaceleração, pois minimiza bastante o efeito do “golpe de aríete” (variação brusca de pressão) [AGOSTINHO e MARTINS, 2008].

3.6.3 Função Boost

Existem cargas, que no momento de arranque, exigem um esforço extra do accionamento em função do elevado binário resistente, por exemplo um compressor.

Nestes casos, normalmente o soft-starter tem de aplicar ao motor uma tensão maior que a ajustada na rampa de tensão de aceleração, isto é possível utilizando uma função chamada “Boost”. Esta função faz com que seja aplicado ao motor um impulso de tensão com amplitude e duração programáveis para que o motor desenvolva um binário de arranque suficiente para vencer o atrito, e assim acelerar a carga. No caso do soft-starter utilizado na parte prática este tempo é fixo e corresponde a 200 milissegundos.

Devemos ter algum cuidado com esta função, pois só deve ser utilizada em casos onde seja estritamente necessária. Como a tensão de arranque atinge valores próximo da tensão nominal, mesmo que por um pequeno intervalo de tempo, a corrente de arranque irá atingir valores muito elevados. Isto é claramente indesejável, pois a utilização do soft-starter deve garantir um arranque suave, quer eléctrico, quer mecânico. Desta forma, devemos considerar este recurso como a última hipótese, ou quando realmente ficar óbvia a condição severa de arranque. A figura 3.12 representa o arranque com a função boost activa [TELEMECANIQUE, 2008].

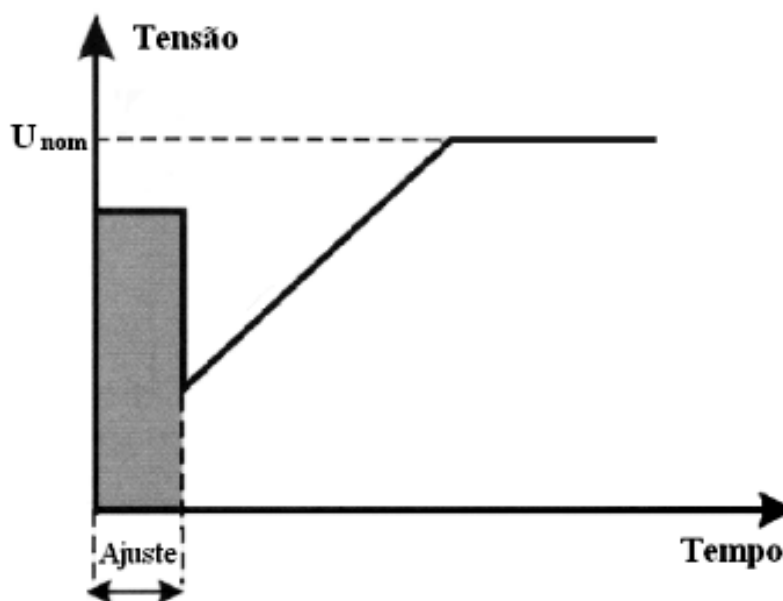


Figura 3.12 - Representação gráfica da função "Boost"

3.6.4 Função Limite de Corrente

Na maioria dos casos, onde a carga apresenta uma inércia elevada é utilizada uma função denominada limite de corrente. Esta função faz com que o sistema rede/soft-starter forneça ao motor somente a corrente necessária para que seja executada a aceleração da carga. No entanto, no caso do soft-starter utilizado para a realização deste trabalho, esta função não está presente, mas é indirectamente ajustada através de um potenciómetro que ajusta o nível de tensão inicial aplicada ao motor.

O recurso à função limite de corrente é sempre útil pois garante um accionamento realmente suave e torna-se óptimo para a viabilização de arranques de motores em locais onde a rede se encontra no limite da sua capacidade.

Normalmente, nestes casos, a condição da corrente de arranque faz com que o sistema de protecção da instalação dispare, impedindo assim o funcionamento normal da instalação. Ocorre, então, a necessidade de se impor um valor limite de corrente de arranque de forma a permitir o accionamento como está exemplificado na figura 3.13.

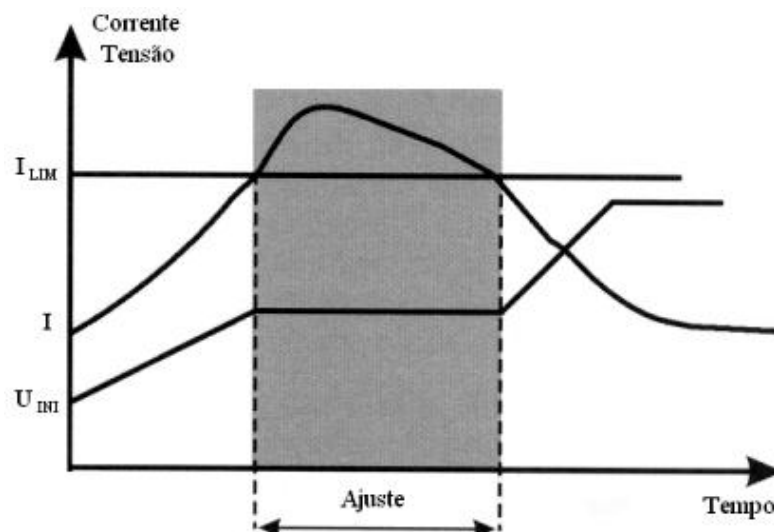


Figura 3.13 - Limite da corrente

Esta função é muito utilizada no arranque de motores, cuja carga apresenta um valor muito elevado do momento de inércia. Em termos práticos, podemos dizer que esta função é utilizada quando não obtemos sucesso com a rampa de tensão simples, ou mesmo quando é necessário ajustar uma rampa de tensão, de tal forma que a tensão de arranque fique próxima dos níveis de outros sistemas de arranque vistos anteriormente [AGOSTINHO e MARTINS, 2008].

3.6.5 Função *Pump Control*

Esta função é utilizada, especialmente para a aplicação no arranque com soft-starter em sistemas de bombeamento. Trata-se na realidade de uma configuração específica para colmatar este tipo de aplicação, onde normalmente é necessário estabelecer uma rampa de tensão na aceleração, uma rampa de tensão na desaceleração e a habilitação de protecções. No soft-starter utilizado esta função não está disponível, no entanto, temos a possibilidade de separadamente podermos configurar a rampa de aceleração e de desaceleração, que nalguns casos pode ser uma vantagem, uma vez que, permite que a rampa de aceleração seja diferente da rampa de desaceleração.

A rampa de tensão na desaceleração é activa para minimizar o “golpe de aríete” (variação brusca de pressão), prejudicial ao sistema como um todo. São habilitadas também as protecções de sequência de fase e subcorrente.

3.6.6 Função Economia de Energia

Um soft-starter que tem características de optimização de energia simplesmente altera o ponto de operação do motor como podemos verificar na figura 3.14. Esta função, reduz a tensão aplicada ao motor, diminuindo as perdas no entreferro, que são a maior parcela de perdas do motor. Esta economia de energia é bastante significativa principalmente para cargas não superiores a 50% da nominal.

No entanto, esta função tem algumas desvantagens desde logo o facto de criar harmónicos na corrente, perturbando a rede, devido ao aumento do ângulo de disparo dos tiristores de forma a reduzir a tensão.

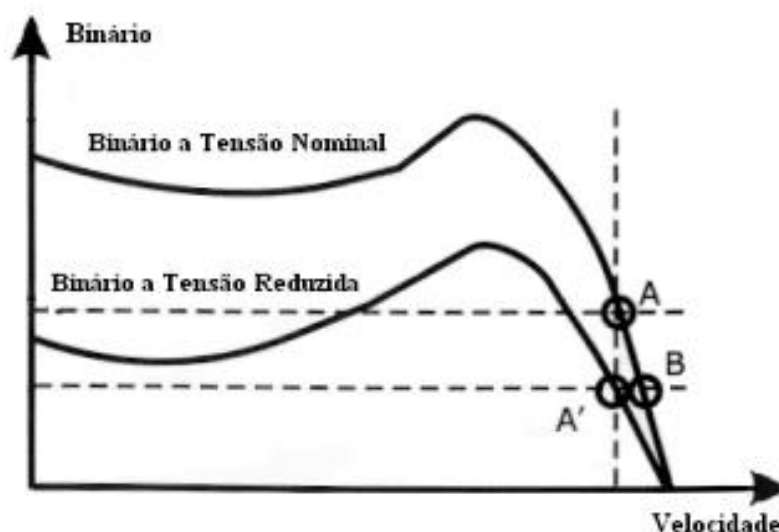


Figura 3.14 - Equilíbrio entre o conjugado e a tensão

Na figura podemos verificar que, quando a tensão do motor corresponde ao seu valor nominal e a carga exige o binário máximo, o ponto de operação é definido pelo ponto A. Se a carga diminui e o motor está alimentado com uma tensão constante, a velocidade aumenta ligeiramente, a corrente diminui e o ponto de operação passa para a curva do ponto B. Por ser um motor onde o binário desenvolvido é proporcional ao quadrado da tensão aplicada, existe uma redução do binário quando reduzimos a tensão. Caso esta tensão diminua de forma controlada, o ponto de operação passa a ser o ponto A', com uma ligeira redução da velocidade [MELO e ROSA, 2003].

3.7 PROTECÇÕES DO SOFT-STARTER

3.7.1 Falta de Fase

Detecta falha e falta de fase na entrada do soft-starter, comuta o relé de falha e inibe o disparo dos tiristores. O relé abre, se ocorrer tanto falta de fase na entrada como na saída, assim como falha interna que provoque falta de corrente numa das fases.

No caso de o motor estar a trabalhar em vazio, esta protecção é feita por comparação entre as fases, e não através da leitura da tensão e da corrente em cada fase, já que em vazio no caso de o motor gerar tensão nominal na fase em falta, leva a que esta protecção não fique activa. Devemos ter cuidado durante a fase de teste com o motor em vazio, no entanto habitualmente o motor trabalha com carga, sendo este pormenor pouco importante.

3.7.2 Curto-Circuito

Caso exista uma corrente instantânea de valor muito superior à corrente nominal do soft-starter, o relé de segurança abre e inibe o disparo dos tiristores. Esta protecção não dispensa o uso de fusíveis ultra-rápidos para protecção dos tiristores, já que as condições de curto-circuito variam, dependendo da impedância da rede, podendo atingir valores elevados de corrente. Neste caso, o fusível é o primeiro a actuar, protegendo de forma mais eficiente os tiristores. Além disto, em caso de falha geral do equipamento os fusíveis garantem uma protecção mais adequada.

3.7.3 Sobre-Corrente

Esta protecção é ajustável em alguns soft-starters, de 70 a 120% da corrente nominal. Fica activa após alguns segundos de sobrecarga, abrindo o relé de falha e inibe o disparo dos tiristores. Esta função, esta presente em todos os soft-starters, assinalando a ocorrência de sobrecarga acima dos níveis para o qual foi dimensionado ou ajustado.

3.7.4 Protecção Térmica

A protecção térmica é feita através de um sensor térmico nos dissipadores de calor dos tiristores. Caso ocorra um aumento da temperatura acima do normal, ocorre a indicação da falha abrindo o relé de segurança, inibindo o disparo dos tiristores.

3.8 CIRCUITO *BY PASS*

O circuito *By Pass* tem a função de um contactor em paralelo com o soft-starter, que no final da rampa de aceleração, comandado pelo próprio sinal da tensão nominal, fecha ficando em paralelo com os tiristores, assumindo a corrente nominal do motor. Na rampa de desaceleração, o contactor abre sem faísca, uma vez que os tiristores assumem a corrente do motor, sem interrupção e inicia-se a rampa de desaceleração, com a interrupção da corrente pela passagem por zero, portanto sem disrupção [AGOSTINHO e MARTINS, 2008].

O contactor de *By Pass* apresenta, portanto, uma durabilidade muito maior pois não oferece disrupção nos contactos na abertura e no fecho. Por outro lado não apresenta perdas e aquecimento após o arranque, logo sem necessidade de arrefecimento para arranques pouco frequentes, o que permite uma maior eficiência energética.

INVERSOR DE FREQUÊNCIA

4.1 INTRODUÇÃO

No início da década de 70, os sistemas de variação de velocidade tradicionais eram os variadores mecânicos, os variadores hidráulicos e os variadores electromagnéticos. Os variadores mecânicos utilizavam além dos motores de indução, outros dispositivos para efectuar a redução da velocidade, tais como, polias, correias ou correntes. Os variadores hidráulicos do tipo hidrocínético trabalhavam através de acoplamento hidráulico. Já os variadores electromagnéticos mudaram o conceito de variação exclusivamente mecânica utilizando um sistema de discos acoplados a bobinas que tinham um campo magnético variável, e assim, permitiam a variação de binário e de velocidade [WEG, 2009].

Nos capítulos anteriores vimos diferentes alternativas de arranque do motor de indução a partir da rede de alimentação. Em todos os casos a frequência de alimentação é constante e igual à da rede 50 Hz.

Neste capítulo vamos abordar o inversor de frequência, que é um equipamento eléctrico capaz de variar os valores da frequência de alimentação do motor, permitindo desta forma uma variação da velocidade de rotação do motor.

4.2 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

A velocidade dos motores de indução é determinada pela frequência da tensão de alimentação, pelo seu número de pólos e pelo seu factor de carga. Assim, para controlar a velocidade destes motores, sem recurso a dispositivos mecânicos externos, é necessário variar a frequência da tensão de alimentação. Como se pode observar na figura 4.1, o objectivo dos inversores de frequência é forçar o deslocamento da curva do binário em função da velocidade, mantendo o binário máximo e o declive da região linear da curva aproximadamente constante.

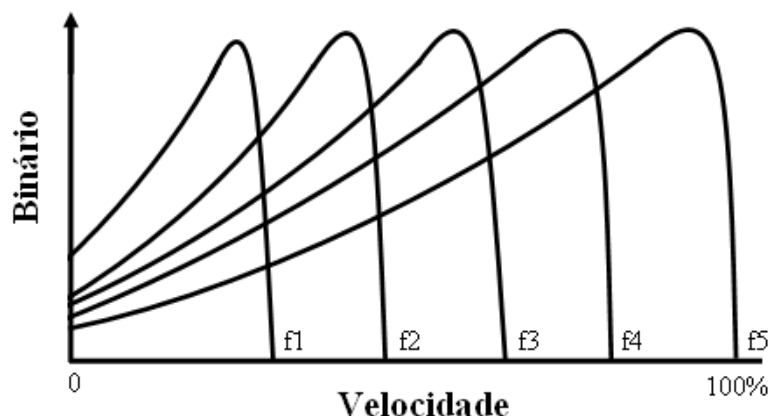


Figura 4.1 - Relação entre as curvas de binário-velocidade dos motores de indução e a frequência fundamental da tensão de alimentação

De entre os vários métodos de variação de velocidade, os inversores de frequência são dos que mais se têm evidenciado pelo rigor e precisão. Os inversores de frequência por fonte de tensão e modulação por largura de impulso são os que mais se utilizam para o controlo de motores de indução.

O esquema de funcionamento de um inversor e os seus principais componentes estão representados no esquema eléctrico da figura 4.2 [WEG, 2008].

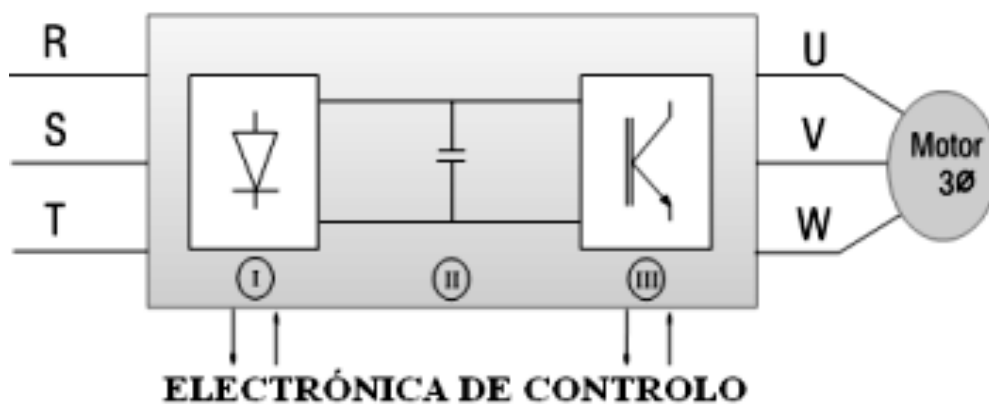


Figura 4.2 - Esquema eléctrico dos componentes de um inversor de frequência

No esquema temos como:

I. Circuito Rectificador

Composto por pontes trifásicas ou monofásicas (como é o caso do Altivar 11) a diodos, que fazem a rectificação da tensão e frequência alternada da rede para um valor constante, transformando-a em corrente continua.

II. Circuito de Filtragem

Este circuito é composto por condensadores electrolíticos, que têm como função principal diminuir o *ripple*, ou seja, eliminar as flutuações na tensão rectificadora e garantir que fornecemos tensão contínua ao circuito inversor. Além desta função, este circuito tem como objectivo a troca de potência, quer da rede para o motor, quer do motor para a rede se este trabalhar como gerador, sendo os condensadores responsáveis por uma maior facilidade na troca de energia.

III. Circuito Inversor

No circuito inversor a tensão contínua vinda do andar anterior e é transformada em corrente alternada de frequência variável. Este circuito é composto por semicondutores e utilizando técnicas de modulação por largura de impulsos (PWM), consegue-se variar o valor médio da tensão aplicada ao motor. Este processo é controlado através de um microcontrolador que juntamente com um módulo de memórias, consegue que o processo se desenvolva dentro das características desejadas.

O modo de funcionamento do inversor consiste em comutar a tensão contínua com uma frequência da ordem dos kHz (frequência de comutação), resultando à saída três formas de onda compostas por vários impulsos de diferentes larguras.

Desta forma, actua-se sobre a amplitude e a frequência da tensão de alimentação do motor, permitindo controlar assim a velocidade angular e o binário. Um dos métodos de controlo mais usados para velocidades abaixo da velocidade nominal, consiste em manter aproximadamente constante a relação V/f. Acima da velocidade nominal a tensão mantém-se constante e igual ao seu valor nominal, pelo que o fluxo magnético no entreferro decresce à medida que a frequência aumenta. Este tipo de inversores apresenta um rendimento bastante satisfatório, uma distorção harmónica à saída relativamente reduzida e um factor de potência bom.

Para além do controlo de velocidade, os inversores de frequência podem permitir, entre outras funcionalidades, arranques e paragens suaves e protecção térmica do motor. Existem inversores com rectificadores controlados que permitem funcionar com um factor de potência aproximadamente unitário ou com a possibilidade de injeção de energia na rede quando o motor funciona em modo de paragem (operação regenerativa). Tipicamente, a energia de paragem é dissipada, por efeito de Joule, numa resistência. A regeneração energética é particularmente vantajosa para, por exemplo, cargas com elevada inércia e com arranques e paragens frequentes.

Apesar do controlo de velocidade com inversores conduzir a uma melhoria dos processos, ao menor desgaste do equipamento mecânico e do motor devido aos arranques/paragens suaves e poupanças de energia significativas, pode no entanto, ter algumas desvantagens significativas, como é o caso da possibilidade de produção de interferências electromagnéticas, injeção de harmónicos de corrente na rede e redução do rendimento e do tempo de vida dos motores devido ao aumento da temperatura, à ocorrência de descargas parciais no seu sistema de isolamento e à circulação de correntes nos seus rolamentos. Todavia, os motores mais recentes projectados para serem alimentados por inversores, são mais tolerantes a estes fenómenos [ALMEIDA, FERREIRA e BOTH, 2005].

Não é por acaso que tem crescido significativamente o número de aplicações em que a variação de velocidade de motores de indução é feita através de inversores de frequência, já que estes além das vantagens mencionadas anteriormente permitem [PIRES, 2006]:

- *Controlo à distância*: nos sistemas electrónicos de variação de velocidade, o equipamento de controlo pode situar-se numa área conveniente, ficando apenas o motor accionado na área do processo, ao contrário do que acontece com os sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.
- *Redução de custos*: os arranques directos provocam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema eléctrico. Os inversores de frequência proporcionam arranques suaves, reduzindo custos de manutenção.
- *Aumento de produtividade*: os processos industriais geralmente são sobredimensionados na perspectiva de no futuro aumentar a produtividade. Os inversores de frequência possibilitam o ajuste da velocidade mais adequada ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.
- *Eficiência energética*: o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controlo. Os inversores de frequência apresentam um rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Os motores eléctricos também apresentam alto rendimento, tipicamente de 70% em pequenas máquinas e 95% ou mais em máquinas maiores, trabalhando sob condições nominais. Na variação de velocidade, a potência fornecida pelo motor é variada de forma optimizada, influenciando directamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + inversor).
- *Versatilidade*: os inversores de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de binário variável, o inversor altera a tensão do motor para

compensar a queda de rendimento que normalmente resulta da diminuição da carga. Com cargas de binário constante existe uma melhoria no rendimento do sistema, devido à capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade, que introduzem perdas adicionais.

- *Maior qualidade*: o controlo preciso da velocidade obtido pelos inversores resulta na optimização dos processos, e conseqüentemente, um produto final de melhor qualidade.

4.3 CURVAS CARACTERÍSTICAS

Com a utilização do inversor de frequência as curvas características de binário, potência e corrente do motor alteram-se. Isto porque passamos a controlar a frequência e a tensão aplicada ao motor de indução.

Quando pretendemos um binário constante, para diferentes velocidades do motor, temos de variar a tensão de forma proporcional à variação da frequência de forma a manter o fluxo constante. A variação da tensão e da frequência é linear até atingirmos a tensão nominal do motor como podemos verificar na figura 4.3.

Acima da tensão nominal variamos apenas a frequência aplicada ao enrolamento do estator [WEG, 2008].

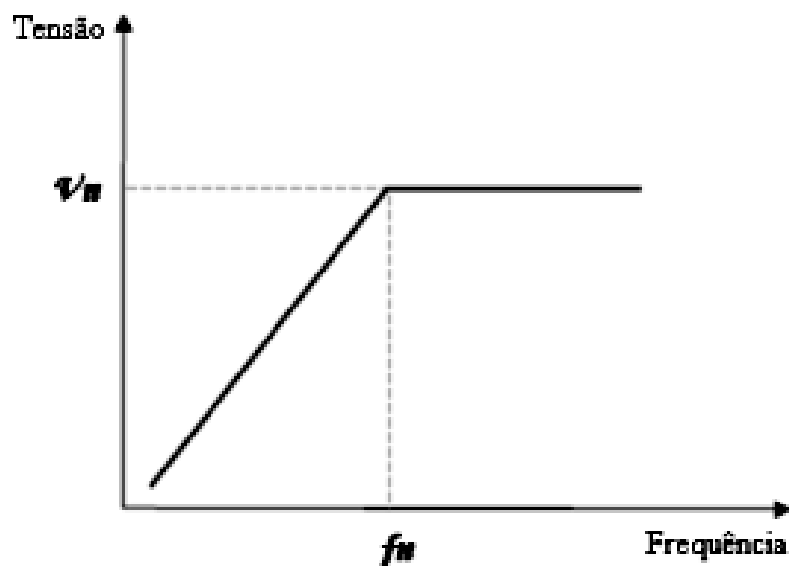


Figura 4.3 - Curva representativa da tensão em função da frequência

Acima da frequência nominal existe uma área, a qual designamos como enfraquecimento de campo, uma vez que o fluxo diminui devido ao aumento da frequência que não pode ser acompanhado com o aumento da tensão, o que provoca também uma

diminuição do binário. A curva característica de binário em função da frequência está representada na figura 4.4.

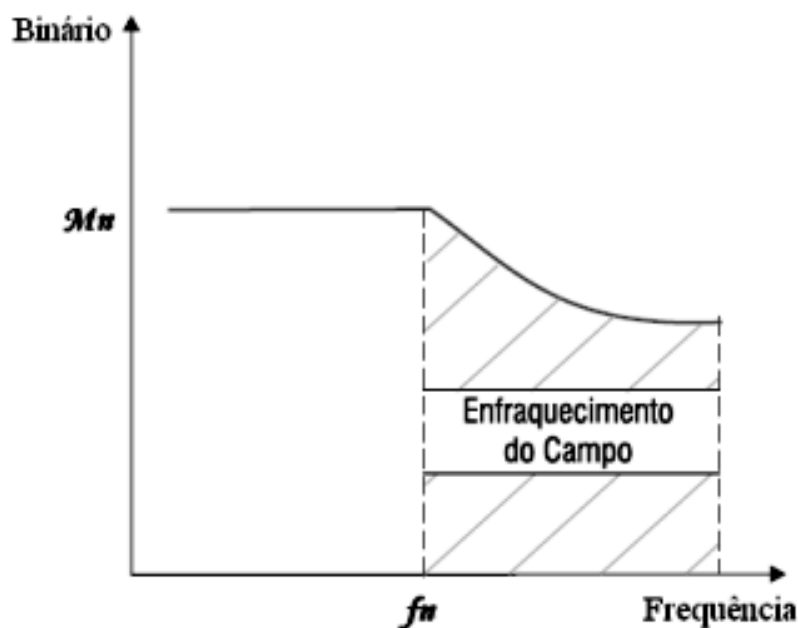


Figura 4.4 - Curva características de binário em função da frequência

Da figura 4.4 verificamos que, o binário permanece constante até atingirmos a frequência nominal e acima desta o binário começa a diminuir gradualmente. A potência de saída do inversor de frequência aumenta linearmente até atingirmos a frequência nominal, seguindo a variação da relação entre a tensão e a frequência, permanecendo constante acima da frequência nominal como podemos observar na figura 4.5.

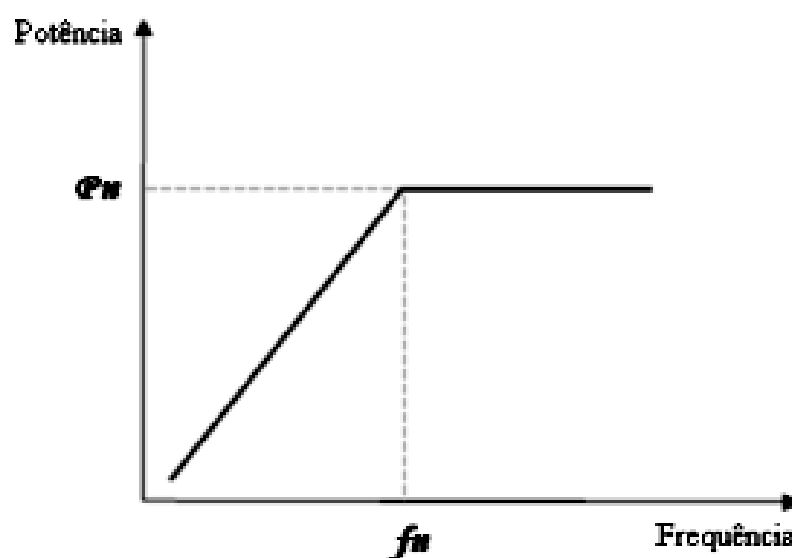


Figura 4.5 - Curva característica da potência de saída do inversor de frequência

4.4 INVERSOR TRIFÁSICO EM PONTE

O inversor é composto de seis tiristores implementadas numa configuração, como mostra a figura 4.6.

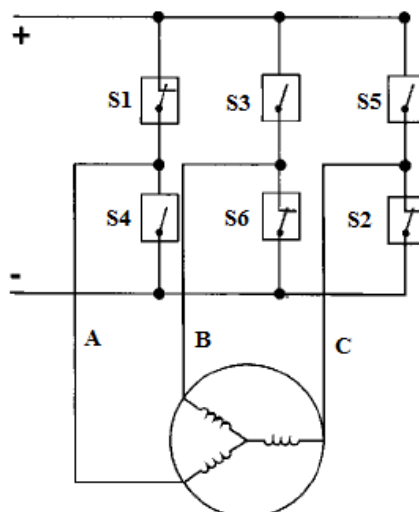


Figura 4.6 - Configuração do circuito inversor e ligação ao motor

Neste tipo de configuração em cada braço do inversor [(S1-S4), (S3-S6), (S2-S5)], os tiristores são comandados de forma complementar e os comandos dos braços são desfasados de 120° uns dos outros, na sequência de fase ABC. O diagrama da lógica de condução mostra as ligações entre os terminais de corrente contínua X e Y de entrada e os terminais A, B e C de saída. As tensões fase-fase de saída V_{AB} , V_{BC} e V_{CA} são facilmente deduzidas a partir do diagrama das figuras 4.7 e 4.8, tendo por base que a cada instante elas assumem um dos valores $V_{XY} = E$; $V_{YX} = -E$; e $V_{XX} = V_{YY} = 0$, de acordo com o diagrama de condução.

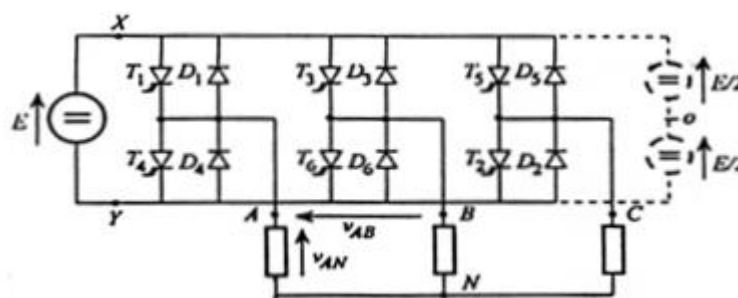


Figura 4.7 - Inversor de tensão trifásico

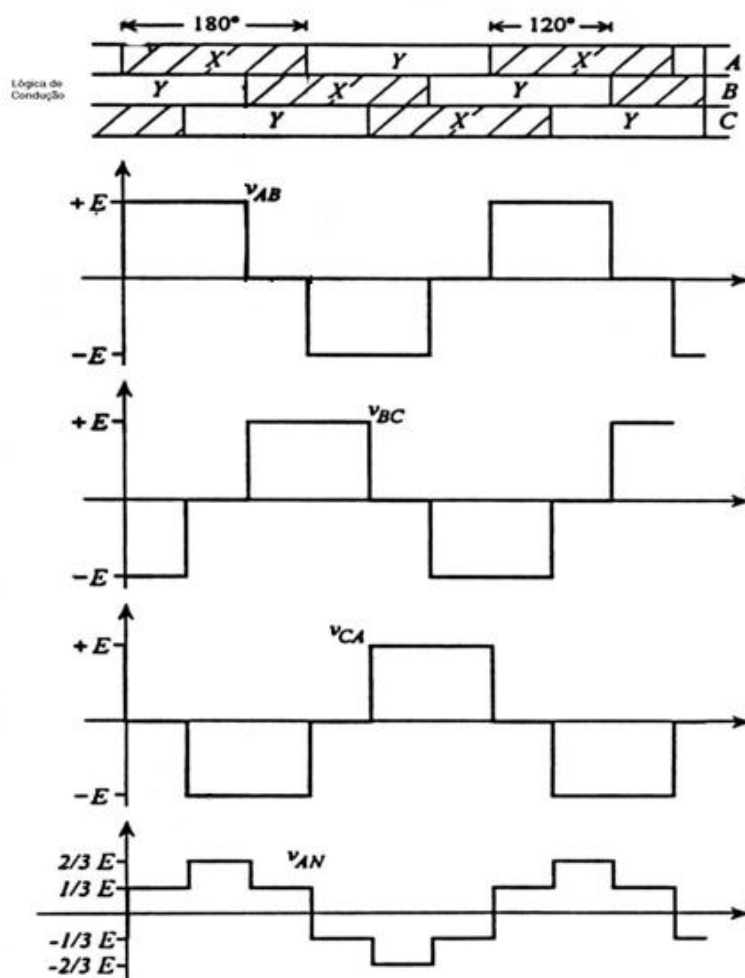


Figura 4.8 - Forma das tensões de saída do inversor

Por outro lado, as tensões fase-neutro podem ser determinadas a partir das tensões fase-fase respeitando as seguintes relações [AGOSTINHO e MARTINS, 2008]:

$$V_{AN} = \frac{V_{AB} - V_{CA}}{3}$$

[4.1]

$$V_{BN} = \frac{V_{BC} - V_{AB}}{3}$$

[4.2]

$$V_{CN} = \frac{V_{CA} - V_{BC}}{3}$$

[4.3]

4.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA PWM

Um inversor de frequência PWM realiza o controlo da frequência e da tensão no bloco de saída do inversor. A tensão de saída aplicada à carga tem uma amplitude constante, formada por uma sucessão de ondas rectangulares e através da modulação por largura de impulsos, a tensão média é controlada como podemos observar na figura 4.9.

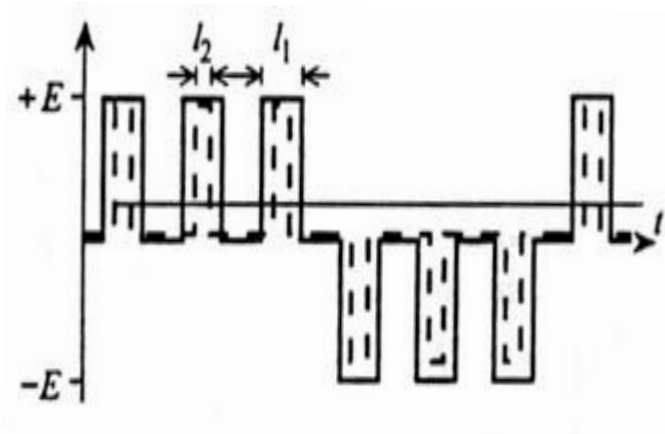


Figura 4.9 - Modulação por largura de impulsos

A aplicação da técnica de modulação PWM, consiste em obter um sinal alternado de baixa frequência através da modulação em alta frequência. De forma analógica, é possível obter este tipo de modulação, comparando a tensão de referência com um sinal triangular simétrico, cuja frequência, determina a frequência de comutação do inversor. A frequência da onda triangular, chamada portadora, deve ser no mínimo 10 vezes superior à frequência máxima da onda de referência.

A largura dos impulsos de saída do inversor varia de acordo com a amplitude relativa da referência em comparação com a portadora. Temos assim, uma modulação PWM, denominada, em inglês, como *Pulse Width Modulation* [CAMARGO e REZEK, 2008].

Desta forma, um inversor PWM trifásico é uma associação de três inversores, em que as tensões de saída são desfasadas de 120° e o comando dos tiristores é feito através de três ondas sinusoidais de referência, como podemos ver na figura 4.10. Podemos ainda ver, as formas de onda das tensões fase-neutro V_a , V_b , V_c , bem como a forma de onda da tensão entre as fases A e B, V_{AB} , indicando-se as respectivas sinusóides correspondentes às fundamentais [CABRITA, 1997].

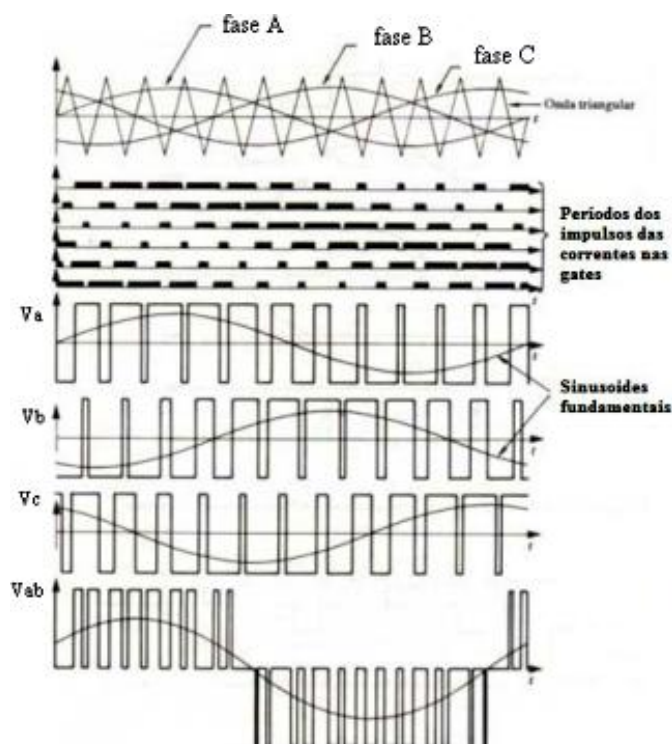


Figura 4.10 - Modulação por largura de impulsos e formas de onda da tensão

A utilização de inversores de frequência PWM provoca distorções nas formas de ondas da tensão e corrente do motor alimentado. A técnica de modulação PWM produz uma forma de tensão com sucessivos impulsos rectangulares de curta duração, onde se destaca um considerável conteúdo de harmónicos. Estes aumentam as perdas nos motores de indução como iremos ver nos itens seguintes.

4.6 HARMÓNICOS

As perturbações provocadas pelos harmónicos tornaram-se importantes na década de 80, quando se iniciou a substituição de equipamentos eléctricos e electromecânicos por equipamentos electrónicos.

As cargas designam-se como lineares, ou seja, sinusoidais, mesmo quando estão desfasadas, em função da sua natureza: resistiva, indutiva ou capacitiva.

Nas cargas não lineares, essa proporcionalidade não existe, uma vez que a corrente é transferida apenas durante uma parte do ciclo, e mesmo que a tensão seja sinusoidal, a corrente não é.

Os harmónicos são responsáveis por aumentar a temperatura dos condutores, dos motores eléctricos, e também provocarem um aumento da tensão nos locais onde estão instalados condensadores, através do efeito da ressonância.

As correntes que circulam nas linhas são somadas vectorialmente com as correntes originadas por cargas em equipamentos electrónicos que adquirem valores significativos, e que trazem perturbações na rede.

Chama-se ordem de um harmónico, ao número inteiro obtido pelo quociente da frequência desse harmónico, pela frequência da componente fundamental [NAHVI e EDMINISTER, 2003]:

$$h = \frac{f_h}{f_1} \quad [4.4]$$

onde h corresponde à ordem do harmónico, f_h corresponde a frequência do harmónico de ordem h e f_1 é a frequência do harmónico fundamental.

Os harmónicos podem ser classificados segundo a sua ordem, frequência e sequência, como podemos ver na tabela 4.1:

Tabela 4.1 - Classificação dos harmónicos

<i>Ordem</i>	<i>Frequência [Hz]</i>	<i>Sequência</i>
<i>1</i>	50	+
<i>2</i>	100	-
<i>3</i>	150	0
<i>4</i>	200	+
<i>5</i>	250	-
<i>6</i>	300	0
<i>h</i>	h.50	

A situação desejada seria aquela em que existe apenas o harmónico de ordem 1, com 50 Hz, chamado de harmónico fundamental. Podemos observar a existência de harmónicos de ordem ímpares, encontradas em instalações eléctricas em geral, e de ordem pares, encontradas somente em casos de assimetrias.

As sequências podem ser positivas, negativas ou nulas. No caso dos motores, os harmónicos de sequência positiva superiores à fundamental, tendem a aumentar a velocidade para valores superiores à velocidade nominal, provocando aquecimento devido a sobrecorrentes, reduzindo a vida útil do motor. A sequência negativa, tendem a fazer girar o motor no sentido inverso ao do campo girante provocado pelo harmónico fundamental, produzindo uma acção de travagem, o que reduz o binário e provoca aquecimentos indesejados. Os harmónicos de sequência zero, somam-se de forma algébrica em circuitos com condutor neutro, o que leva a correntes elevadas, algumas vezes superiores aos valores da corrente nas fases.

Os harmônicos são expressos através do seu valor eficaz, uma vez que aquecimento produzido pela onda distorcida está relacionado com este.

Para uma onda sinusoidal pura, o valor eficaz é igual ao valor máximo dividido pela raiz quadrada de dois. Para uma forma de onda distorcida, em regime permanente, a energia total dissipada por efeito Joule é a soma das energias dissipadas pelas componentes dos harmônicos.

4.7 INTERACÇÃO ENTRE A REDE E O INVERSOR

O sistema motor + inversor de frequência é visto pela fonte de alimentação como uma carga não linear, em que a corrente possui harmônicos (componentes de frequências múltiplas da frequência da rede). De forma geral, considera-se que o rectificador produz harmônicos de ordem h na parte AC, ou seja, na rede.

Assim, no caso da ponte rectificadora com 6 diodos (6 impulsos), os principais harmônicos geradas são os de 5ª e 7ª ordem, cuja amplitude varia de 10% a 40% do harmónico fundamental dependendo da impedância de rede. Já para 12 impulsos (12 diodos) os harmónicos mais significativos são os de 11ª e 13ª ordem. Os harmónicos de ordem superior geralmente possuem menor amplitude e são mais fáceis de filtrar.

O parâmetro que mostra o quanto os harmónicos distorcem a rede é o THD (Distorção Harmónica Total), fornecido pelo fabricante do conversor e definido como:

$$TDH = \sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} \left(\frac{f_h}{f_1}\right)^2} \quad [4.5]$$

onde **THD** corresponde à distorção harmónica total, f_h corresponde a frequência dos harmónicos de ordem h em valor eficaz e f_1 é a frequência do harmónico fundamental em valor eficaz [PIRES, 2006].

A figura 4.11 corresponde à corrente medida à entrada de um inversor PWM de 6 diodos, para uma rede com uma impedância reduzida.

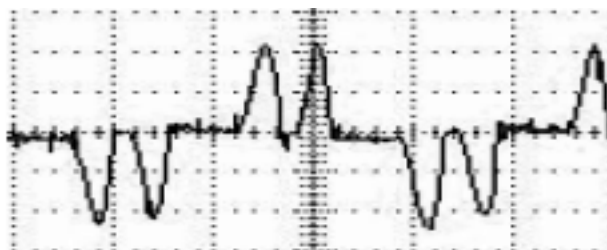


Figura 4.11 - Corrente à entrada de um inversor PWM

4.8 INTERACÇÃO ENTRE CONVERSOR E MOTOR

O motor de indução quando submetido a uma tensão PWM, proveniente de um inversor de frequência, está sujeito a tensões com harmónicos (componentes de frequência acima da frequência fundamental). Dependendo da modulação PWM utilizada, da frequência de comutação e de outras particularidades do controlo, o motor fica sujeito ao aumento das perdas, temperatura, níveis de vibração e ruído e ainda há diminuição do rendimento.

Além disso, podem aparecer outros efeitos quando a alimentação do motor é feita com inversores, como é o caso do “stress” do sistema de isolamento e correntes pelos mancais, que embora relevantes, não se devem especificamente aos harmónicos. As figuras 4.12 e 4.13 ilustram as formas de onda da tensão e corrente aos terminais do motor, quando alimentados por inversores PWM.

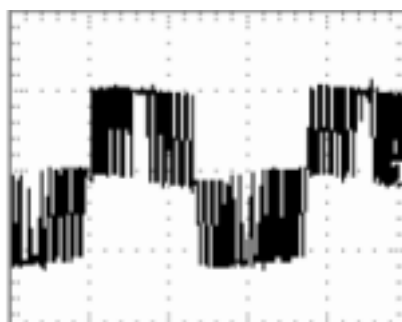


Figura 4.12 - Tensão PWM aos terminais do motor

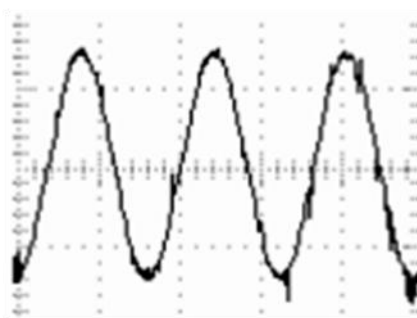


Figura 4.13 - Corrente aos terminais do motor

Compreende-se, que o motor “vê” uma tensão com impulsos (PWM) e uma corrente praticamente sinusoidal, portanto, os harmónicos de maior amplitude no motor estão na tensão.

Basicamente, para reduzir os harmónicos gerados por um inversor de frequência PWM, existem as seguintes soluções [PIRES, 2006]:

Tabela 4.2 - Métodos e características de redução dos harmônicos

<i>Método de Resolução dos Harmônicos</i>	<i>Características da Solução</i>
<i>Instalar filtros passivos na saída (L,LC(sinusoidal),dV/dt)</i>	- Aumenta os custos da instalação - Inibe a utilização dos modos vectoriais - Redução da tensão e potência do motor
<i>Utilização de inversores com mais níveis</i>	- Aumenta os custos - Reduz a fiabilidade do inversor - Aumenta a complexidade do controlo
<i>Melhoria da qualidade da modulação PWM através do Space Vector Modulation (SVM)</i>	- Não aumenta os custos - Melhoria no controlo da tensão - Aumenta o rendimento
<i>Aumentar a frequência de comutação</i>	- Reduz o rendimento do inversor - Aumenta as correntes de fuga pela terra

4.9 CONSIDERAÇÕES EM RELAÇÃO AO RENDIMENTO

Não existe nenhuma norma ou procedimento que especifique a forma de avaliar o rendimento do sistema inversor + motor, o que permite que seja realizado de diferentes formas. No entanto, existem algumas considerações a ter em conta relativamente ao rendimento. O motor de indução, quando alimentado com um inversor de frequência PWM, tem uma diminuição no seu rendimento, em relação a um motor alimentado por tensão puramente sinusoidal, devido ao aumento nas perdas ocasionado pelos harmônicos. Para determinar o rendimento devemos considerar as características do inversor e do motor, tais como: frequência de trabalho, frequência de comutação, condição de carga, potência do motor e taxa de distorção harmónica do inversor.

A instrumentação utilizada nas medições é de extrema importância. Devemos utilizar instrumentos que meçam o valor eficaz verdadeiro (true RMS) das grandezas eléctricas, de modo a que seja possível a leitura dos valores correctos da potência absorvida na entrada e na saída do inversor. O aumento da frequência de comutação dos tiristores diminui o rendimento do inversor, aumentando o rendimento do motor. Os motores de alto rendimento, alimentados por inversores de frequência mantêm um rendimento superior, quando comparados com os motores standard alimentados com os mesmos inversores.

O efeito da variação de velocidade no rendimento do motor, pode ser entendido a partir da análise do gráfico da potência útil do motor alimentado com um inversor, em função da sua frequência de trabalho como podemos ver na figura 4.14.

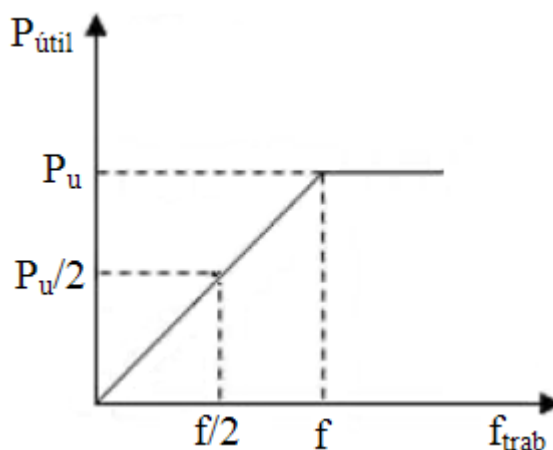


Figura 4.14 - Potência útil no motor em função da frequência de trabalho

O rendimento do motor é definido como a razão entre a potência útil no veio e a potência absorvida, sendo por sua vez, a potência absorvida igual a soma da potência útil com o somatório de todas as perdas como podemos ver na equação 4.6:

$$\eta = \frac{P_u}{P_{abs}} = \frac{P_u}{(P_u + \sum Perdas)} \quad [4.6]$$

onde η é o rendimento, P_u a potência útil no veio e P_{abs} a potência absorvida da rede.

Considerando que, as perdas do motor são compostas fundamentalmente por perdas por efeito de Joule e perdas no ferro e assumindo que, as primeiras compreendem a maior componente das perdas. O rendimento do motor diminui para frequências reduzidas, uma vez que a potência útil do motor também é reduzida, embora as perdas no ferro (dependam da frequência) diminuam um pouco. As perdas por efeito de Joule (dependem da corrente ao quadrado) mantendo-se praticamente constantes para cargas com binário constante, leva a que a variação das perdas globais não sofra uma alteração significativa [PIRES, 2006].

4.10 MÉTODOS DE CONTROLO DOS INVERSORES DE FREQUÊNCIA PWM

4.10.1 Controlo Escalar

Um dos métodos de controlo escalar mais antigos e mais conhecidos no meio industrial é denominado de “V/F constante”. Baseado em características correspondentes ao funcionamento do motor de indução em regime permanente, este método assume a existência de tensões e correntes estatóricas sinusoidais. Com o objectivo de gerar o maior binário

electromecânico, relativo a cada ampere da corrente estatórica, o nível de fluxo da máquina deve ser mantido constante e o mais próximo possível do seu valor nominal, qualquer que seja a situação de funcionamento do motor de indução [MENDES, 2005].

O estator do motor de indução possui um bobinado trifásico, sendo estes dois parâmetros que definem as suas características. Um deles é a resistência ôhmica R e o outro é a indutância L . A resistência depende do tipo de material e do comprimento do fio com o qual é feito o bobinado. Já a indutância depende fundamentalmente da geometria (forma) com que os campos interagem no bobinado e no rotor. De uma análise simplificada podemos dizer que a corrente que circula pelo estator do motor é proporcional ao valor da resistência R e ao valor da reactância indutiva X_L que é dependente da indutância L e da frequência f , como podemos constatar nas fórmulas 4.7 e 4.8:

$$X_L = 2\pi fL \quad [4.7]$$

$$I = \frac{V}{\sqrt{R^2 + X_L^2}} \quad [4.8]$$

onde X_L é a reactância indutiva, f a frequência, L a indutância e I , V , R a corrente, a tensão e a resistência do estator respectivamente.

Para valores de frequência acima dos 25 Hz o valor da resistência é muito pequeno quando comparado com o valor da reactância indutiva, desta forma podemos, numa aproximação, e para um método de controlo simples como o escalar, desprezá-lo. Assim temos que, o valor da corrente será proporcional à tensão de alimentação (V), à indutância (L) e à frequência (f). O valor de indutância (L) é uma constante do motor, mas a tensão e a frequência são dois parâmetros que podem ser controlados pelo inversor de frequência.

Assim, se para variar a velocidade do motor de indução temos que variar a frequência da tensão de alimentação, a estratégia de “V/F constante”, varia a tensão proporcionalmente com a variação da frequência de alimentação do motor para obter no estator uma corrente constante da ordem da corrente nominal do motor, como podemos observar na figura 4.15.

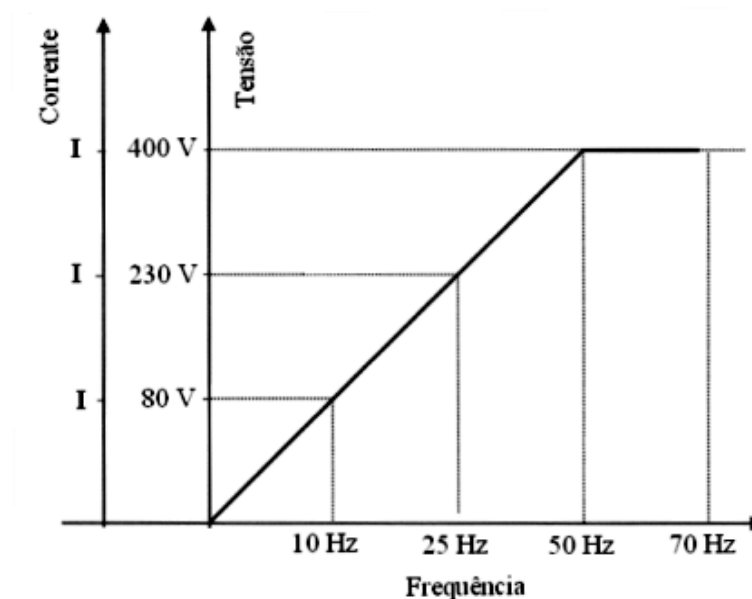


Figura 4.15 - Variação da tensão Versus Frequência com corrente constante

Para frequências inferiores a 25 Hz o termo correspondente a resistência R do estator, que foi desprezado anteriormente, começa a ter influência no cálculo da corrente. Para baixas frequências, mantendo a proporcionalidade entre a frequência e a tensão, a corrente e consequentemente o binário do motor diminuem significativamente. Para evitar esta situação, a tensão do estator em frequências reduzidas tem de aumentar, através de um método denominado compensação $I \times R$, como podemos observar na figura 4.16.

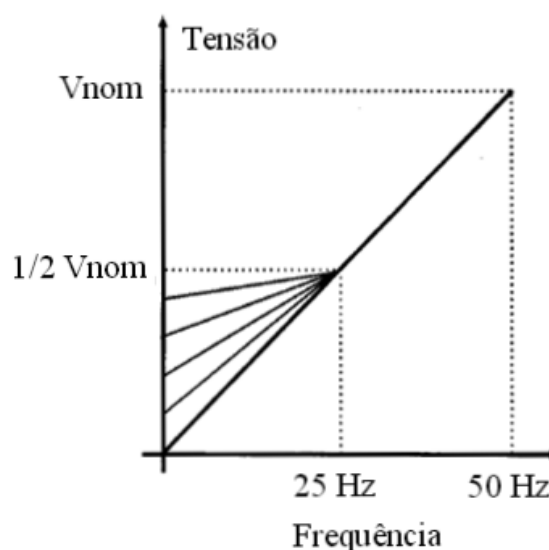


Figura 4.16 - Compensação da corrente com o aumento da resistência

O controlo escalar é utilizado em aplicações normais que não requerem elevadas taxas de aceleração e desaceleração, nem elevada precisão no controlo do binário. Um inversor com

controlo escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com uma precisão até 0,5% da rotação nominal para sistemas sem variação de carga. Pelo princípio de funcionamento e aplicação, são utilizados na maioria das vezes em motores convencionais sem sistemas de realimentação em malha fechada. A faixa de variação de velocidade é pequena, da ordem de 1:10 (ex: 5 a 50 Hz). Com estas características, o inversor de frequência escalar é mais utilizado em sistemas que não requerem um elevado desempenho [AGOSTINHO e MARTINS 2008].

4.10.2 Controlo Vectorial

Em alternativa às técnicas de controlo escalar, existem as técnicas de controlo vectorial, vulgarmente conhecidas por controlo de orientação de campo. Introduzidas nos anos 70 por Blaschke, Hasse e Leonhard, as técnicas de controlo vectorial tornaram possível a introdução dos motores de indução em áreas onde tradicionalmente eram utilizadas as máquinas de corrente contínua, tornando-se assim muito populares em aplicações de elevado desempenho [HARNEFORS, 2001].

Este aumento de popularidade na utilização do motor de indução trifásico está relacionado com o facto de, os esquemas de controlo vectorial permitirem que esta máquina seja controlada de uma forma semelhante à forma como é controlada a máquina de corrente contínua de excitação em separado, tendo como principais vantagens:

- Elevada precisão na regulação da velocidade;
- Elevada performance dinâmica;
- Controlo linear do binário;
- Ajuste suave para velocidades reduzidas sem oscilações de binário, mesmo com variação de carga.

O princípio de funcionamento do controlo vectorial consiste na transformação de variáveis trifásicas para um referencial dinâmico, isto é, decompõem a corrente do motor em dois vectores, um que produz o fluxo magnetizante e o outro que produz binário, ajustando separadamente o binário e o fluxo. O controlo vectorial pode ser realizado em malha aberta (sensorless) como é o caso do Altivar 11 ou em malha fechada, isto é, com realimentação.

- ✓ **Com sensor de velocidade:** requer a instalação de um sensor de velocidade no motor. Este tipo de controlo permite a maior precisão do controlo da velocidade e do binário, mesmo com velocidades próximas de zero.

✓ *Sensorless*: mais simples que o controlo com sensor de velocidade, porém apresenta algumas limitações principalmente no controlo do binário a velocidades reduzidas. Para velocidades próximas da velocidade nominal é praticamente tão bom como o controlo vectorial com realimentação.

No entanto, apesar de teoricamente interessante, a comunidade científica dos anos 70, dedicada à electrónica de potência, não prestou muita atenção a esta técnica de controlo, em parte devido à maior complexidade face ao controlo escalar (mais difícil de implementar na prática) e também porque os engenheiros não estavam muito familiarizados com o modelo dinâmico do motor de indução trifásico.

A maior complexidade deve-se ao facto do binário electromagnético do motor de indução depender, quer do valor do fluxo magnético no entreferro, quer do valor da velocidade de rotação, e também das relações binário-fluxo e binário-velocidade não serem lineares. Aliado ainda à dificuldade em determinar a posição do fluxo rotórico e à determinação dinâmica da transformada de Park, esta técnica foi posta de parte durante alguns anos. A partir de 1980 com o aparecimento de microprocessadores com maior capacidade de processamento, tornou-se possível implementar digitalmente um controlador capaz de usar esta técnica de controlo.

Para que o binário electromagnético de uma máquina AC trifásica possa ser controlado de uma forma semelhante ao que se passa com uma máquina de corrente contínua e sempre com um binário electromagnético máximo, os fasores do fluxo estatórico e da corrente rotórica têm que estar em quadratura, já que o binário electromagnético resulta do produto vectorial entre estas duas grandezas.

No caso da máquina DC, pelo facto de possuir a corrente da armadura e o fluxo de excitação fixos no espaço, o binário electromagnético pode ser manipulado através do controlo do fluxo de excitação ou da corrente da armadura, separadamente. Quer isto dizer, que é sempre produzido o binário máximo para um dado par de valores da corrente de excitação e da corrente na armadura.

Numa máquina AC esta situação não se verifica, já que as grandezas envolvidas no cálculo do binário estão dependentes uma da outra e pertencem a referenciais diferentes, um estacionário com o estator, no caso do fluxo estatórico, e o outro estacionário com o rotor, no caso das correntes rotóricas. Para além disso, há ainda que ter em conta o facto do fluxo estatórico e da corrente rotórica, dependerem dos valores da frequência e do ângulo de fase das correntes do estator.

Assim, e ao contrário do que se passa com o controlo escalar em que apenas se controla a amplitude do fluxo, no controlo vectorial são controlados, em simultâneo, os valores da amplitude e da posição do fluxo, tornando a sua implementação mais exigente do ponto de vista computacional [MENDES, 2005].

4.11 INTERACÇÃO ENTRE O MOTOR/INVERSOR E O TIPO DE CARGA

O correcto dimensionamento de um sistema de velocidade variável depende do conhecimento do comportamento da carga, ou seja, da necessidade de binário no veio do motor. As cargas podem ser classificadas em três tipos: binário variável, binário constante e potência constante.

4.11.1 Cargas com Binário Variável

A variação da velocidade utilizando um inversor de frequência permite uma grande economia de energia com esse tipo de carga, uma vez que a potência mecânica disponibilizada na saída do motor não é constante, mas variará convenientemente de acordo com a exigência da carga. Alguns exemplos típicos deste tipo de carga são bombas centrífugas, exaustores centrífugos, ventiladores, compressores centrífugos, entre outros.

Nas figuras 4.17 e 4.18 podemos verificar que o binário pode variar de forma linear ou quadrática [PIRES, 2006].

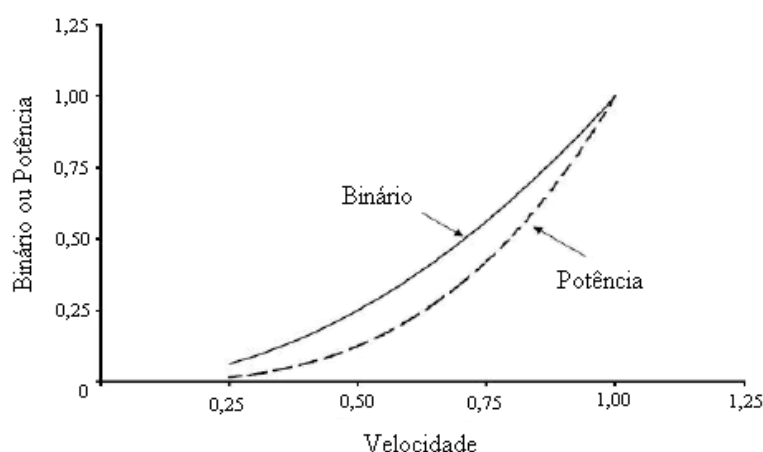


Figura 4.17 - Variação quadrática do binário

As cargas com um binário quadrático têm uma variação da potência de forma cúbica,

enquanto que, as cargas com binário linear a potência do motor varia de forma quadrática como podemos ver na figura 4.18.

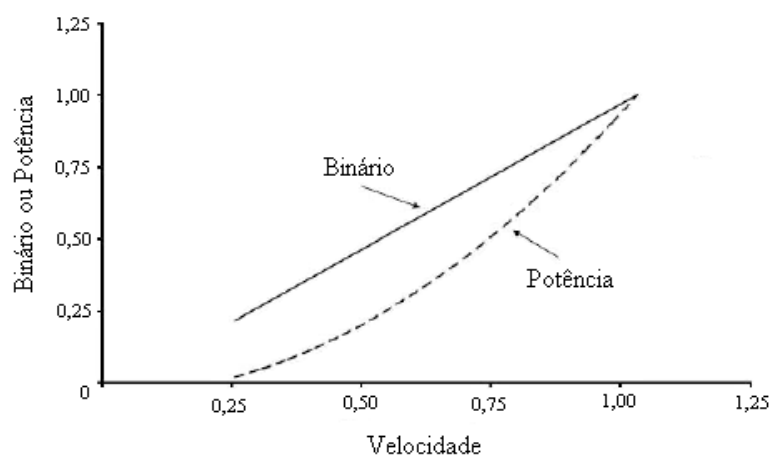


Figura 4.18 - Variação linear do binário

4.11.2 Cargas com Binário Constante

Alguns exemplos típicos deste tipo de carga são compressores alternados, compressores helicoidais, elevadores, tapetes rolantes, bombas de deslocamento positivo, trituradores, entre outros.

Neste tipo de cargas o binário é constante para todas as gamas de velocidade do motor, e a potência varia de forma linear com a velocidade como podemos ver na figura 4.19.

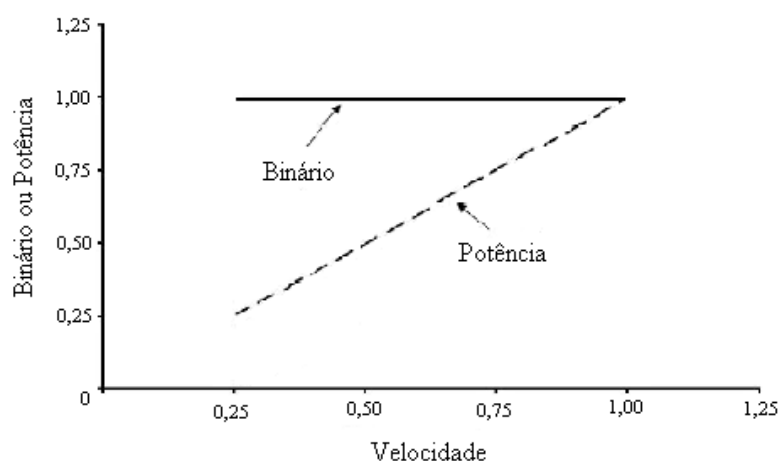


Figura 4.19 - Cargas de binário constante

4.11.3 Cargas com Potência Constante

Alguns exemplos típicos deste tipo de carga são ferramentas de corte e perfuração, bobinadores. Neste tipo de cargas o binário diminui proporcionalmente com a frequência e com o aumento da velocidade. A potência mantém-se constante para toda a gama de velocidades.

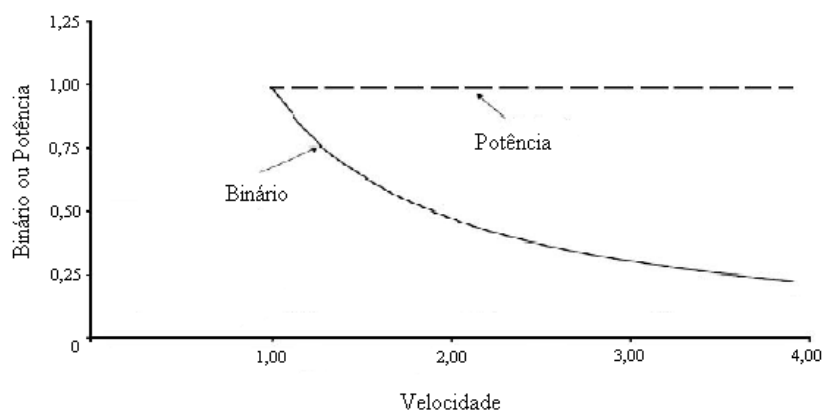


Figura 4.20 - Cargas de potência constante

AUTÓMATOS PROGRAMÁVEIS

5.1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, tem-se assistido a uma mudança drástica dos processos de produção. Isto deve-se, por um lado à crescente competição entre as empresas e por outro lado, ao enorme desenvolvimento das tecnologias que envolvem autómatos programáveis, robôs, máquinas de controlo numérico, redes de comunicação, inteligência artificial.

Em abstracto, todas as estratégias de produção visam um conjunto de objectivos, que na realidade corresponde a um só: o aumento da competitividade.

A Automatização pode ser definida como um conjunto de tecnologias relacionadas com a aplicação de equipamentos mecânicos e electrónicos, em sistemas industriais de produção, conseguindo assim um aumento de competitividade (em termos de custos, qualidade, disponibilidade e inovação) [MORAES e CASTRUCCI, 2007].

Um sistema automatizado pode contribuir para o aumento da competitividade das empresas através da:

- *Redução de custos de pessoal*: a redução de custos de pessoal obtém-se, por exemplo, com a automatização das máquinas (tem o seu custo...) ou com a automatização do controlo e planeamento da produção;
- *Redução de custos de stock* (intermédios e terminais): devido ao controlo e planeamento da produção, que visa, entre outros aspectos, atingir stocks intermédios mantidos ao mínimo (stock zero), disponibilidade de produtos (atraso zero), optimização de compras graças ao controlo de produção em tempo real;
- *Aumento da qualidade média dos produtos*: utilização de máquinas mais precisas do que o homem, o que garantem melhores características de repetibilidade (qualidade constante, não dependente de turnos particulares);
- *Maior disponibilidade dos produtos*: redução do número de avarias;

- *Aumento do progresso*: redução do tempo necessário para o projecto, planeamento e fabrico de novos produtos, associado à utilização de máquinas programáveis aptas a desempenhar diferentes operações;
- *Aumento da flexibilidade da produção*: resposta rápida às solicitações do mercado e capacidade de operar diferentes variantes de produtos.

Um dos dispositivos mais importantes num sistema automatizado é o autómato programável (PLC - *Programmable Logic Controller*), que pode ser definido como um dispositivo electrónico e programável, dedicado ao controlo e comando, dos processos produtivos, em ambiente industrial e em tempo real.

5.2 HISTÓRIA E APLICAÇÕES INDUSTRIAIS

Antes do aparecimento dos *Programmable Logic Controller* (PLC's), os sistemas de comando e controlo de máquinas e processos industriais eram feitos por relés electromagnéticos, especialmente projectados para este fim. O controlo baseado em relés exigia modificações nos cabos, no caso de alterações no processo automatizado, e em muitos casos isso tornava-se inviável, sendo mais barato substituir todo o painel por um novo. O PLC revolucionou o comando e controlo industrial desde o seu aparecimento na década de 70.

O primeiro PLC surgiu na indústria automóvel americana em substituição dos relés electromagnéticos utilizados para controlar operações sequenciais e repetitivas numa linha de montagem, especificamente na *Hydromic Division* da *General Motors*, em 1968, devido há grande dificuldade existente para alterar a lógica de controlo dos painéis de comando em cada alteração na linha de montagem. Estas mudanças implicavam altos gastos de tempo e dinheiro.

Por outro lado os PLC's diminuíram o tempo associado à produção e facilitaram, no futuro, possíveis modificações nos sistemas de controlo. Os primeiros autómatos industriais instalados começaram logo a provar ser uma valiosa melhoria em relação aos painéis lógicos de relés. E isto, porque eram de fácil instalação e programação (ou reprogramação), porque ocupavam menos espaço e porque eram mais seguros do que os sistemas baseados em relés.

Houve dois factores essenciais no desenho do autómato industrial que o levaram a ter o sucesso que indiscutivelmente hoje em dia lhe é reconhecido. Primeiro, usaram-se componentes muito seguros, e os circuitos electrónicos e módulos foram desenvolvidos tendo

em conta o ambiente industrial, ou seja foram construídos para resistir ao ruído eléctrico, humidade, óleos, e elevadas temperaturas.

O segundo factor tem a ver com a linguagem de programação utilizada, e que era a linguagem de diagramas de escada (do inglês *ladder*), também conhecida por linguagem de contactos, a qual se baseia na lógica de relés. Os sistemas de computadores anteriormente utilizados falharam, porque os técnicos e engenheiros industriais não estavam devidamente treinados nas linguagens de programação usuais de computadores, como por exemplo Assembly. Contudo, muitos estavam treinados no desenvolvimento de sistemas de controlo baseados em relés, e a programação numa linguagem baseada em circuitos de relés foi rapidamente apreendida.

Na década de 70, os microprocessadores foram introduzidos nos autómatos, e a capacidade e o desempenho aumentou e melhorou, ficando assim aptos a realizar tarefas cada vez mais sofisticadas.

Nos finais dos anos 70, as melhorias nos componentes das comunicações e nos circuitos electrónicos permitiram colocar os autómatos a centenas de metros do equipamento que controlavam, tornando possível a troca de dados entre autómatos de modo a rentabilizar e tornar mais eficiente o controlo de máquinas e processos. A produção de módulos de entradas e saídas com conversores analógico/digitais permitiram aos autómatos entrar na área do controlo analógico [FRANCHI e CAMARGO, 1994].

Podemos então salientar que a evolução do PLC pode ser dividida em cinco gerações:

- Na **primeira geração** a programação estava intrinsecamente ligada ao hardware do equipamento e a linguagem era Assembly, mas para programar era necessário conhecer a electrónica do projecto que tinha de ser feita por uma equipa altamente qualificada. A gravação do programa era na memória EPROM (*Erasable Programmable Read-Only Memory*);
- Na **segunda geração** começam a aparecer as primeiras linguagens de programação mais flexíveis com o hardware do equipamento, sendo possível a introdução de um “Programa Monitor” no PLC, o qual converte as instruções do programa, verifica o estado das entradas, compara com instruções do utilizador e altera o estado das saídas;
- Numa **terceira geração** os PLC admitiam a possibilidade de ligação de um programador portátil ou um teclado de forma a fazer alterações no software;
- Na **quarta geração** os PLC’s passam a ter uma entrada para comunicação série com a introdução dos microprocessadores, o que tornou possível a utilização de diversas linguagens, simulações, testes, treinos e armazenamento de programas;

- Na **quinta geração** houve uma preocupação de padronizar protocolos de comunicação. O que permitiu que equipamentos de fabricantes diferentes pudessem comunicar, de forma a facilitar a automação, gestão e desenvolvimento de plataformas industriais cada vez mais complexas.

Hoje em dia, podemos encontrar autómatos nos mais variados sectores industriais. Por exemplo, na indústria metalúrgica, onde a fiabilidade e segurança são factores essenciais, os autómatos são utilizados desde os problemas de análise de gás ao controlo de qualidade. Na indústria mecânica e automóvel, um dos sectores industriais que mais utiliza os autómatos, são usados, por exemplo, para controlo de linhas de produção e montagem, controlo de máquinas e robôs. No transporte e empacotamento de materiais os autómatos podem ser utilizados no controlo de guias e elevadores mecânicos. A utilização de autómatos inclui também as indústrias químicas e petroquímicas, agricultura e indústrias de alimentos, indústria têxtil, indústria do vidro e plástico, entre muitas outras [MICHEL e DUNCAN, 1990].

5.3 CARACTERÍSTICAS DOS PLC'S

As características de um PLC devem ser analisadas juntamente com as características do software que irá ser programado, ou seja, o software desenvolvido bem como a linguagem de programação utilizada dependem do tipo de aplicação, bem como da forma como será aplicada a cada processo industrial.

Existem diversos modelos de PLC's fabricados e disponíveis no mercado. No entanto, temos de analisar alguns pontos para que seja possível determinar qual o modelo mais adequado a cada aplicação, principalmente durante a fase de projecto [GEORGINI, 2004].

Sob o ponto de vista funcional, podemos considerar e observar as seguintes funções que um PLC deve executar:

- Aquisição e Comando;
- Armazenamento do software desenvolvido para a aplicação;
- Processamento.

Assim, um Controlador Lógico Programável apresenta as seguintes características:

- Permite um fácil diagnóstico do funcionamento ainda na fase de projecto do sistema e/ou reparação de falhas que venham a ocorrer durante o seu funcionamento devido a uma fácil e rápida programação ou reprogramação, com a mínima interrupção na produção;
- Permite a expansão a diversos tipos de módulos, de acordo com a necessidade;

- Pode ser instalado em quadros reduzidos devido ao pequeno espaço físico exigido;
- Trabalha com reduzidos graus de protecção, pelo fato de não serem geradas faíscas;
- Custo e instalação competitivo em relação aos sistemas de controlo convencionais;
- Possibilita a criação de relatórios para serem utilizados a qualquer momento;
- Apresenta um reduzido consumo de energia;
- Tem a capacidade de comunicar com diversos outros equipamentos;
- Garante maior fiabilidade aos processos produtivos.

5.4 ARQUITECTURA DOS PLC'S

Independentemente do tamanho, e da complexidade, praticamente todos os autómatos programáveis partilham dos mesmos componentes básicos e das mesmas características funcionais como podemos observar na figura 5.1.

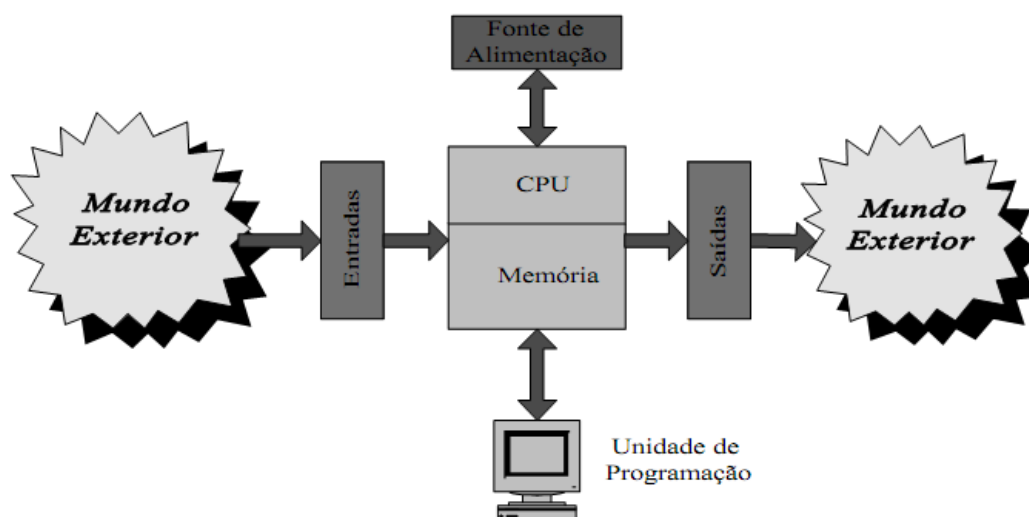


Figura 5.1 - Arquitectura de um autómato programável

Um autómato é composto por uma Unidade Central de Processamento (CPU), que executa ciclicamente o programa armazenado na memória de programa. No início de cada ciclo de execução as entradas, que podem resultar de um qualquer processo, são analisadas. No final de cada ciclo as saídas são actualizadas, de acordo com as entradas e o programa de controlo, de modo a controlar o equipamento ou máquinas envolvidas no processo. Na execução do programa, o CPU utiliza a memória do autómato para armazenamento e transferência de dados. A utilização da memória para armazenamento do programa, separada da outra memória, tem a ver com a necessidade de armazenar os programas no PLC, mesmo com a alimentação desligada.

A unidade de programação é geralmente utilizada para o desenvolvimento de programas e para a transferência dos programas para o autómato. Uma vez inserido o programa no autómato, este é auto-suficiente não necessitando da unidade de programação quando colocado em execução [MARTINS, 2009].

5.4.1 CPU

A Unidade Central de Processamento é responsável pela execução do programa, controlando todas as operações dentro do autómato, através de instruções armazenadas na memória de programa. Um barramento de dados transporta a informação da memória e do sistema de entradas saídas para o CPU e vice-versa. Na maioria dos autómatos (principalmente os mais modernos) o CPU é baseado em um ou mais microprocessadores e outros circuitos que permitem realizar as funções de controlo e cálculo necessárias à execução de programas.

5.4.2 Sistema de Entradas e Saídas

O sistema de entradas/saídas fornece a ligação física entre o CPU e o processo a controlar. O autómato, através de sensores apropriados, pode medir quantidades físicas como velocidade, temperatura, pressão, corrente, entre outras. Baseando-se nos valores medidos, e no programa de controlo, o CPU controla as saídas que poderão actuar em dispositivos, como por exemplo, válvulas, motores, alarmes.

O sistema de entradas/saídas é um dos componentes mais importantes num autómato, pois estas necessitam de interagir directamente com equipamento industrial e podem residir em zonas de elevado ruído eléctrico. De facto, uma das grandes inovações dos autómatos é a possibilidade de ligação directa aos sensores e actuadores sem haver necessidade de circuitos de condicionamento de sinal.

Para isso as entradas e saídas dos autómatos possuem isolamento galvânico (normalmente óptico), o que lhes dá uma melhor fiabilidade e segurança na comunicação com sensores e actuadores. De facto, o isolamento das entradas/saídas é absolutamente necessário por questões de ruído e de modo a compatibilizar os diferentes níveis de tensão e potência existentes entre o autómato e os processos a controlar.

Entradas Analógicas

A maioria dos processos e máquinas industriais exigem o controlo de algumas grandezas analógicas, como temperatura, caudal, corrente do motor, entre outras. Os PLC's industriais possuem algumas entradas analógicas que, através de um conversor analógico-digital, permite que as grandezas sejam monitorizadas e controladas.

O factor mais importante para a qualidade do processamento do sinal de uma entrada analógica é a resolução do conversor A/D, para isso ele deve apresentar uma resolução de pelo menos 12 bits. A figura 5.2 representa o esquema eléctrico de uma entrada analógica [SOUSA, 2004].

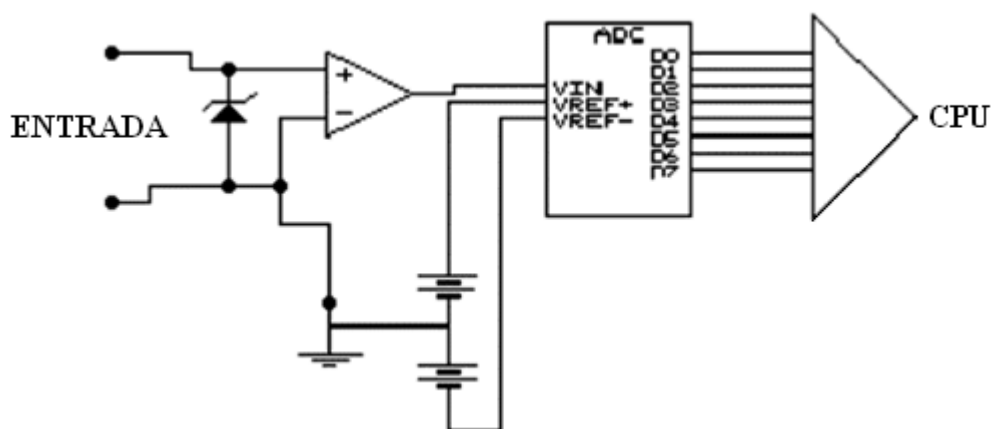


Figura 5.2 - Esquema eléctrico de uma entrada analógica

Do esquema eléctrico da figura 5.2 vemos que depois do Amplificador Operacional, o nível de tensão DC é transformado numa palavra digital com o ADC, que pode ser processada pela CPU. Os exemplos mais clássicos de sensores analógicos utilizados no PLC são: termopares, sensores de deformação mecânica (*strain-gauges*), sensores piezoeléctricos (pressão mecânica) e tacogeradores.

As faixas clássicas de sinal para entradas analógicas correspondem a valores entre 0 a 10 Vcc, -10 a 10 Vcc, 0 a 20 mA e 4 a 20 mA. Para determinar a resolução do conversor A/D devemos primeiro ver o número de palavras digitais que o conversor admite. Se o conversor for de N=8 bits por exemplo, ele admite 2^N palavras, o que corresponde a 256 palavras. Se a entrada corresponder a uma tensão compreendida entre 0 Vcc a 10 Vcc, então $10/256=39,1$ mV, sendo este valor a resolução do conversor, qualquer variação inferior a 39,1 mV não é processada.

Entradas Digitais

As entradas digitais admitem apenas dois estados, ‘0’ ou ‘1’, normalmente o nível ‘1’ corresponde 24 Vcc e o nível ‘0’ corresponde a 0 Vcc. No esquema eléctrico da figura 5.3 podemos observar que estas entradas têm um isolamento óptico que permite a eliminação de ruídos eléctricos e a protecção do sistema de controlo.

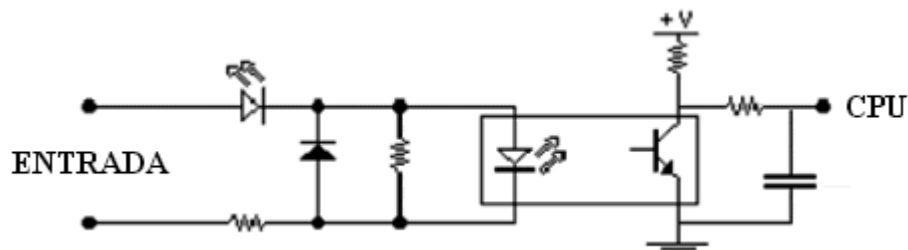


Figura 5.3 - Esquema eléctrico de uma entrada digital

Saídas Analógicas

As saídas analógicas dos PLCs possuem a mesma filosofia das entradas analógicas, os níveis de tensão e corrente são os mesmos. A figura 5.4 ilustra a estrutura básica de uma saída analógica.

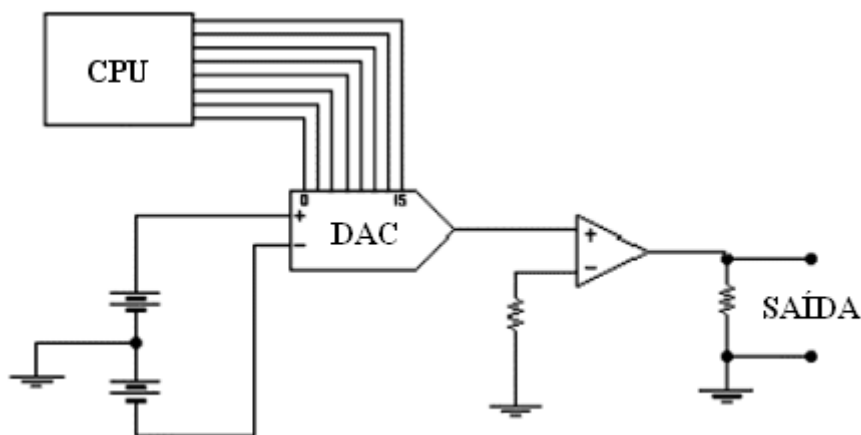


Figura 5.4 - Esquema eléctrico de uma saída analógica

Os sinais de saída analógica são aplicados em diversos elementos do processo, sendo os mais comuns: válvulas, motores CC, inversores de frequência, servomotores, módulos IHM (Interface Homem Máquina), entre outros.

Saídas Digitais

Analogamente com entradas digitais, as saídas digitais apresentam também dois estados lógicos: alto (“1”) ou baixo (“0”). Os dispositivos associados às saídas digitais são geralmente: contactores, relés, válvulas, entre tantos outros.

Os três tipos mais comuns de saídas digitais são: saídas a relé, saídas a transistor e saídas a TRIAC. As figuras 5.5, 5.6 e 5.7 ilustram os três tipos de saídas digitais referidos [SOUSA, 2004].

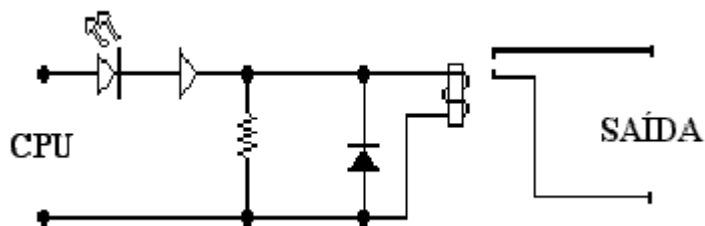


Figura 5.5 - Esquema elétrico de uma saída digital a relé

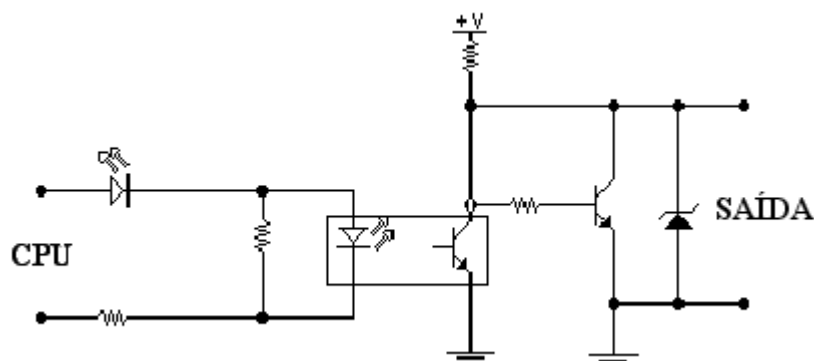


Figura 5.6 - Esquema elétrico de uma saída digital a transistor

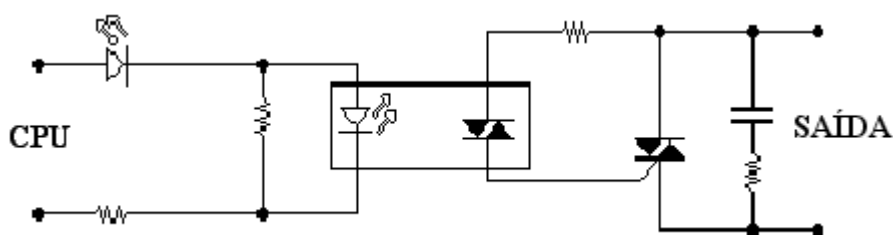


Figura 5.7 - Esquema elétrico de uma saída a triac

5.5 INTERFACE DE COMUNICAÇÃO

No mínimo, todos os PLC's dispõem de pelo menos uma porta de comunicação serial onde o programador transfere o *firmware* para o autómato, normalmente, é no computador que se desenvolve o *firmware* através do *software* fornecido pelo fabricante do PLC. Através desta porta, o programador faz todas as actividades de manutenção: verifica o status da CPU,

dos módulos de E/S (Entrada/Saída), o tempo de ciclo do programa, faz a escrita e leitura do programa, permitindo assim obter uma cópia de segurança do *firmware*.

Essa porta série, normalmente é uma rede mestre-escravo que pode ser utilizada para outras funções, tais como: ligar um sistema de supervisão ou uma HMI (Interface Homem Máquina) local. No entanto, como essa porta é dedicada para manutenção, se ela for utilizada para ligar uma HMI, por exemplo, todas as vezes que o programador precisar ligar o computador para manutenção, deverá retirar o cabo da HMI e depois de concluída a manutenção, voltar a ligá-lo. Para evitar esse tipo de problema é desejável que o PLC tenha mais interfaces de comunicação para permitir, além da ligação com HMI's locais, a comunicação com outros PLC's e outros sistemas, como inversores de frequência, soft-starter, balanças, entre muitos outros.

O tipo de interface e o cabo utilizado definem o padrão físico e o protocolo de comunicação. Alguns exemplos de protocolos de comunicação industriais são o Modbus, Fielbus, Profibus, Ethernet TCP/IP entre outros [BORGES, 2007].

Os padrões mais utilizados são o RS-232, *loop* de corrente e o RS-422/RS-485 em alguns casos. O padrão RS-232 é utilizado para velocidades de transmissão de até 20 Kbits/s e uma distância máxima de 15 metros, que se utilizado com modems, esta distância pode aumentar substancialmente. O padrão RS-422/RS-485 é uma versão melhorada do padrão RS-232. Possibilita velocidades de transmissão de até 100 Kbits/s para distâncias até 1200 m, podendo alcançar velocidades da ordem de Mbits para distâncias inferiores. O padrão *loop* de Corrente é idêntica à RS-232, e como é baseada em níveis de correntes ao invés de tensões, permite a utilização em distâncias superiores ao padrão RS-232.

5.5.1 Memória

A memória é usada para armazenar o programa de controle (memória de programa) e possibilitar o armazenamento e a transferência de dados. Geralmente os autômatos utilizam memória do tipo RAM, EPROM ou EEPROM. Na maioria dos casos a memória do tipo RAM é utilizada nas fases de desenvolvimento e teste dos programas, enquanto que as memórias do tipo EPROM e EEPROM são utilizadas para o armazenamento de programas em código executável e também para armazenamento de configurações do sistema. No entanto, hoje em dia, a tendência é para a utilização de memória RAM, devido ao seu baixo consumo, juntamente com baterias que permitem manter o conteúdo da memória mesmo com o autômato desligado.

A capacidade de memória de cada autómato tem em conta as potencialidades de cada um e é geralmente medida em termos do número máximo de instruções de um programa, ou em termos da capacidade de memória em *bytes*. Autómatos pequenos têm geralmente um tamanho de memória fixo, enquanto autómatos maiores permitem a utilização de módulos para expansão da memória.

5.5.2 Variações na Arquitectura

A necessidade crescente de autómatos para vários tipos de aplicações, umas mais complexas que outras, levou os construtores a desenvolver várias famílias de autómatos baseadas em processadores com vários níveis de desempenho, permitindo ao utilizador a escolha do tipo de autómato a utilizar de acordo com as necessidades do programa a executar.

As configurações oferecidas pelos diversos fabricantes de PLC's podem dividir-se em duas formas básicas:

- *Compacta* – onde a CPU e todos os módulos de entrada e saída (E/S) estão no mesmo *rack*. Este tipo de PLC permite resolver a grande maioria das aplicações de automação mais comuns;
- *Modular* – O construtor fornece, neste caso, um mesmo autómato-base ao qual são adicionáveis módulos consoante os requisitos da aplicação.

Podemos citar módulos de entradas/saídas digitais, entradas/saídas analógicas, módulos específicos para controlo do tipo PID (proporcional, integral, diferencial), módulos *fuzzy logic*, módulos para comunicações, módulos de memória adicional, módulos com contadores rápidos, Leitores de códigos de barras, entre muitos outros.

Os módulos *fuzzy logic* foram desenvolvidos para criar uma lógica que melhorasse a tradicional lógica binária que apenas admite dois valores lógicos: 0 e 1. A lógica *fuzzy* pretende copiar o raciocínio humano e desenvolver processos lógicos a partir de expressões pouco precisas ou difusas que variam entre dois valores lógicos (0 e 1). Por exemplo, utilizando lógica *fuzzy* não se diz que uma pessoa é alta ou baixa, mas sim que essa pessoa tem uma determinada probabilidade de ser alta [MARTINS, 2009].

5.6 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO DOS PLC'S

O funcionamento de um PLC resume-se à execução contínua do programa carregado na sua memória. Na figura 5.8, estão ilustradas as três fases mais importantes do ciclo de funcionamento de um autômato programável.

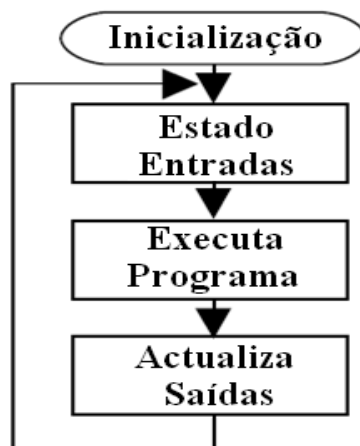


Figura 5.8 - Ciclo de funcionamento de um PLC

Inicialmente, o PLC analisa o estado de todas as entradas e armazena-as na memória, para serem usadas durante a execução do programa. Na fase que se segue, o PLC executa o programa, executando por linhas ou colunas uma instrução de cada vez dependendo do modelo e fabricante do autômato (no caso do Twido as instruções são executada linha a linha). Finalmente, as saídas são actualizadas de acordo com o estado das entradas e das instruções do programa.

Este ciclo repete-se continuamente enquanto o PLC estiver em funcionamento, o tempo que dura cada ciclo designa-se por tempo de *Scan*. Quando se analisa o funcionamento de um PLC, através da performance do seu tempo de resposta, é necessário considerar três tempos distintos [MORAES e CASTRUCCI, 2007]:

- Tempo de resposta de entrada;
- Tempo de processamento;
- Tempo de resposta de saída.

Consideremos uma situação em que o nosso cérebro tem que detectar quando um copo de água está cheio, para de seguida dar ordem para fecharmos a torneira, e façamos a analogia com o funcionamento de um PLC. Os olhos da pessoa estão sempre a receber informação e a envia-la para o cérebro. Quando a água chegar ao nível pretendido, os olhos enviam essa informação para o cérebro que a deverá processar. O tempo que o cérebro demora a receber a informação proveniente dos olhos é designada por tempo de resposta de

entrada. O cérebro tendo a informação de que a água está num determinado nível irá processar a informação e decidir qual a acção ou acções a tomar.

Finalmente, o cérebro irá dar ordens às mãos para fechar a torneira. O tempo que decorre até que as mãos recebam a ordem é designado por tempo de resposta de saída.

O PLC utilizado nesta dissertação tem dois modos de *status*: Run e Stop. Quando em modo Run, o programa é executado continuamente e em modo Stop o PLC fica em *stand-by*. O PLC entra neste último modo quando existe uma condição de erro ou falha no sistema, ou ainda durante o processo de actualização do software.

5.7 LINGUAGENS DE PROGRAMAÇÃO PARA AUTÓMATOS

A programação dos autómatos é feita usando ferramentas de programação, que podem ser consolas fornecidas pelo construtor, ou *software* geralmente executado a partir de um computador pessoal (PC).

Nos primórdios do PLC este foi utilizado para substituir conjuntos de relés e contactores em painéis de tal forma que pudessem ser reconfigurados de uma forma mais simples e facilitar eventuais mudanças. Assim a primeira linguagem de PLC foi a de diagramas de contactos, ou *Ladder Diagram*, que se baseia no funcionamento dos contactos dos relés, daí o nome de “lógica de relé”. A linguagem Ladder foi bem aceita nos EUA, mas na Europa permaneceu a tendência de programação baseada em linhas de comando, como o assembly. Havia portanto, a necessidade padronização e isto foi feito por uma norma internacional. A International Electrotechnical Commission (IEC) padronizou as linguagens de programação em duas grandes categorias: as linguagens gráficas e as linguagens literais [MICHEL e DUNCAN, 1990].

As linguagens gráficas, que foram as primeiras a ser utilizadas nos autómatos, fornecem um conjunto de símbolos gráficos que são ligados entre si de forma a constituírem um programa. Por linguagens literais entende-se um conjunto de linguagens cujas instruções são escritas na forma de expressões literais usando partes em texto e palavras reservadas dessas linguagens.

Nas linguagens gráficas podemos destacar a linguagem de diagramas de contactos (*Ladder Diagram* - LD), linguagem de diagramas de funções sequenciais (*Sequential Function Chart* - SFC) – evolução do *graphcet* francês e a linguagem de diagramas de blocos de funções (*Function Block Diagram* - FBD). Das linguagens literais destacam-se as linguagens de lista de instruções (*Instruction List* - IL), a linguagem de texto estruturado

(*Structured Text - ST*) - linguagem que vem substituir todas as linguagens declarativas e é baseada em Pascal. Na figura 5.9 está apresentado o mesmo exemplo nas diversas linguagens excepto a linguagem SFC que será apresentado posteriormente.

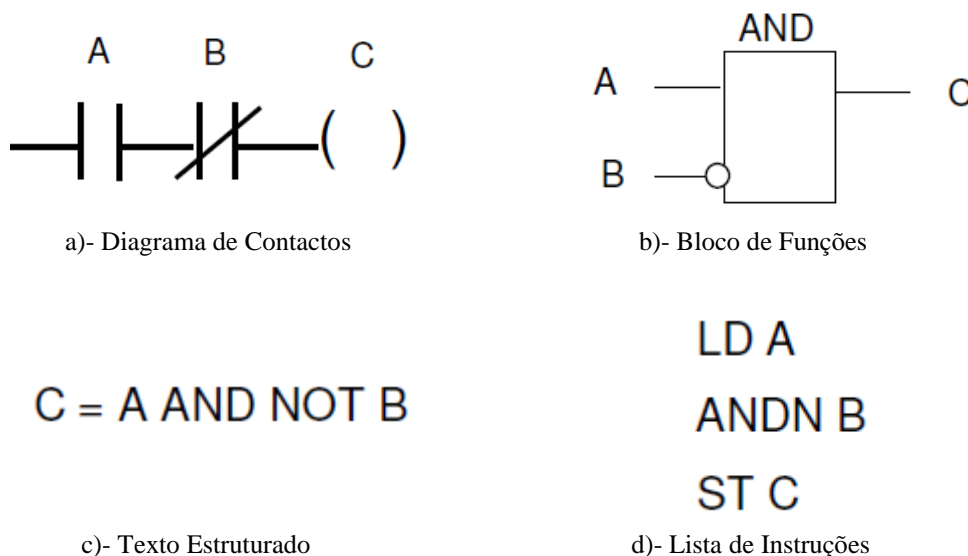


Figura 5.9 - Exemplos básicos de programas escritos utilizando as linguagens da norma IEC

A linguagem de diagramas de funções sequenciais descreve graficamente o comportamento sequencial de um programa de controlo. É proveniente de redes de Petri e do Grafcet. A SFC estrutura a organização interna de um programa, ajudando a decompor um problema de controlo complexo em blocos mais simples, por outro lado, mantém uma visão global da solução do problema. Consiste num conjunto de *steps*, ligados a blocos de acção e transição. Cada *step* representa um estado particular do sistema a controlar. A transição está associada com a condição, que quando verdadeira, desactiva o *step* anterior a ela e activa o *step* seguinte. Cada elemento pode ser programado em qualquer linguagem IEC, inclusive o próprio SFC. É ainda possível a implementação, de sequências paralelas, necessárias em algumas aplicações [VIANNA, 2008].

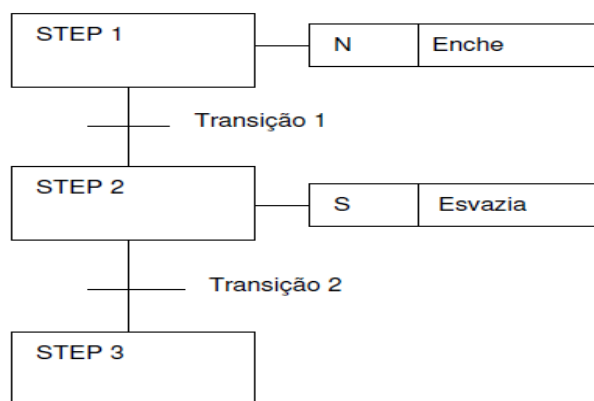


Figura 5.10 - Exemplo de um programa básico em SFC

A linguagem mais utilizada é o diagrama de contactos, devido à semelhança com os esquemas eléctricos usados no comando convencional. O software apresenta-se de forma linear, onde o programa é varrido desde a primeira até a última instrução.

Na programação estruturada, o programa principal é lido, e conforme a sequência de eventos, os blocos e funções são executados.

Alguns PLC's possibilitam a apresentação do programa em diversas linguagens podendo migrar de umas para as outras, no caso do PLC utilizado nesta dissertação temos apenas a possibilidade de desenvolver o software em diagrama de contactos e migrar para lista de instruções ou vice-versa.

5.8 LINGUAGEM DE DIAGRAMA DE CONTACTOS

Esta linguagem vai ser analisada com maior detalhe pois é a linguagem utilizada nesta dissertação, devido aos objectivos propostos e também por se tratar de uma linguagem de fácil apreensão.

A linguagem *ladder* consiste numa lista de instruções simbólicas que, quando interligadas entre si, de uma determinada forma, constituem um programa para autómatos. Esta linguagem é composta, por seis categorias de instruções que incluem: instruções do tipo relé, temporização/contagem, manipulação de dados, aritméticas, transferência de dados e controlo de programa.

Um programa escrito em linguagem *ladder* consiste em N malhas, em que cada malha pode representar graficamente uma equação booleana. A principal função destas malhas é a de permitirem controlar saídas a partir de condições de entrada. Tanto as entradas como as saídas podem ser físicas, endereços ou registos internos do autómato [FRANCISCO, 2007].

A figura 5.11 mostra a estrutura básica de uma malha. Neste caso, a saída só estará activa quando existir continuidade lógica, isto é, quando houver pelo menos um caminho fechado desde o início de continuidade lógica até à saída.

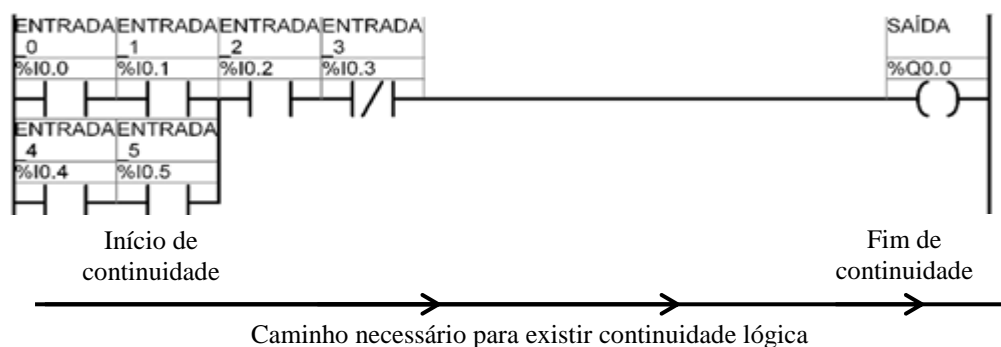


Figura 5.11 - Malha num diagrama de contactos

As saídas ou bobinas e os contactos, são os símbolos básicos da lista de instruções da linguagem *ladder*. Os contactos, programados ao longo de uma determinada malha, representam condições que depois de avaliadas determinam o controlo da saída.

A programação dos contactos e das saídas, consiste na atribuição de endereços que identificam o que está a ser avaliado e o que está a ser controlado. Cada endereço refere-se a um endereço interno da memória, ou identifica a saída ou a entrada. Um contacto, independentemente de representar uma entrada ou uma saída, ou um endereço interno, pode ser utilizado em qualquer parte do programa, sempre que aquela condição necessite de ser avaliada.

A organização dos contactos em malhas depende do controlo lógico desejado. Os contactos podem ser colocados em série, paralelo ou série/paralelo, dependendo do controlo necessário para uma dada saída.

5.9 INSTRUÇÕES DO TIPO RELÉ

Estas instruções permitem executar o estado (*ON/OFF*) de um endereço interno ou entrada, e controlar o estado de um endereço interno ou de uma saída. Os seis tipos de relés mais simples estão descritos a seguir [CAMPELLO, 2005]:

- *Contacto normalmente aberto* $\uparrow \quad \uparrow$: O endereço referido pode ser uma entrada ou um bit interno. Se o estado for *ON* quando o contacto está a ser executado então este fecha-se e assegura a continuidade lógica. Se o estado for *OFF* então sucede o contrário e o contacto abre-se quebrando a continuidade lógica;
- *Contacto normalmente fechado* \downarrow / \downarrow : O princípio de funcionamento é idêntico ao anterior, mas ao contrário. Quando o estado for *OFF* existe continuidade lógica e quando o estado for *ON* não existe continuidade lógica;
- *Saída normalmente aberta* $()$: Usada para controlar uma saída ou um endereço interno. Coloca no estado *ON*, a saída ou o endereço interno, quando existe continuidade lógica, e vice-versa;
- *Saída normalmente fechada* $(/)$: O seu comportamento é o inverso da saída normalmente aberta;
- *Saída SET* (S) : Esta saída é colocada a *ON* quando existir pelo menos um caminho com continuidade lógica. No entanto, esta continuará *ON* mesmo que deixe de existir

continuidade lógica. A saída só será colocada inactiva quando for executada uma instrução de RESET para o mesmo endereço;

- Saída RESET $\overline{(R)}$: É programada para colocar OFF uma determinada saída a SET. A única forma de voltar a colocar ON é fazer o SET da mesma.

Exemplos:

A malha que corresponde à descrição em linguagem de contactos da equação booleana $A + \overline{B} = C$, é a seguinte:

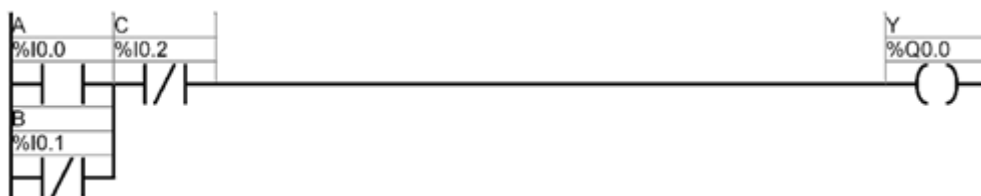


Para a equação booleana $\overline{A + B} = C$, a malha que a descreve é:

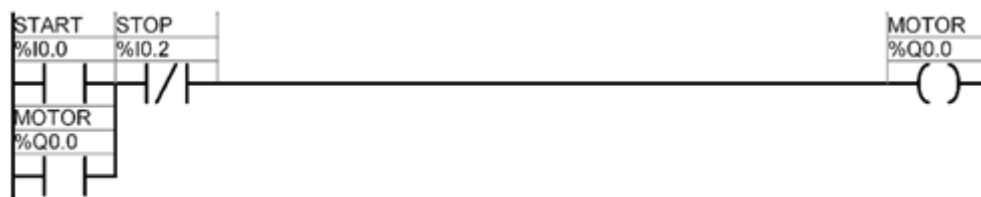


Como se pode verificar com estes dois exemplos, a realização de um *OR* lógico corresponde à ligação em paralelo de dois símbolos, enquanto que, para a realização de uma negação lógica basta a utilização de contactos ou saídas normalmente fechadas.

A seguir, apresenta-se um exemplo de um *AND* lógico que se realiza através da ligação em série de contactos. Para a equação lógica $(A + \overline{B}) \cdot \overline{C} = Y$, a malha correspondente é:

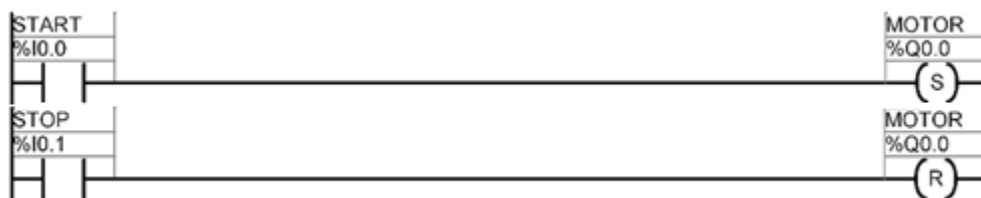


Vejamos agora um exemplo bastante simples, mas concreto: o arranque e a paragem de um motor com as tradicionais betoneiras *Start* e *Stop*. Como é bem conhecido, para comandar um motor a partir de betoneiras é necessário fazer a chamada auto-alimentação (realimentação da saída). É essa a função do relé Motor, que garante que o motor continue a trabalhar quando deixamos de premir a betoneira *Start*. A malha que permite realizar este controlo está representada a seguir:



Quando o botão de *Start* é premido, e o botão de *Stop* não está activo, existe continuidade lógica, o motor arranca e o relé Motor fica activo. Mesmo que o botão de *Start* seja agora levantado, a continuidade lógica é assegurada pelo contacto Motor.

Para parar o motor basta premir o botão de *Stop*, quebrando a continuidade lógica, e neste caso também o relé Motor deixa de estar activo. Mesmo que o botão de *Stop* seja agora levantado, continua a não haver continuidade lógica pois quer o *Start*, quer o Motor estão abertos. Este exemplo também pode ser realizado com as saídas de SET e RESET como podemos verificar nas duas malhas seguintes:



5.10 INSTRUÇÕES DE TEMPORIZAÇÃO E CONTAGEM

São instruções de saída com funções idênticas às fornecidas pelos temporizadores e contadores construídos mecânica ou electronicamente. São geralmente utilizadas para activar ou desactivar um dispositivo ao fim de determinado tempo ou contagem.

O seu princípio de funcionamento é idêntico pois ambos podem ser considerados contadores. Um temporizador conta um número de intervalos de tempo fixos, necessário para atingir a duração pretendida, enquanto que um contador regista o número de ocorrências de um determinado evento.

As instruções de temporização e contagem necessitam de dois registos: um registo para armazenar o número de contagens já efectuadas e outro registo para armazenar o valor final.

5.10.1 Descrição dos Contadores

O uso de contadores (%Ci) no TWIDO permitem efectuar a contagem de variáveis internas e externas; contam as transições de 0 a 1 nas suas entradas, sendo o valor máximo de contagem de 9999. Os contadores possuem associados dois registos [TWIDO, 2009]:

- *Valor pré-definido*: (PV=Preset Value), valor da contagem programado pelo utilizador;
- *Valor corrente*: (CV=Current Value) regista o valor da contagem do contador.

Características

Tabela 5.1 - Características dos contadores

Número		I28	%C0 a %C127
Valor Pré-definido		%Ci.P	Valor, entre 0 e 9999, que é programado pelo utilizador. Pode ser lido e testado, por defeito é colocado em 9999;
Valor Corrente		%Ci.V	Valor que é incrementado ou decrementado em função das entradas CU e CD. Pode ser lido e testado mas não programado;
Entradas	Incrementar (Count Up)	CU	Incrementa o contador (%Ci.V) no flanco ascendente;
	Decrementar (Count Down)	CD	Decrementa o contador (%Ci.V) no flanco ascendente;
	Carregar (Set)	S	S=1, Carrega o contador (%Ci.V) com o valor programado em %Ci.P;
	Colocar a Zero (Reset)	R	R=1, Coloca o contador a zero (%Ci.V=0);
Saídas	Valor Mínimo atingido (Empty)	E	Bit associado a %Ci.E. É igual a “1” quando %Ci.V passar de 9999 a 0;
	Valor Pré-definido atingido (Done)	D	Bit associado a %Ci.D. É igual a “1” quando %Ci.V =%Ci.P;
	Valor Máximo atingido (Full)	F	Bit associado a %Ci.F. É igual a “1” quando %Ci.V passar de 9999 a 0;

Entradas

- *Incrementar (Up)*: Um flanco 0-1 na entrada CU incrementa o valor da contagem %Ci.V de uma unidade. Quando este valor for igual ao valor pré-definido %Ci.P, a saída D liga. Se continuarem a ser aplicados impulsos na entrada, a saída desliga e o contador continua a contagem. Quando a contagem alcançar o valor máximo (9999), o valor seguinte é zero e a saída F (excesso de contagem) liga. Esta saída regressa a “0” se o contador continuar a contar;
- *Decrementar (Down)*: Um flanco 0-1 na entrada CD decrementa o valor da contagem %Ci.V de uma unidade. Quando este valor passar de 0 a 9999, a saída E (excesso de descontagem) liga. Se o contador continuar a descontar, esta saída regressa a “0”;

- *Incrementar/Decrementar (Up/Down)*: Para se utilizar simultaneamente as funções incrementar e decrementar é necessário programar, respectivamente, as entradas CU e CD. Caso estas duas entradas se encontrem a “1”, o valor actual não se altera;
- *Carregar (Set)*: Com a entrada S no estado “1” e a entrada R no estado “0”, o valor corrente %Ci.V é carregado com o valor de %Ci.P e a saída D toma o valor lógico “1”.
- *Colocar a zero (Reset)*: Se a entrada R for colocada a “1”, o valor corrente %Ci.V é forçado a “0” e as saídas E, D e F também são colocadas a “0”. A entrada R é prioritária.

Importante

- Não se pode atribuir o mesmo número a dois contadores;
- A alteração do modo de operação RUN, STOP, RUN não provoca a perda do valor corrente dos contadores;
- Após desligar-se a tensão de alimentação do autómato, o valor corrente dos contadores é salvaguardado pela bateria interna por período de 30 dias.

Configuração dos contadores no software Twido

Colocado o bloco função contador na área de desenho das redes de contactos (Rung), um duplo clique com o botão esquerdo do rato em cima do bloco ou pressionar a tecla *Enter*, com o bloco seleccionado, abre o quadro do contador. Para efectuar a configuração do mesmo é necessário introduzir-se os seguintes parâmetros:

- Número do contador (C0 a C127);
- Valor pré-definido (%Ci.P): 0 a 9999;
- Ajuste: seleccionar ou não.

Funcionamento dos Contadores



Figura 5.12 - Exemplos de contador ascendente

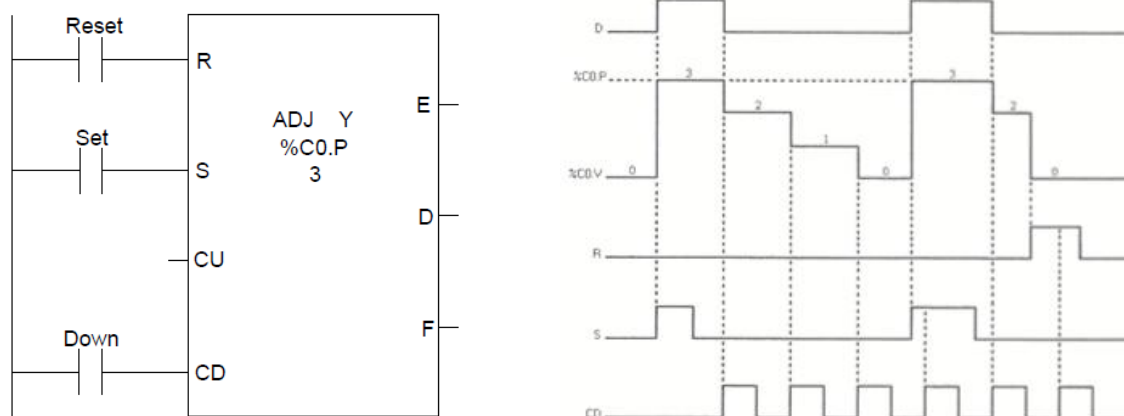


Figura 5.13 - Exemplo de contador descendente

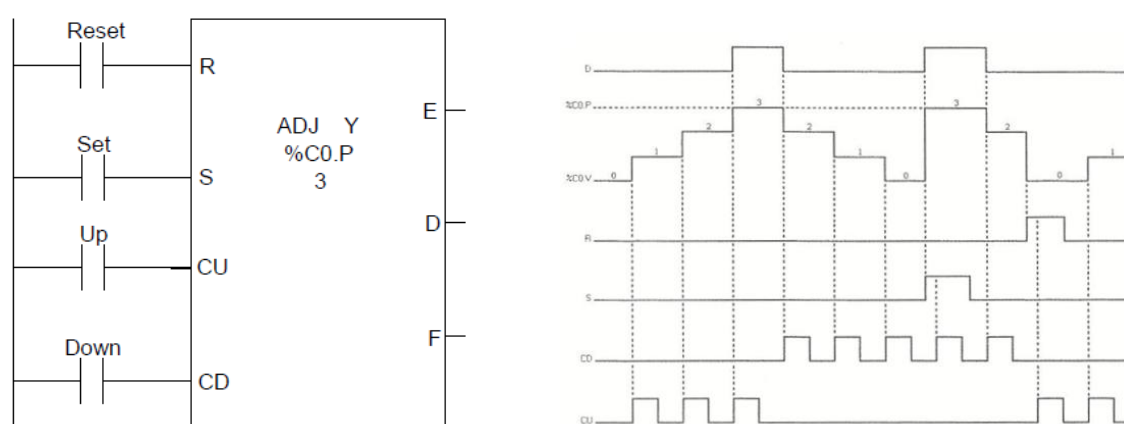


Figura 5.14 - Exemplo de contador ascendente/descendente

5.10.2 Descrição dos Temporizadores

Os temporizadores (%Tmi) utilizam-se para implementar funções dependentes do tempo. Os utilizadores deste autómato são capazes de contar 9999 intervalos de tempo, com resoluções de: 1 ms, 10 ms, 100 ms, 1s e 1min. Aos temporizadores estão associadas duas variáveis [TWIDO, 2009]:

- *Valor pré-definido:* (%Tmi.P), valor programado pelo utilizador;
- *Valor corrente:* (%Tmi.V), regista a contagem do tempo desde que o temporizador é activado.

O valor corrente (%Tmi.V) é comparado com o valor pré-definido (%Tmi.P) e, quando os valores forem iguais, a saída (Q) do temporizador muda de estado.

Características

Tabela 5.2 - Características dos temporizadores

Número	64	%TM0 a %TM63 (autómatos compactos de 10 E/S e 16 E/S);
	128	%TM0 a %TM127 (autómatos compactos de 24 E/S e modulares);
Tipos	TON	Temporizador de atraso à operação;
	TOFF	Temporizador de atraso ao cancelamento da operação;
	TP	Temporizador de impulsos;
Bases de tempo	TB	1 min (por defeito), 1s, 100ms, 10ms e 1ms(p/TM0 a TM5);
Valor Pré-definido	%TMi.P	Valor, entre 0 e 9999, que é programado pelo utilizador. Pode ser lido e testado, por defeito é colocado em 9999
Valor actual	%TMi.V	Valor que aumenta desde 0 a %TMi.P, por incremento de uma unidade, através de impulsos com período igual á base de tempo. Pode ser lido e testado, mas não programado;
Entrada	IN	TON: Ligada a entrada, inicia-se a temporização e, quando $TMi.V = \%TMi.p$, o temporizador vai a “1”. O desligar da entrada coloca o temporizador a zero;
		TOFF: Com a colocação da entrada a “1”, o temporizador também é colocado a “1”. Depois, o desligar da entrada inicia a temporização e, quando $\%TMi.V = \%TMi.P$, o temporizador vai a “0”;
		TP: Com a colocação da entrada a “1”, o temporizador vai a “1”, voltando a “0” quando $\%TMi.V = \%TMi.P$. O desligar da entrada não afecta o temporizador;
Saída	Q	Saída do temporizador. A sua colocação a “1” é efectuada pelo temporizador programado: TON, TOFF ou TP.

Importante

- O valor da temporização é igual a: $(\%TMi.P) \times (\%TB)$;
- Os temporizadores TON, TOF e TP não podem ter números de temporizador iguais;
- A alteração do modo de operação RUN, STOP, RUN não provoca a perda do valor do tempo decorrido ($\%TMi.V$) dos temporizadores;
- Após desligar-se a tensão de alimentação do autómato, o valor do tempo decorrido dos temporizadores é salvaguardado pela bateria interna por período de 30 dias.

Configuração dos temporizadores no software Twido

Colocado o bloco função temporizador na área de desenho das redes de contactos (Rung), um duplo clique com o botão esquerdo do rato em cima do bloco ou pressionar a tecla

Enter, com o bloco seleccionado, abre o quadro do temporizador. Para efectuar a configuração do mesmo é necessário introduzir-se os seguintes parâmetros:

- Número de temporizador;
- Tipo de temporizador: TON, TOF ou TP;
- Base de tempo (TB): 1 min, 1 s, 100 ms, 10 ms ou 1 ms;
- Valor pré-definido (%TMO.P): 0 a 9999;
- Ajuste (ADJ): seleccionar ou não.

Funcionamento dos temporizadores

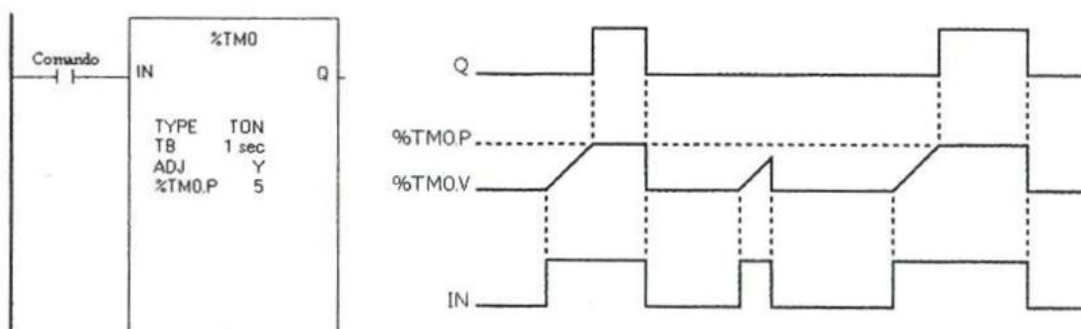


Figura 5.15 - Temporizador com atraso à operação - TON (On-Delay Timer)

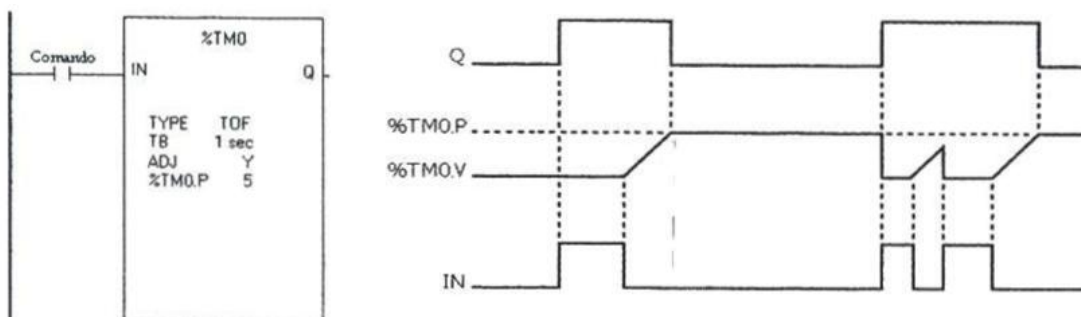


Figura 5.16 - Temporizador com atraso ao cancelamento da operação - TOF (Off-Delay Timer)

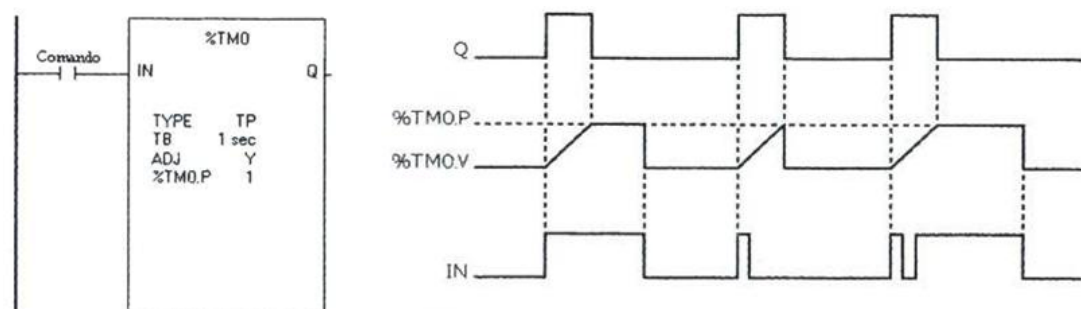


Figura 5.17 - Temporizador por impulsos – TP (Pulse Timer)

5.11 INSTRUÇÕES DE MANIPULAÇÃO E TRANSFERÊNCIA DE DADOS

A evolução da linguagem *ladder* veio permitir a introdução de módulos na linguagem. De facto, a maior parte dos fabricantes não utiliza somente instruções *ladder* com uma entrada e uma saída. Nesta abordagem, considera-se como um módulo as instruções que contêm mais do que uma entrada e/ou saída, ou em que a acção da instrução envolve mais do que um *bit*. A introdução deste tipo de instruções permite a utilização desta linguagem para a resolução de problemas de maior complexidade.

Como módulos encontram-se instruções para transferências de palavras de uns registos para outros, instruções de deslocamento (*shift registers*), entre outros. Em quaisquer destas instruções são especificados os endereços da palavra fonte e da palavra destino [VIANNA, 2008].

Outro tipo de instruções são as de comparação de dados, através das quais é possível comparar palavras armazenadas em dois endereços. A sua saída é geralmente em *bit*, o que permite elaborar estruturas de decisão com base na comparação de dados com mais de um *bit*.

5.12 INSTRUÇÕES ARITMÉTICAS

Estas instruções incluem as quatro operações aritméticas básicas: adição, subtracção, multiplicação e divisão. Existem, no entanto, autómatos que fornecem outro tipo de operações aritméticas como, por exemplo, a raiz quadrada, complemento, incremento/decremento.

5.13 INSTRUÇÕES DE CONTROLO DO PROGRAMA

Este tipo de instruções é usado a fim de alterar a sequência de execução do programa. As instruções de controlo de programa tornam assim possível a execução de partes de programa de uma forma condicional, e além disso, permitem a utilização do conceito de subrotina na linguagem *ladder*. A subrotina toma geralmente a forma de um módulo definido pelo utilizador [VIANNA, 2008].

As instruções mais representativas são apresentadas a seguir:

- JMP label- a próxima instrução a executar é a instrução cujo endereço é *label*;
- LABEL - permite especificar um endereço na forma textual;

- *CALL* - *label* chama uma subrotina cujo código está localizado no endereço especificado em *label*. A instrução a executar após a execução da subrotina, é a instrução localizada a seguir à instrução de *CALL*;
- *RET* - instrução para marcar o fim de uma subrotina;
- *END* - instrução que marca o fim do programa.

As instruções de chamada a subrotinas permitem uma abordagem mais simples à realização dos programas, pois possibilitam a execução de módulos pré-definidos pelo programador, rentabilizando a memória existente para a criação de programas.

Muito embora o leque de instruções *ladder* implementadas pelos diversos fabricantes seja muito variado, dependendo na maioria dos casos da gama do autómato, abordaram-se neste ponto os principais tipos de instruções disponíveis no autómato TWIDO da empresa Schneider Electric.

IMPLEMENTAÇÃO PRÁTICA

6.1 INTRODUÇÃO

Com o objectivo de compreender e aplicar o que foi apresentado nos capítulos anteriores, baseados no arranque e controlo de velocidade do motor de indução trifásico, utilizando um soft-starter e um inversor de frequências ambos da empresa Schneider Electric. O presente capítulo aborda os aspectos relativos da descrição dos diferentes módulos utilizados bem como a forma como foram implementados. Para além disso serão apresentados os diferentes esquemas quer da parte de potência quer da parte de comando. Por fim para além do *hardware* que constitui o nosso sistema, é também apresentado o *software* de controlo desenvolvido para o autómato e que permite de forma automatizada e mais eficiente controlar o motor de indução.

6.2 MOTOR DE INDUÇÃO UTILIZADO

O motor escolhido para a aplicação é um motor de indução rotor em gaiola, cujo fabricante é a LN (Lucas Nulle) do tipo SE2662-5G conforme ilustrado na figura 6.1. Este motor tem uma rotação de 2780 rpm com uma tensão de entrada de 220 V (ligação em triângulo) e 380 V (ligação em estrela), possui uma corrente nominal de 2,5 A, um $\cos\phi$ de 0,83, uma frequência de 50Hz e uma potência de 1kW que corresponde a 1,34 CV. Por definição 1 CV é igual 745,7 W e é a potência de um cavalo robusto para levantar 75 kg à altura de um metro durante um segundo.



Figura 6.1 - Motor de indução trifásico da LN

A escolha do motor foi esta, uma vez que existia no laboratório de máquinas eléctricas e também pelo facto de não estarmos dependentes de uma escolha para uma aplicação em concreto, sendo que se assim fosse, teríamos de ter em conta o tipo de carga, binário, a velocidade e só posteriormente escolheríamos o motor mais adequado ao processo.

6.3 SOFT-STARTER ALTISTART 01

O soft-starter ATS01N209QN é um conversor que melhora a performance de arranque dos motores de indução, permitindo arranques e paragens suaves de uma forma controlada. Limita o binário de arranque, que nalgumas situações pode não ser desejável, e os picos de corrente no arranque do motor, controlando duas fases da alimentação.

A alimentação do motor de indução trifásico com este soft-starter é feita, através do aumento progressivo da tensão de arranque, obtida por meio de um circuito composto de seis tiristores, montados em anti-paralelo em cada fase da rede, permitindo, em função do ângulo de disparo dos tiristores, fornecer uma tensão que aumenta progressivamente com frequência fixa.

A subida progressiva da tensão de saída é controlada através de um potenciómetro de ajuste. A paragem progressiva é obtida da mesma forma que a aceleração mas com os parâmetros aplicados de forma contrária.

6.3.1 Descrição

Os Altistart 01 estão equipados com três potenciómetros de regulação, dois leds que indicam o estado do soft-starter e ainda um barramento de controlo que permite controlar os arranques e paragens, bem como ter acesso a variáveis que sinalizam falhas de alimentação. Na figura 6.2 temos o soft-starter Altistart 01 com a respectiva legenda que passo a descrever pormenorizadamente.



Figura 6.2 - Descrição do soft-starter Altistart 01

Este soft-starter possui um led verde (1) sinalizador de que o soft-starter está alimentado, um led amarelo (2) que sinaliza o fim do arranque do motor ao atingir a tensão nominal do mesmo. Temos um potenciómetro (3) de regulação do tempo de arranque do motor e outro potenciómetro (5) onde regulamos o tempo pretendido na desaceleração do motor. Juntamos ainda um terceiro potenciómetro (4) para ajustar o nível de tensão aplicado no arranque do motor em função do nível de carga.

Por último temos um conector (6) com diversos inputs/outputs, onde temos duas entradas digitais que dão ordem de arranque e paragem do motor, uma entrada digital para a função BOOST, uma saída digital que sinaliza o fim do arranque, uma saída a relé que sinaliza uma falha na alimentação no arranque ou na desaceleração. Este conector (6) tem ainda dois contactos que permitem a alimentação da parte de controlo. Na tabela 6.1 estão descritos a designação dos inputs/outputs do conector (6) e respectivas funções.

Tabela 6.1 - Correspondência entre a designação dos contactos e as diferentes funções

<i>Funções</i>	<i>Contactos</i>
<i>Saída a relé</i>	R1A
	R1C
<i>0 V alimentação externa</i>	COM
<i>Comando de paragem</i>	LI1
<i>Comando de arranque</i>	LI2
<i>Alimentação de controlo</i>	LI+ (+ 24 V)
<i>Função BOOST</i>	BOOST
<i>Fim do arranque</i>	LO1

A regulação do tempo de arranque permite ajustar a rampa da tensão aos terminais do motor e obter um tempo de arranque progressivo dependente da carga acoplada ao motor. A activação da função BOOST permite fornecer maior binário de arranque capaz de superar os atritos mecânicos da carga. Com esta função activa aplicamos aos terminais do motor durante 200 ms a tensão nominal e posteriormente aplicamos a rampa de tensão ajustada como podemos observar na figura 6.3.

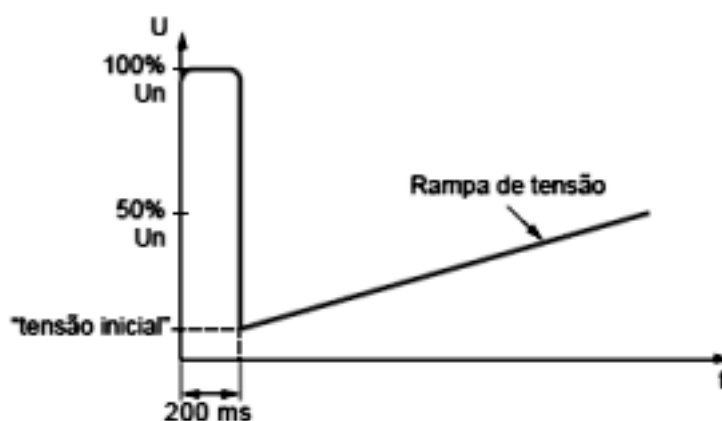


Figura 6.3 - Variação da tensão quando aplicamos a função BOOST

6.3.2 Características Eléctricas

O soft-starter ATS01N209QN foi desenvolvido para corresponder aos níveis mais severos das normas internacionais e às recomendações relativas aos equipamentos eléctricos de controlo industrial. É alimentado com tensão trifásica entre 380 V a 415 V, com uma margem de variação até 10% e uma frequência de 50 Hz a 60 Hz com uma margem máxima de variação de 5%. A tensão máxima de saída neste soft-starter é igual a tensão da rede de alimentação.

Foi desenvolvido para uma corrente nominal de 9 A e aplicado em motores de indução até 4 kW. Em regime permanente de plena carga consome 4 W, sendo que no período de arranque, ou seja, em regime transitório consome 94 W. A corrente de arranque a plena carga pode chegar aos 45 A.

Relativamente ao consumo da alimentação de controlo temos uma saída LI+ que disponibiliza 24 V e uma corrente máxima de 10 mA. Os contactos LI+ e COM não estão protegidos contra curto-circuitos e sobrecargas. Os contactos LI1, LI2, e BOOST, são entradas digitais isoladas galvanicamente entre o circuito de potência e de controlo, com uma impedância de 27 kohms. São alimentados a 24 V, podendo admitir um máximo de 40 V, e consomem uma corrente de 8 mA. Encontram-se no estado inactivo para uma tensão e uma

corrente inferior a 5 V e 0,2 mA respectivamente, ficam activas para uma tensão superior a 13 V e uma corrente maior que 0,4 mA.

A saída LO1 é uma saída digital em colector aberto com alimentação externa de 24 V com uma corrente máxima de 200 mA. A saída a relé R1A R1C é um contacto normalmente aberto, com suporte de tensão até 440 V e com um poder de comutação mínimo de 10 mA para 6 V e um poder de comutação máximo com carga indutiva de $L/R=20$ ms e $\cos\phi=0,5$.

6.3.3 Circuito de Controlo

O circuito de comando do soft-starter foi desenvolvido utilizando o autómato compacto TWIDO da empresa SCHNEIDER ELECTRIC com a referência TWDLCAE40DRF. Com este soft-starter existe a possibilidade de fazer o controlo do arranque de duas formas designadas, comando a dois fios e comando a três fios. No comando a dois fios o arranque e desaceleração são controlados utilizando apenas uma entrada digital a LI2. No estado activo faz o arranque do motor e quando passa a um estado inactivo processa-se à desaceleração do motor. Os esquemas de ligação e temporal deste tipo de comando estão representados nas figuras 6.4 e 6.5.

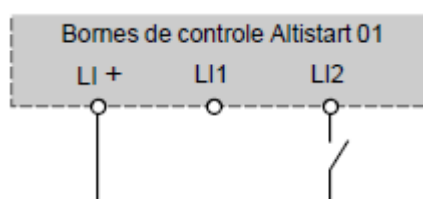


Figura 6.4 - Esquema de ligação de comando a dois fios



Figura 6.5 - Esquema temporal do comando a dois fios

No comando a três fios, o arranque e desaceleração do motor são controlados utilizando duas entradas digitais diferentes LI1 e LI2. A desaceleração do motor é processada quando a entrada LI1 abre, ou seja, passa ao estado 0. O arranque é efectuado quando damos um impulso na entrada LI2, sendo esta memorizada até que a entrada LI1 fique inactiva (estado 0), procedendo-se desta forma à desaceleração do motor. Nas figuras 6.6 e 6.7 estão representados os esquemas de ligação e temporal, para o comando a três fios implementado com o PLC referido anteriormente.

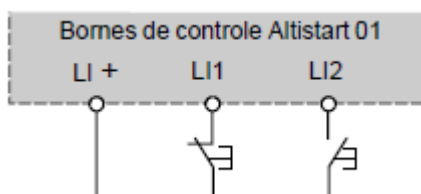


Figura 6.6 - Esquema de ligação no comando a três fios

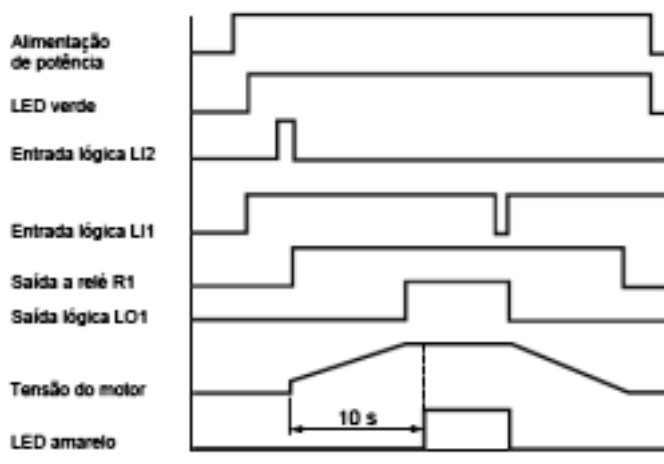


Figura 6.7 - Esquema temporal do comando a três fios

A implementação em linguagem de contactos do comando a três fios foi desenvolvida no software Twido Suite 1.2. A entrada física com o endereço %I0.4 permite fazer a desaceleração do motor caso o bit interno %M2 esteja activo. Este bit interno encontra-se activo no caso de algumas condições se verificarem tais como não tenha sido dada ordem de STOP ao sistema. A saída com o endereço %Q0.10 está ligada fisicamente com o soft-starter à entrada LI1. A malha que corresponde a descrição anterior é a seguinte:



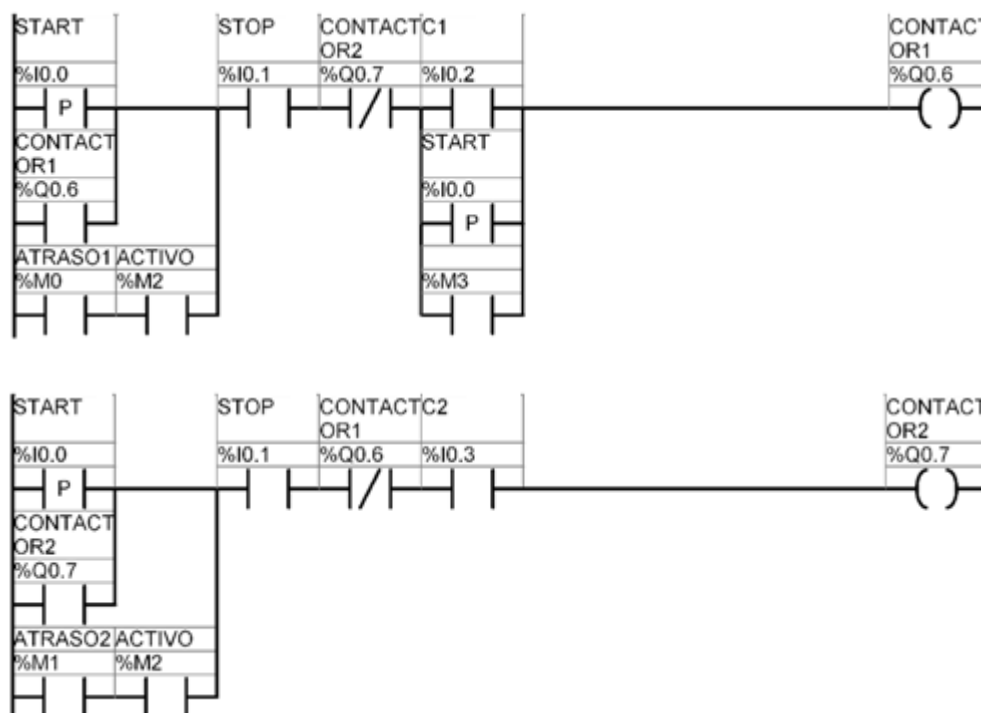
Para realizarmos a aceleração suave do motor utilizamos a malha seguinte:



A entrada %I0.5 permite activar a saída %QO.11 ligada ao soft-starter pelo contacto LI2 que memoriza o nível alto e aguarda que seja aberto o contacto LI1 de forma, a que o arranque se processe. Para que esta sequência ocorra temos mais uma vez que estar nas condições em que o bit interno %M2 esteja activo.

No circuito de comando incluímos também o comando dos contactores utilizados não só para alimentar o circuito de potência como também para realizarmos a inversão do sentido de rotação do motor. Como a inversão do sentido de rotação do motor implica a troca de duas fases tivemos que ter o cuidado de ter não só uma protecção mecânica como também implementamos uma protecção a nível do software para evitar curto circuitar as fases da alimentação.

Nas malhas seguintes está representado o circuito de comando dos contactores em linguagem de contactos em que as saídas %Q0.6 e %Q0.7 correspondem respectivamente aos contactores KM2 e KM3 do circuito de potência. Estas saídas são activas pelas entradas físicas %I0.2 e %I0.3 respectivamente, caso as condições de segurança e de arranque estejam reunidas. De referir ainda que as bobinas de comando dos contactores são em corrente alternada 230 V logo as saídas utilizadas no autómato foram saídas do tipo relé.



6.3.4 Circuito de Potência

O circuito de potência a seguir apresentado é responsável não só pela alimentação do motor como também do soft-starter. A alimentação do sistema é feita com tensão trifásica daí

tanto o disjuntor de protecção térmica e os contactores serem trifásicos como não poderia deixar de ser. O disjuntor utilizado é da empresa Telemecanique e tem a referência GV2ME14 de calibre 9 A, que faz a protecção térmica do motor bem como contra curto-circuitos e sobre intensidade. Na figura 6.8 o comando do disjuntor está identificado com Q1.

Os contactores KM2 e KM3, que permitem a inversão do sentido de rotação do motor são da empresa Telemecanique, com a referência LC1D09P7. De referir ainda que estes disjuntores têm acoplado um módulo de protecção com referência LA4DA2U que permite de uma forma mecânica proteger os contactores de curto-circuito.

Por fim, temos o soft-starter que como foi descrito nos capítulos anteriores permitindo alimentar o motor de indução de forma controlada e previamente configurada.

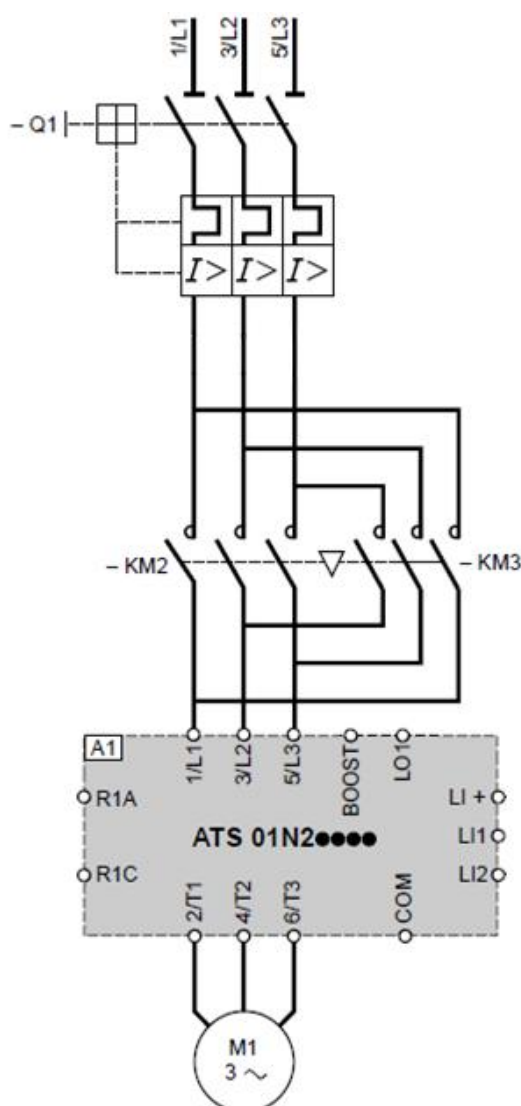


Figura 6.8 - Circuito de potência soft-starter + motor

6.4 INVERSOR DE FREQUÊNCIA ALTIVAR 11

O Altivar ATV11HU29M2A é um inversor de frequência para motores de indução trifásicos de potência inferior a 1,5 kW, com alimentação monofásica de 230 V. É um inversor desenvolvido principalmente para aplicações comuns como sejam, movimentos horizontais, portas automáticas, misturadoras, ventiladores, bombas, entre outras.

A alimentação do motor de indução trifásico com este inversor é feita, através de controlo vectorial de fluxo sem realimentação e comando PWM. A frequência de comutação dos tiristores varia entre os 2 kHz e 16 kHz e a frequência de saída pode ir de 0 a 200 Hz.

Este inversor tem a possibilidade de fazer o arranque, desaceleração, regulação de velocidade e inversão do sentido de rotação do motor de indução. De referir ainda que, este inversor tem incorporadas algumas protecções, tais como, protecção térmica, protecção contra curto circuitos, protecção de sobrecorrentes, sobretensões, subtensões e ausência de fase. Relativamente ao motor o inversor tem apenas integrada protecção térmica.

6.4.1 Descrição

Os Altivar 11 estão equipados com um display de sete segmentos, seis teclas de selecção e um potenciómetro de referência, como está representado na figura 6.9:

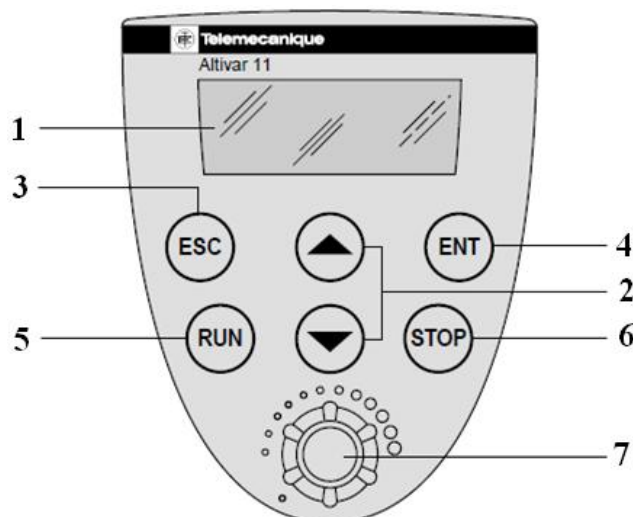


Figura 6.9 - Painel frontal do Altivar 11

Em (1) temos o display onde é feita a visualização por códigos ou valores de três dígitos de sete segmentos para configuração das funções a executar. As teclas de selecção pelos menus ou para modificar valores é feita em (2). A tecla ESC (3) permite sair para os menus anteriores sem que as opções tomadas sejam validadas. A tecla ENT (4) permite confirmar uma opção ou valor escolhido, assim como, permite entrar no menu seguinte.

Quando não necessitamos de fazer o arranque através de controlo remoto a tecla RUN (5) permite que o arranque se processe segundo a configuração previamente determinada pelo utilizador. Para o processo de paragem do motor sem controlo remoto utilizamos a tecla STOP (6). Em (7) temos o potenciómetro de referência da velocidade, ou seja, permite regular a frequência de saída.

Temos ainda disponível um painel com doze bornes de controlo remoto que estão descritos na figura 6.10:

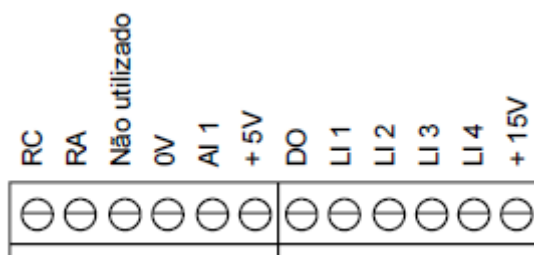


Figura 6.10 - Bornes de controlo

Os bornes RC e RA são contactos do relé de falha, permitindo sinalizar remotamente o estado do inversor. Abre no caso de o inversor não estar alimentado ou de uma eventual falha. O borne 0 V é o comum das entradas/saídas, no caso da não utilização dos +15 V disponibilizados pelo inversor, ou seja, quando utilizamos uma fonte externa de tensão máxima +24 V. Relativamente aos bornes AI1 e +5 V estes permitem de forma remota adicionar um potenciómetro de referência para controlar a velocidade do motor. O borne AI1 tem ainda a possibilidade de ser controlado através de uma fonte de corrente externa.

O borne DO pode ser programado tanto como uma saída analógica ou como saída digital em colector aberto. As suas funções são de sinalização remota da frequência de saída ou do nível corrente aplicada ao motor. Os bornes LI são entradas digitais configuráveis permitindo misturar diversas funções numa mesma entrada. Permitem fazer o arranque e paragem do motor, fazer a inversão do sentido de rotação, bem como seleccionar entre 4 velocidades previamente programadas. O borne +15 V permite fazer a alimentação das entradas digitais e está protegida contra curto-circuitos e sobrecargas.

A nível de software do inversor temos disponível um primeiro nível de regulação e quatro menus de configuração, supervisão e controlo do motor. No primeiro nível de regulação podemos configurar o tempo das rampas de aceleração e desaceleração, que podem ir desde 0,1 s a 99,9 s. Temos também a possibilidade de regular a velocidade de arranque (LSP), a velocidade final (HSP), bem como a protecção térmica do motor e até quatro velocidades pré-seleccionadas como podemos observar na figura 6.11.

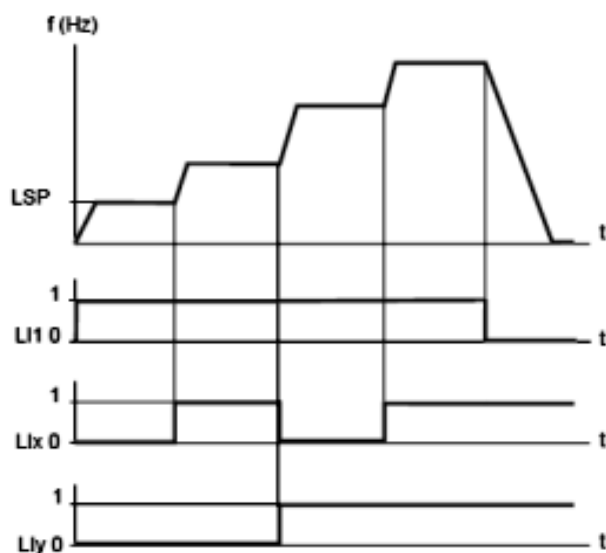


Figura 6.11 - Exemplo de funcionamento com 4 velocidades pré-seleccionadas

O primeiro menu (Alt) permite configurar a entrada de controlo A11 de forma a controlar remotamente a velocidade do motor. O segundo menu (DrC) permite configurar os parâmetros nominais do motor tais como tensão, corrente, frequência, factor de potência bem como o escorregamento.

O terceiro menu (Fun) é o menu de funções onde configuramos o tipo de controlo, isto é, comando a dois ou três fios. O sentido de rotação do motor configurando uma das entradas LI. A frequência de comutação dos tiristores que pode ser configurada para 2, 4, 8, 12 e 16kHz. Quanto mais elevada for esta frequência, menor será o ruído e a distorção harmónica. Podemos também configurar o nível de sobrecarga do motor, entre 70 a 150% da corrente nominal, uma segunda rampa de aceleração e desaceleração como apresentado na figura 6.12, a saída analógica DO, bem como algumas funções de arranque automático após falhas, ou funções de memorização das configurações realizadas.

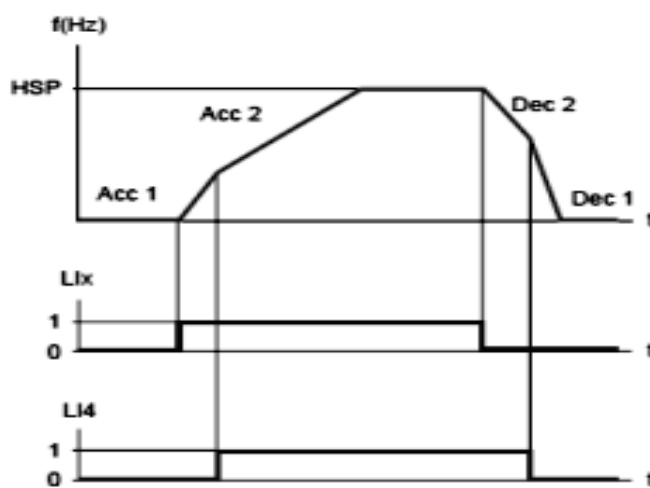


Figura 6.12 - Exemplo da segunda rampa com a entrada LI4

Por último temos o menu (SUP) que permite fazer a supervisão de alguns parâmetros do inversor e também do motor, tais como a frequência e corrente aplicada ao motor. O estado térmico do motor e do inversor que se ultrapassarem os 118% o variador dispara e só arranque quando estes voltarem ao estado normal (100%). Neste menu temos ainda a possibilidade de proteger todas as configurações com uma *password* de acesso com três dígitos de 2 a 999.

6.4.2 Características Eléctricas

O inversor Altivar 11 foi projectado para respeitar as directrizes europeias de baixa tensão. A alimentação do inversor ATV11HU29M2A é em tensão monofásica 230 V a 50 Hz. A tensão de saída é em tensão trifásica igual à tensão máxima da rede de alimentação.

Foi desenvolvido para uma corrente nominal de saída igual a 7,5 A e aplicado para motores até 2 HP. Em regime permanente de plena carga consome 78 W, sendo que no período de arranque, ou seja, em regime transitório consome 116 W para uma corrente de 11,2 A.

Relativamente aos bornes de controlo temos duas fontes internas protegidas contra curto-circuito e sobrecarga. A fonte +5 V, utilizada para o potenciómetro de referência entre 2,2 a 10 k Ω , com uma corrente máxima de 10 mA. A fonte +15 V só pode ser utilizada para alimentar as entradas de comando e disponibiliza uma corrente máxima de 100 mA. A entrada analógica AI1 tem uma impedância de 40 k Ω , quando alimentada entre 0 a 5 V com a fonte interna e entre 0 a 10 V com uma fonte externa. Se a configuração desta entrada for em corrente entre 0 a 20 mA ou 4 20 mA a impedância de entrada é 250 k Ω . As entradas digitais LI podem ser alimentadas no máximo até 30 V sendo que, estão no estado 0 para uma tensão inferior a 5 V e no estado 1 para tensões superiores a 11 V. A impedância destas entradas é de 5 k Ω com um tempo de amostragem máximo de 20 ms.

O borne DO pode ser configurara como saída analógica em colector aberto do tipo PWM a 2 kHz com um tempo máximo de amostragem de 20 ms. Disponibiliza uma tensão máxima de 30 V e uma corrente de 10 mA com uma impedância de 1 k Ω . Quando configurada como saída digital disponibiliza uma tensão de 30 V com 50 mA e uma impedância de 100 Ω .

A saída a relé (RA - RC) tem capacidade de comutação mínima com corrente de 100 mA a 24 V contínuos e capacidade máxima para uma carga resistiva de 5 A a 250 V ou 30 V contínuos. Para uma carga indutiva o poder de comutação máximo é de 2 A para 250 V ou 30 V contínuos.

6.4.3 Circuito de Controlo

O circuito de controlo remoto do inversor de frequência Altivar 11 foi desenvolvido utilizando o autómato compacto TWIDO da empresa SCHNEIDER ELECTRIC com a referência TWDLCAE40DRF. Com este inversor existe a possibilidade de fazer o controlo do arranque, paragem e inversão do sentido de rotação de duas formas designadas, comando a dois fios e comando a três fios.

No comando a dois fios com a entrada LI1 activa fazemos arranque do motor desde a velocidade mínima pré-programada (LSP) até a velocidade máxima (HSP). A paragem do motor efectua-se sem rampa de desaceleração quando a entrada LI1 passar ao estado 0 (circuito aberto). Se pretendemos obter o sentido de rotação inverso ao realizado por LI1 então utilizamos outra entrada LIx (com $x=2,3,4$). O processo de arranque e paragem com a entrada LIx processa-se da mesma forma que em LI1. O esquema de ligação para o comando a dois fios está representado na figura 6.13:

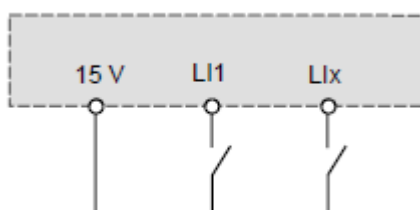


Figura 6.13 - Esquema de ligação no comando a dois fios

Para o esquema de comando a três fios temos a possibilidade de fazer o arranque a inversão do sentido de rotação do motor e ainda a paragem com rampa de desaceleração. A entrada LI1 é responsável pela desaceleração do motor quando esta entrada passa ao estado 0 (circuito aberto). A entrada LI2 é responsável pelo arranque mas para que isso aconteça LI1 tem de estar no estado 1. Existe ainda a possibilidade de utilizar uma terceira entrada LIx (com $x=3,4$) que permite fazer a inversão do sentido de rotação do motor. Nas figuras 6.14 e 6.15 estão representados os esquemas de ligação e temporal, para o comando a três fios implementado no PLC TWIDO com fonte externa de +24 V para alimentação das entradas de comando.

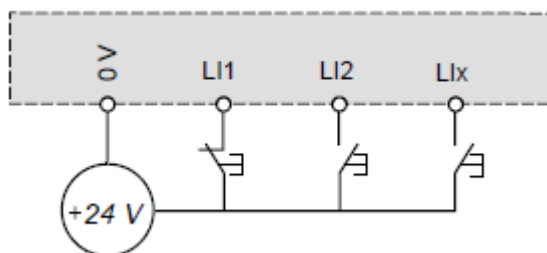


Figura 6.14 - Esquema de ligação no comando a três fios

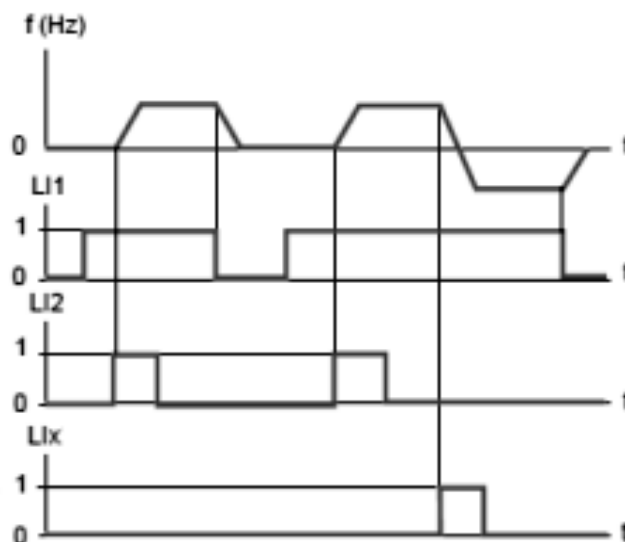


Figura 6.15 - Esquema temporal do comando a três fios

A implementação em linguagem de contactos do comando a três fios foi desenvolvida no software Twido Suite 1.2. O controlo da desaceleração é feita com a saída do autómato %Q0.2 e fica activa pela entrada do autómato %I0.7 sempre que as condições de arranque estejam reunidas. A malha que descreve o controlo da desaceleração do motor é a seguinte:



Para realizamos o arranque do motor utilizamos a saída do autómato %Q0.3 ligada à entrada LI2 do inversor que será activa pela entrada %I0.8. De notar o arranque só será processado no caso de LI1 estar no estado 1 (%Q0.2 activa). A malha que descreve o processo de arranque é:



A malha seguinte permite fazer a inversão do sentido de rotação do motor quando a entrada %I0.9 passa ao estado activo e as condições de arranque garantidas (%M2 activa). No caso de o motor se encontrar em funcionamento quando a saída %Q0.4 fica activa, o inversor

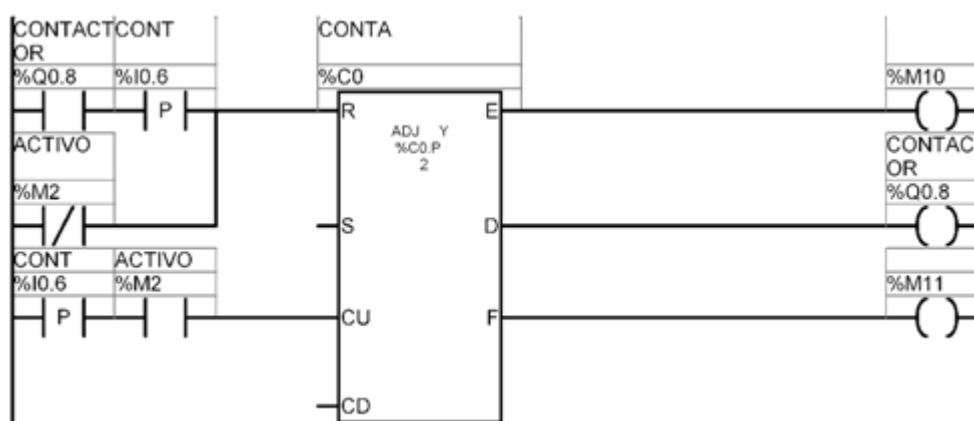
processa de forma automática a desaceleração do motor até a velocidade LSP e só depois passa a girar em sentido contrário.



A malha que se segue não faz parte do controlo a três fios mas foi desenvolvida para activar uma velocidade previamente seleccionada no menu bFr do inversor. A velocidade escolhida foi de 1390 correspondente a uma frequência de 25 Hz. Esta frequência passa a ser aplicada ao motor sempre que a entrada %I0.10 fica activa e consequentemente a saída %Q0.5 obriga a entrada LI4 do inversor a passar ao estado 1.



No circuito de comando incluímos também o comando do contactor utilizado para alimentar o circuito de potência, em que a saída %Q0.8 da malha seguinte corresponde ao comando do contactor KM1 do circuito de potência. Ouve a necessidade de colocar um contador na malha de controlo uma vez que no laboratório não existia mais botões ON/OFF disponíveis, apenas existiam botões de pressão. Como tal, a entrada %I0.6 activa no flanco ascendente, incrementa o contador até dois de forma a activar a saída %Q0.8. Desta forma, para alimentar o circuito de potência temos de fazer *double-click*, garantido que este não entra em condução acidentalmente.



6.4.4 Circuito de Potência

O circuito de potência a seguir apresentado é responsável não só pela alimentação do motor como também do inversor de frequência. A alimentação do inversor é feita com tensão monofásica, mas como o disjuntor de protecção Q1 é trifásico um dos bonés de saída do

disjuntor é ligado a um borne de entrada como mostra a figura 6.16, de forma a funcionar correctamente.

O disjuntor utilizado é da empresa Telemecanique e tem a referência GV2ME21 de calibre regulável entre 17 a 23 A, que faz a protecção térmica do motor bem como contra curto-circuitos e sobre intensidade.

O contactor KM1 é da empresa Telemecanique, com a referência LC1D25P7 e com um calibre de 25 A, assegurando desta forma a protecção de pessoas e equipamento contra sobrecorrente e curto-circuitos.

À saída do inversor temos tensão trifásica para alimentar o motor de indução com um valor máximo igual à tensão de alimentação do inversor. De notar ainda que o ponto de terra do motor deve estar ligado ao ponto de terra do inversor, de forma a garantir uma ligação equipotencial. Desta forma evitam-se as altas frequências prejudiciais ao funcionamento do motor sem a necessidade de aplicar filtros, que encarecem o custo final da aplicação.

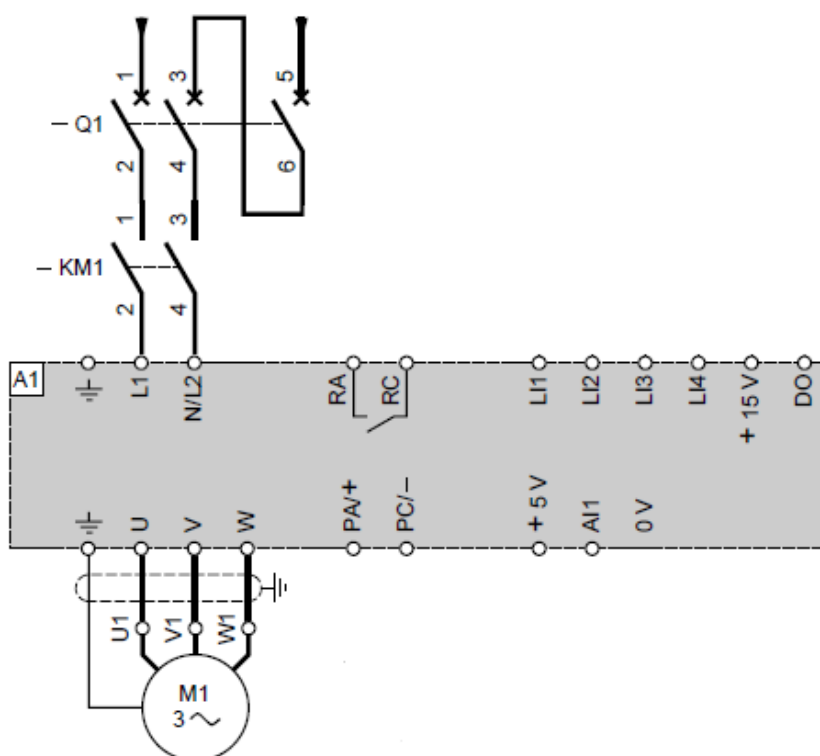


Figura 6.16 - Circuito de potência do inversor de frequência + motor

6.5 AUTÓMATO TWIDO

O Twido TWDLCAE40DRF é um controlador programável compacto utilizado essencialmente em aplicações de controlo de pequena dimensão. A tensão de alimentação deste autómato pode variar entre os 100 V e 240 V alternados. Possui um total de 40 entradas/saídas digitais; 24 destas são entradas do tipo NPN/PNP alimentadas a 24 V, 14 são saídas a relés com uma corrente máxima admissível de 2 A e possui ainda duas saídas a transístor com uma corrente máxima admissível de 1 A.

Este autómato, apesar de ser um módulo compacto permite, a expansão até 7 módulos de entrada/saída. Possui quatro entradas de contagem com uma frequência de amostragem de 5 kHz e duas saídas de contagem como uma frequência de amostragem de 20 kHz.

Como portas de comunicação tem já integrado uma porta de Ethernet e uma porta RS-485, esta que permite a programação do PLC. Pode ainda ser adicionado um módulo que permite tanto a comunicação RS-232 como a RS-485. Os protocolos suportados por este autómato são Modbus mestre/escravo, ASCII e CANopen, através de um módulo de expansão.

6.5.1 Circuitos de Entradas e Saídas

O circuito de entradas no autómato consiste essencialmente nos botões de controlo do inversor de frequência, do soft-starter, dos contactores e ainda uma betoneira de Start/Stop do sistema. As entradas são todas alimentadas com a fonte interna do autómato a 24 V, como descrito na figura 6.17.

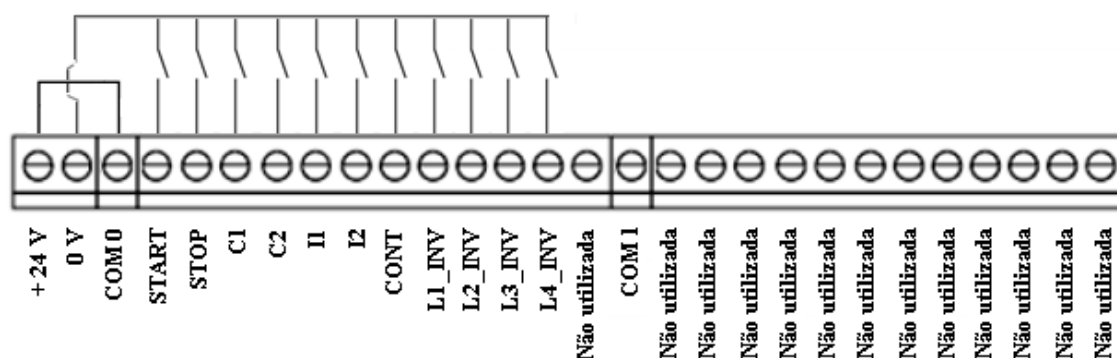


Figura 6.17 - Esquema das entradas no autómato

No circuito de saída do autómato utilizamos apenas saídas do tipo relé, todas alimentadas com fontes externas, sendo as saídas para os contactores alimentadas com 230 V alternados e para o circuito de comando do inversor e do soft-starter uma fonte de 24 V contínuos. A figura 6.18 descreve o circuito de saída do autómato.

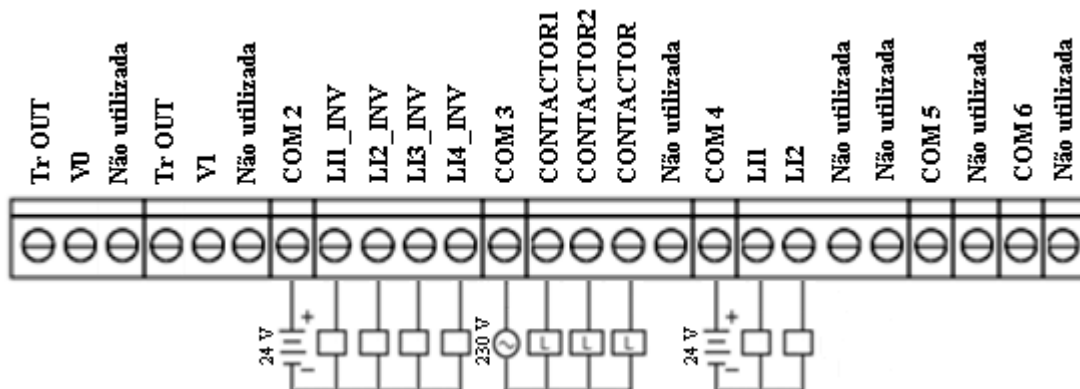
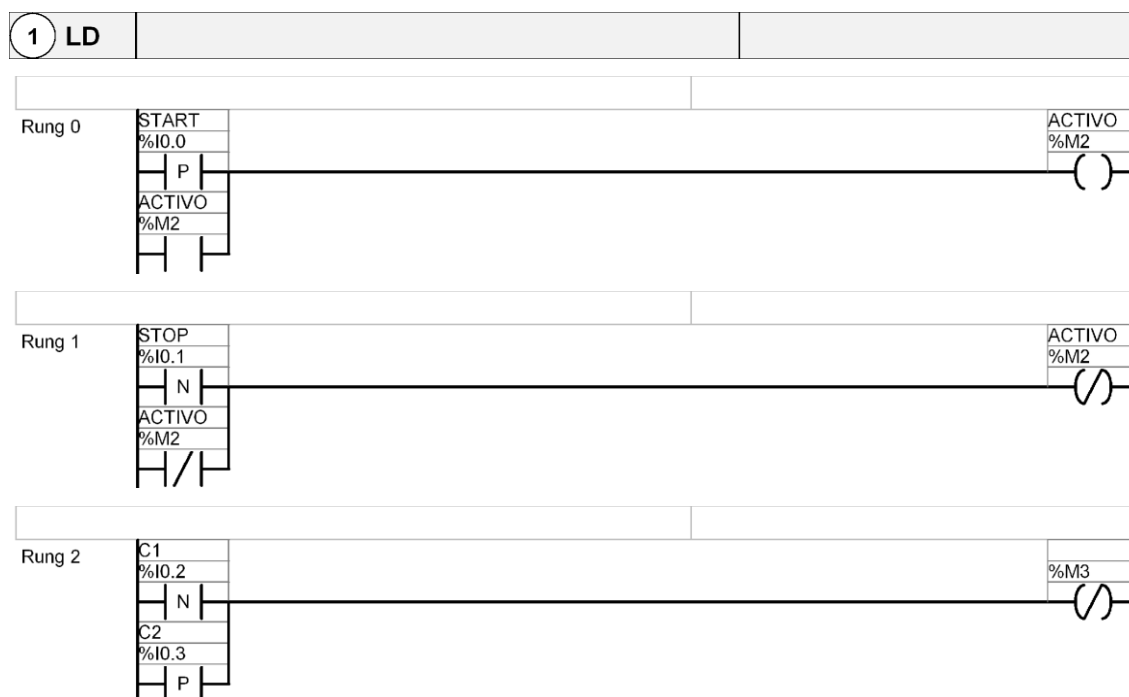


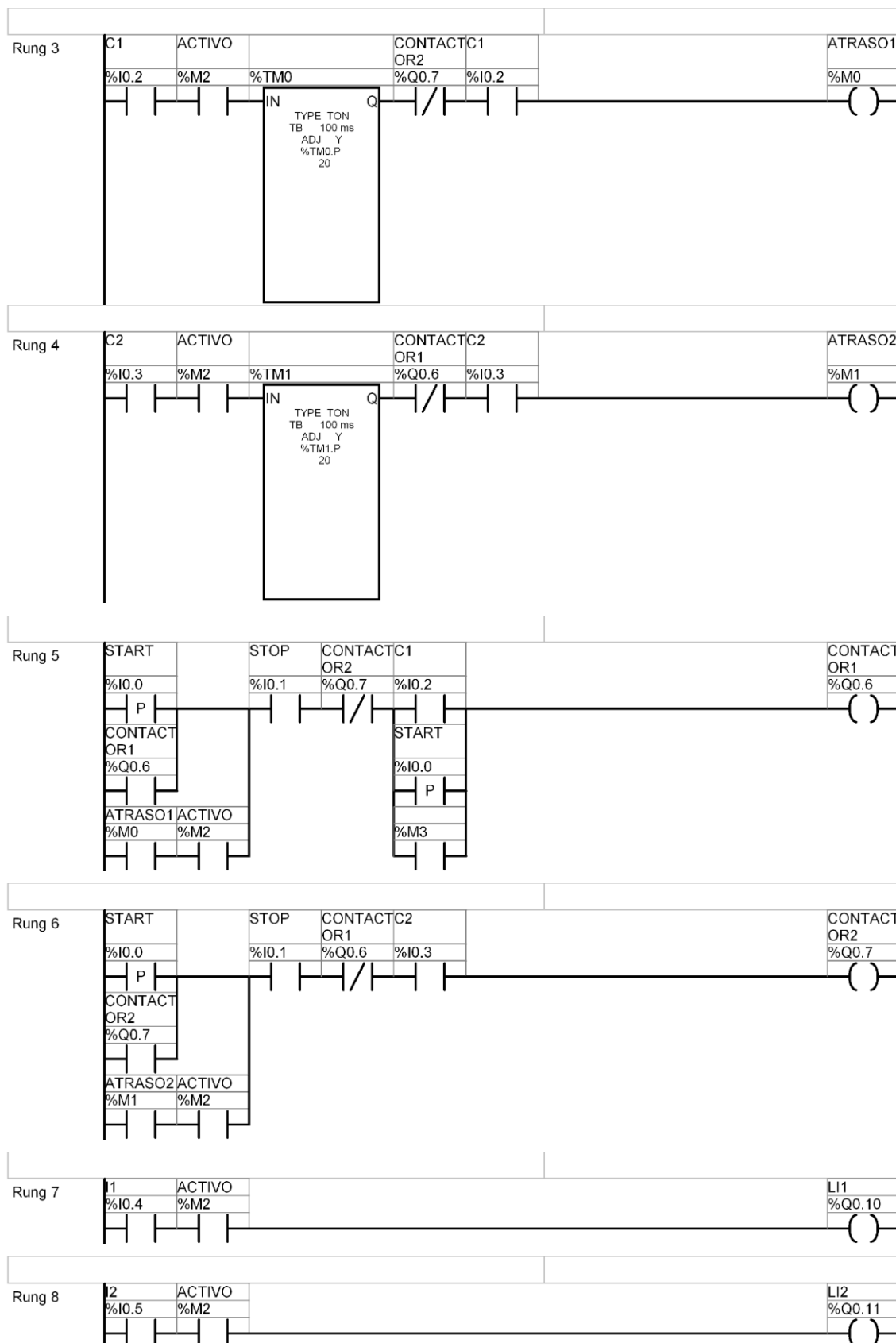
Figura 6.18 - Esquema das saídas no autómato

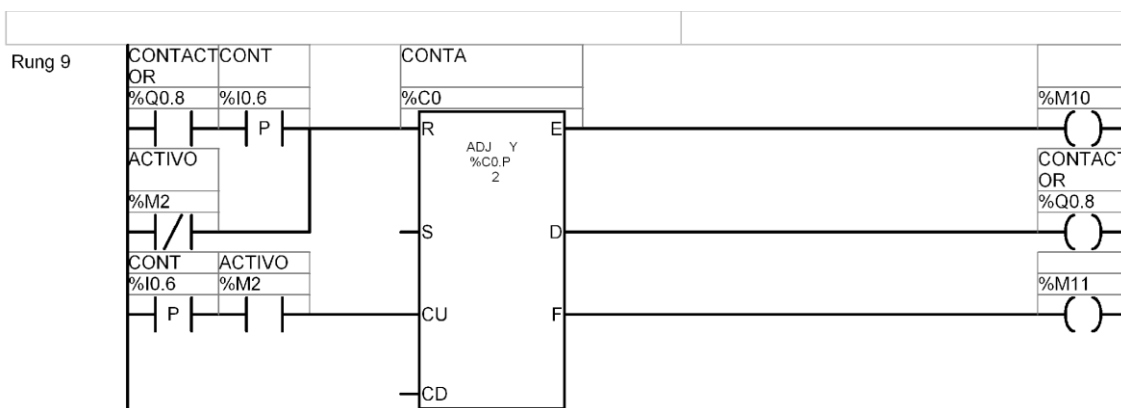
6.5.2 Software Desenvolvido

O software utilizado neste trabalho foi desenvolvido utilizando o programa Twido Suite 1.2. Este programa permite fazer a simulação do software no PC, por outro lado, permite a leitura em “tempo-real” do estado do autómato quando ligado ao PC. Temos também a possibilidade de forçar o estado das entradas e saídas, bem como, alterar o valor dos registos.

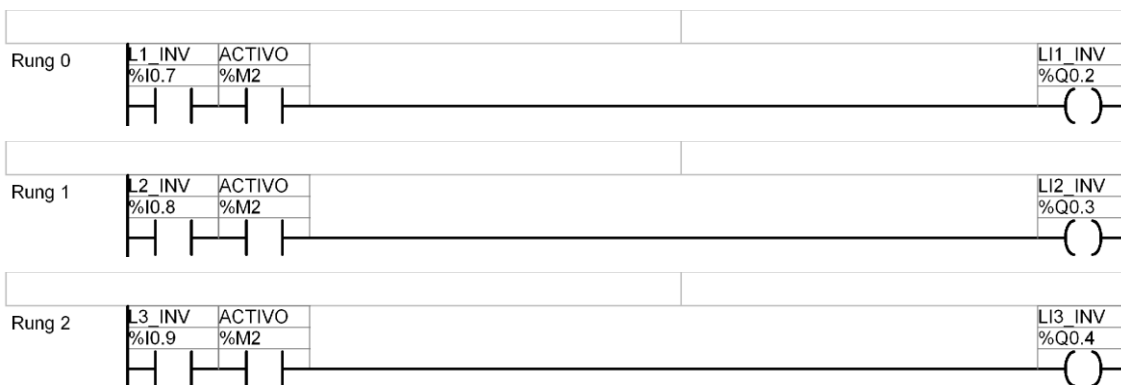
A seguir está apresentado todo o software desenvolvido em linguagem de contactos, sendo que parte deste, já foi exposto em itens anteriores:







2 LD



3 LD



CONSIDERAÇÕES FINAIS

7.1. CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um sistema que permite fazer o controlo do arranque e da velocidade do motor de indução trifásico, muito particularmente utilizando um soft-starter e um inversor de frequência comandados a partir de uma autómato.

Globalmente e do ponto de vista do desenvolvimento, o trabalho apresentado pode encarar-se como contendo duas partes distintas: uma componente de análise dos módulos envolvidos e uma segunda parte de implementação prática.

O motor de indução, é um dos principais mecanismos de accionamento na actualidade. Pela sua robustez, fiabilidade e reduzida manutenção, possibilita um sem número de aplicações comerciais e industriais com maior rentabilidade. Por outro lado, este motor tem dois grandes inconvenientes que são as elevadas correntes de arranque e também um controlo da velocidade mais exigente.

Conclui-se que, com os métodos tradicionais de arranque conseguimos de alguma forma colmatar o inconveniente da corrente de arranque elevada. No entanto, no arranque estrela-triângulo pelo facto do motor estar constantemente sujeito a arcos eléctricos danificamos os enrolamentos e fragilizamos o conjunto do accionamento. No arranque com resistências ou com o autotransformador eliminamos os arcos eléctricos (efeitos transitórios), no entanto, são equipamentos caros e o primeiro tem perdas por efeito de joule elevadas o que afecta o rendimento global do sistema.

O arranque electrónico através do soft-starter e do inversor de frequência permitiu além da redução da corrente de arranque do motor, uma maior eficiência energética, um arranque suave e ainda, um melhor controlo do binário de arranque. Considera-se ainda que, o inversor de frequência ao permitir o controlo da frequência aplicada ao motor, facilita de forma relativamente simples, realizar o controlo de velocidade do motor de indução.

A utilização do autómato vem mesclar diversos assuntos relacionados com a automação. Desde logo, permite uma maior fiabilidade ao sistema de controlo do accionamento, proporcionando uma manutenção/modificação mais eficiente.

Considera-se este trabalho finalizado para todos os objectivos proposto no início, a saber, atingir um nível de conhecimentos na área da automação, permitindo uma pequena antevisão do que podemos encontrar na vida profissional, principalmente no que diz respeito ao controlo do arranque e velocidade do motor de indução trifásico.

7.2. RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Um trabalho da índole do que foi apresentado é necessariamente um sistema incompleto, que requer alterações que o melhorem e complementem. Apesar de se ter alcançado os objetivos propostos, existe a possibilidade de ampliar, por exemplo com o desenvolvimento de um sistema de supervisão do processo de arranque e do controlo de velocidade utilizando uma interface IHM ligada ao autómato. Este sistema de supervisão irá permitir ao utilizador final deste tipo de aplicações uma maior flexibilidade e simplicidade do processo de controlo, bem como, uma leitura em tempo real dos parâmetros de controlo.

Pode ainda ser desenvolvido a partir da utilização do soft-starter e do inversor de frequência, um estudo sobre os benefícios obtidos ao nível da redução do consumo de energia e da corrente de arranque do motor e comparar esses benefícios com os prejuízos causados à rede eléctrica devido ao aumento da taxa de distorção harmónica.

Finalmente sugiro a implementação prática num processo em concreto para que todo o trabalho desenvolvido genericamente, possa ser aplicado especificamente e assim otimizar ainda mais o processo de arranque e controlo de velocidade do motor de indução.

REFERÊNCIAS

[AGOSTINHO e MARTINS] P. D. N. Agostinho, S. V. Martins; *Controlo da Velocidade de um Motor Assíncrono*; Relatório de Introdução ao Projecto Electrotécnico Orientado pelo Professor Doutor Sílvio José Pinto Simões Mariano; UBI; 2008.

[ALMEIDA, FERREIRA e BOTH] A. Almeida, F. Ferreira, D. Both; *Technical and Economical Considerations to Improve the Penetration of Variable Speed Drives for Electric Motor Systems*; IEEE Transactions on Industry Applications; January/February 2005.

[ARAÚJO] J. A. B. Araújo; *Aplicação de Inversor de Frequência Para Economia de Energia Eléctrica em Sistemas de Irrigação por Aspersão*; Tese Doutorado UNESP; Botucatu; 2003.

[ARAÚJO] J. P. C. Araújo; *Projecto Eléctrico e Automação para Estações Elevatórias*; Trabalho final de estágio curricular supervisionado da EPP; Recife; 2006.

[BORGES] F. Borges; *Redes de Comunicação Industrial - Documento Técnico nº2*; Centro de Formação da Schneider Electric Portugal; Setembro 2007

[CABRITA] C. M. P. Cabrita; *Electrónica de Potência II*; Edição de autor; Departamento de Engenharia Electromecânica UBI; Covilhã; 1997.

[CABRITA] C. M. P. Cabrita; *Motores Eléctricos Industriais*; Edição do autor; Secção de Máquinas Eléctricas e Electrónica de Potência I.S.T; 1992.

[CAMARGO e REZEK] R. Camargo, A. J. J. Rezek; *Desempenho de Motores de Indução Trifásicos Alimentados por Inversores de Frequência*; INDUSCON – VIII Conferência Internacional de Aplicações Industriais; Poços de Caldas; 2008

[CAMPELLO] S. R. B. B. Campello; *Automação Industrial e Projectos Lógicos com PLC*; Apontamento de treino em automação e controladores da Schneider Electric; 2005.

[CHAPMAN] S. J. Chapman; *Electric Machinery Fundamentals*; McGraw-Hill; New York; 2003.

- [FRANCHI e CAMARGO] C. M. Franchi, V. A. Camargo; *Controladores Lógicos Programáveis – Sistemas Discretos*; Editora Érica 2ª Edição; 1994.
- [FRANCISCO] A. Francisco; *Autômatos Programáveis*; Editora Etep 4ª Edição; 2007.
- [GEORGINI], M. Georgini; *Automação aplicada - Descrição e Implementação de sistemas sequenciais com PLC's*; Editora Erica 8ª Edição; 2004.
- [HARNEFORS] L. Harnefors; *Design and Analysis of General Rotor Flux Oriented Control Systems*; IEEE Transactions on Industrial Electronics; Vol 48; No. 2; Junho 2001.
- [LEROY] Catálogo técnico; *Motores assíncronos trifásicos blindados de rotor em curto-circuito ou de rotor bobinado*; Disponível em http://www.leroy-somer.com/documentation_pdf/notices_pdf/2365a_Mot_tri_pt.pdf. Acesso em Janeiro de 2009.
- [MARTINS] G. M. Martins; *Aperfeiçoamento de uma partida soft-starter com a utilização de um supervisor*; Tópicos Avançados em Automação Industrial da UFSM; Santa Maria; 2008.
- [MARTINS] G. M. Martins; *Princípios de Automação Industrial*; Departamento de Electromecânica e Sistemas de Potência da UFSM; Março de 2009.
- [MELO e ROSA] A. Melo, A. Rosa; *Simulação de um Soft-Starter para Accionamento de Motores de Indução*; Tese da UFG; Goiânia; 2003.
- [MENDES] A. M. S. Mendes; *Análise do Desempenho do Motor de Indução Trifásico Quando Alimentado Através de um Inversor de Fonte de Tensão com Tolerância a Falhas*; Tese de Doutorado da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra – FCTUC; Coimbra; 2005.
- [MICHEL e DUNCAN] G. Michel, F. Duncan; *Programmable Logic Controllers*; Editora John Wiley & Sons Inc; 1990.
- [MORAES e CASTRUCCI] C. C. Moraes, P. Castrucci; *Engenharia de Automação Industrial*; Editora LTC - Livros Técnicos e Científicos 2ª Edição; 2007.
- [NAHVI e EDMINISTER] M. Nahvi, J. A. Edminister; *Electric Circuits*; Fourth Editions - McGraw Hill; USA; 2003.
- [OLIVEIRA] N. J. Oliveira; *Guia do comprador de soft-starters*; Revista Electricidade Moderna; São Paulo; 2000.
- [OTTOBONI] A. A. Ottoboni; *Evolução do controlo de velocidade*; Revista Saber Electrónica; São Paulo; 2002.

- [PIRES] W. L. Pires; *Guia Técnico - Motores de Indução Alimentados por Conversores de Frequência PWM*; Departamento de pesquisa e desenvolvimento do produto Weg equipamentos eléctricos S.A. – Divisão Motores; Setembro 2006.
- [PROCEL] Procel Indústria / Eletrobrás; *Accionamento Eléctrico – Guia Avançado*; Disponível em <http://www.eletrabras.gov.br/elb/procel>. Acesso em Janeiro de 2009.
- [RASHID] M. H. Rashid; *Power Electronics Circuits, Devices and Applications*; Prentice Hall International; New Jersey; Estados Unidos; 1998.
- [RODRIGUES e JÚNIOR] W. Rodrigues, E. L. Júnior; *Inversor de Frequência em Sistemas de Bombeamento*; UNICAMP; Campinas; 2002.
- [SANTOS] A.H.M. Santos; *Conservação de energia: eficiência energética de instalações e equipamentos*; Itajubá: Ed. da EFEI 3ª edição; 2006.
- [SCHNEIDER] Programa de formação técnica continuada; *Accionamentos Eléctricos*, Schneider Electric. Disponível em www.vertengenharia.com.br/arquivos/acionamentoseltricos.pdf . Acesso em Janeiro de 2009.
- [SCHNEIDER] Workshop de Instalações Eléctricas de Baixa Potência; *Eficiência Energética e Accionamento de Motores*; Schneider Electric. Disponível em www.schneider-electric.com.br/modulos/downloads1. Acesso em Dezembro de 2008.
- [SOUSA] G. T. Sousa; *Controlo e Automação Industrial*; ETE - Pedro Ferreira Alves; Julho 2004.
- [TELEMECANIQUE] Datasheets Altistart 01; *Conversores de Partida e Parada Progressivas*; Telemecanique. Disponível em www.schneider-electric.com.br/telemecanique/data_sheets/fiche.htm?id=motor_ats01. Acesso em Setembro 2008.
- [TWIDO] Manual de Software TWIDO; *Getting Started TwidoSuite V2.1*. Disponível em <http://www.schneider-electric.com>. Acesso em Abril 2009.
- [VIANNA] W. S. Vianna; *Controlador Lógico Programável*; Instituto Federal Fluminense; Abril 2008.
- [WEG] Catálogo técnico; *Motores Eléctricos – linhas de produto, características, especificação, instalações e manutenções*. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/artigos>. Acesso em Dezembro de 2008.
- [WEG] Catálogo técnico; *Motores Eléctricos Assíncronos de Alta Tensão*. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/artigos>. Acesso em Janeiro de 2009.
- [WEG1] Manual de aplicação; *Guia de Aplicação de Inversores de Frequência*. Disponível em <http://catalogo.weg.com.br/files/artigos>. Acesso em Fevereiro de 2009.

ANEXOS

9.1 ANEXO A

Manual de operação

Altivar 11

Inversores de frequência
para motores assíncronos

ATV 11^{*****A}

Merlin Gerin
Modicon
Square D
Telemecanique



Schneider
 **Electric**

Referências dos inversores



ATV 11HU18M2A



ATV 11PU18M2A



ATV 11HU41M2A



ATV 11HU41M3A

Inversores com dissipador (gama de frequência de 0 a 200 Hz)

Motor		Rede		Altivar 11			Referência	Peso
Potência indicada na placa		Corrente de linha máx. (1)	Corrente de saída permanente (2)	Corrente transitória máx. (3)	Potência dissipada c/ carga nominal			
kW	HP	A	A	A	W		kg	
Tensão de alimentação monofásica: 100...120 V 50/60 Hz (4)								
0,18	0,25	6	1,4	2,1	14	ATV 11HU05F1A	0,900	
0,37	0,5	9	2,4	3,6	25	ATV 11HU09F1A	1,000	
0,75	1	18	4	6	40	ATV 11HU18F1A (5)	1,800	
Tensão de alimentação monofásica: 200...240 V 50/60 Hz (4)								
0,18	0,25	3,3	1,4	2,1	14	ATV 11HU05M2A	0,900	
0,37	0,5	6	2,4	3,6	25	ATV 11HU09M2A	1,000	
0,75	1	9,9	4	6	40	ATV 11HU18M2A	1,100	
1,5	2	17,1	7,5	11,2	78	ATV 11HU29M2A (5)	1,800	
2,2	3	24,1	10	15	97	ATV 11HU41M2A (5)	1,800	
Tensão de alimentação trifásica: 200...230 V 50/60 Hz								
0,18	0,25	1,8	1,4	2,1	13,5	ATV 11HU05M3A	0,900	
0,37	0,5	3,6	2,4	3,6	24	ATV 11HU09M3A	1,000	
0,75	1	6,3	4	6	38	ATV 11HU18M3A	1,100	
1,5	2	11	7,5	11,2	75	ATV 11HU29M3A (5)	1,800	
2,2	3	15,2	10	15	94	ATV 11HU41M3A (5)	1,800	

Inversores sobre base (gama de frequência de 0 a 200 Hz)

Motor		Rede		Altivar 11			Referência	Peso
Potência indicada na placa		Corrente de linha máx. (1)	Corrente de saída permanente (2)	Corrente transitória máx. (3)	Potência dissipada c/ carga nominal			
kW	HP	A	A	A	W		kg	
Tensão de alimentação monofásica: 100...120 V 50/60 Hz (4)								
0,37	0,5	9	2,4	3,6	25	ATV 11PU09F1A	0,900	
Tensão de alimentação monofásica: 200...240 V 50/60 Hz (4)								
0,37	0,5	6	2,4	3,6	25	ATV 11PU09M2A	0,900	
0,75	1	9,9	4	6	40	ATV 11PU18M2A	0,900	
Tensão de alimentação trifásica: 200...230 V 50/60 Hz								
0,37	0,5	3,6	2,4	3,6	24	ATV 11PU09M3A	0,900	
0,75	1	6,3	4	6	38	ATV 11PU18M3A	0,900	

(1) O valor da corrente de linha é dado para as condições de medição indicadas na tabela abaixo.

Calibre do Inversor	Icc presumida	Tensão de linha
ATV 11●UF1A	1 kA	100 V
ATV 11●UM2A	1 kA	200 V
ATV 11●UM3A	5 kA	200 V

(2) O valor da corrente é dado por uma frequência de chaveamento de 4 kHz.

(3) Para 60 segundos.

(4) Saída trifásica para o motor. Para o ATV 11●U●●F1A, a tensão máxima de saída é igual ao dobro da tensão de alimentação.

(5) Com ventilador integrado.

As etapas da colocação em funcionamento

1 - Fixar o inversor

2 - Conectar ao inversor:

- a rede de alimentação, assegurando-se de que esteja:
 - na faixa de tensão do inversor
 - desenergizada
- o motor, assegurando-se de que seu fechamento corresponda à tensão da rede
- eventualmente, as velocidades pré-selecionadas pelas entradas lógicas LI3 e LI4

3 - Energizar sem comandar a partida

4 - Configurar:

- a frequência nominal (bFr) do motor, se for diferente de 50 Hz (somente aparece na primeira energização).
- os parâmetros ACC (Aceleração) e dEC (Desaceleração).
- os parâmetros LSP (Velocidade mínima com referência nula) e HSP (Velocidade máxima com referência máxima).
- o parâmetro lTH (Proteção térmica do motor).
- eventualmente, as velocidades pré-selecionadas SP2-SP3-SP4.

5 - Configurar no menu drC:

Os parâmetros dos motores, somente se a configuração de fábrica do Inversor não for conveniente.

6 - Dar partida

Configuração de fábrica

O Ativar 11 é configurado em fábrica para as condições de emprego mais comuns:

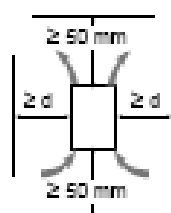
- Comando local pelos botões do inversor (RUN / STOP, potenciômetro de referência de velocidade).
- Entradas lógicas:
 - LI1, LI2: não configuradas.
 - LI3, LI4: 4 velocidades pré-selecionadas (velocidade 1 = referência de velocidade ou LSP, velocidade 2 = 10 Hz, velocidade 3 = 25 Hz, velocidade 4 = 50 Hz).
- Entrada analógica AI1: não ativa.
- Relé R1: o contato abre-se em caso de falha (ou inversor desenergizado)
- Saída DO: saída analógica, imagem da frequência do motor.

Se a configuração de fábrica não for conveniente, o menu FUn permite modificar as funções e as configurações das entradas / saídas.

Dimensões

	ATV 11H	a	b	c	G	H	Ø
		mm	mm	mm	mm	mm	mm
	U05●●A	72	142	108	60±1	131±1	2 x 4
	U09●●A	72	142	132	60±1	131±1	2 x 4
	U18M●A	72	147	145	60±1	131±1	2 x 4
	U18F1A U23●●A U41●●A	117	142	163	106±1	131±1	4 x 4
	ATV 11P	a	b	c	G	H	Ø
		mm	mm	mm	mm	mm	mm
	todos os calibres	72	142	108	60±1	131±1	2 x 4

Condições de montagem e de temperaturas



Instalar o inversor verticalmente, a $\pm 10^\circ$.

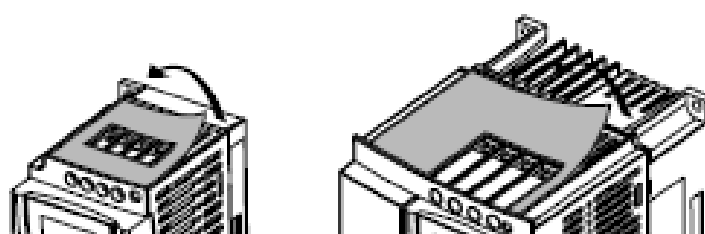
Evitar colocá-lo próximo a elementos geradores de calor.

Respeitar um espaço livre suficiente para garantir a circulação do ar necessário para o resfriamento, que se faz por ventilação de baixo para cima.

Espaço livre na frente do aparelho: no mínimo 10 mm.

Quando o grau de proteção IP20 for suficiente, é recomendado retirar a tampa de proteção colada na parte superior do inversor, como indicado abaixo.

- de -10°C a 40°C :
 - d ≥ 50 mm: sem precaução especial.
 - d = 0 (inversores lado a lado): retirar o fechamento de proteção colado na parte superior do inversor, como indicado adiante (o grau de proteção torna-se IP20).
- de 40°C a 50°C :
 - d ≥ 50 mm: retirar o fechamento de proteção colado na parte superior do inversor, como indicado adiante (o grau de proteção torna-se IP20).
- de 50°C a 60°C :
 - d ≥ 50 mm: retirar o fechamento de proteção colado na parte superior do inversor, como indicado adiante (o grau de proteção torna-se IP20), e desclassificar a corrente nominal do inversor de 2,2% por $^\circ\text{C}$ acima de 50°C .



Montagem dos inversores sobre base

Os Inversores ATV 11F.....A podem ser montados sobre (ou dentro de) uma estrutura de máquina em aço ou em alumínio, respeitando as seguintes condições:

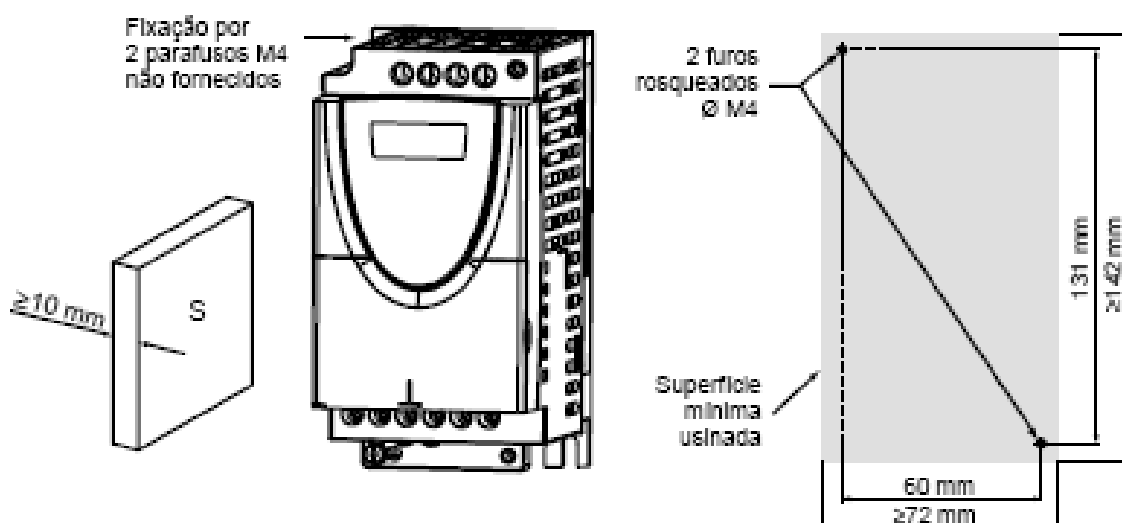
temperatura ambiente máxima: 40°C ,

montagem vertical a $\pm 10^\circ$,

o inversor deve ser montado no centro de um suporte (estrutura da máquina) com espessura mínima de 10 mm e área de resfriamento quadrada (S) mínima de $0,12\text{ m}^2$ para aço e $0,09\text{ m}^2$ para alumínio, exposta ao ar livre, área de apoio do inversor (min. 142×72) usinada na estrutura da máquina, com uma irregularidade máxima de $100\ \mu\text{m}$ e uma rugosidade máxima de $3,2\ \mu\text{m}$,

desbastar levemente os furos rosqueados para eliminar as arestas,

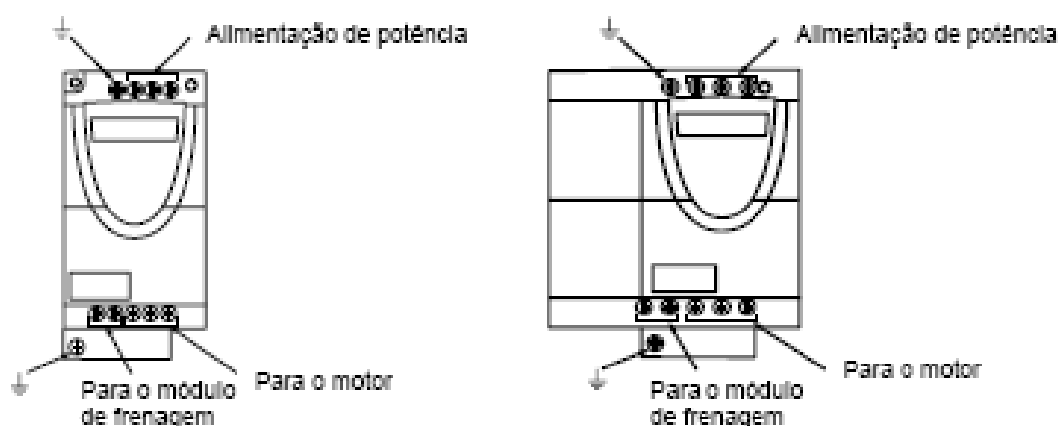
utilizar graxa de contato térmico (ou equivalente) em toda a superfície de apoio do inversor.



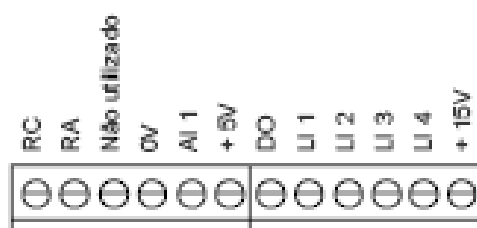
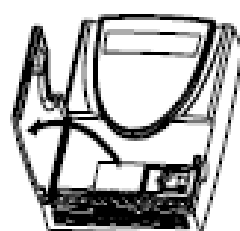
Verificar o estado térmico do inversor com o parâmetro tHd (menu SUP), para validar a eficácia da montagem.

Bornes de potência

Aliviar ATV 11●	Capacidade máxima de conexão		Torque de aperto em Nm
	AWG	mm ²	
U05●●A, U09●●A, U18M●A	AWG 14	1,5	0,75
U18F1A, U29●●A, U41●●A	AWG 10	4	1



Disposição, características e funções dos bornes de controle



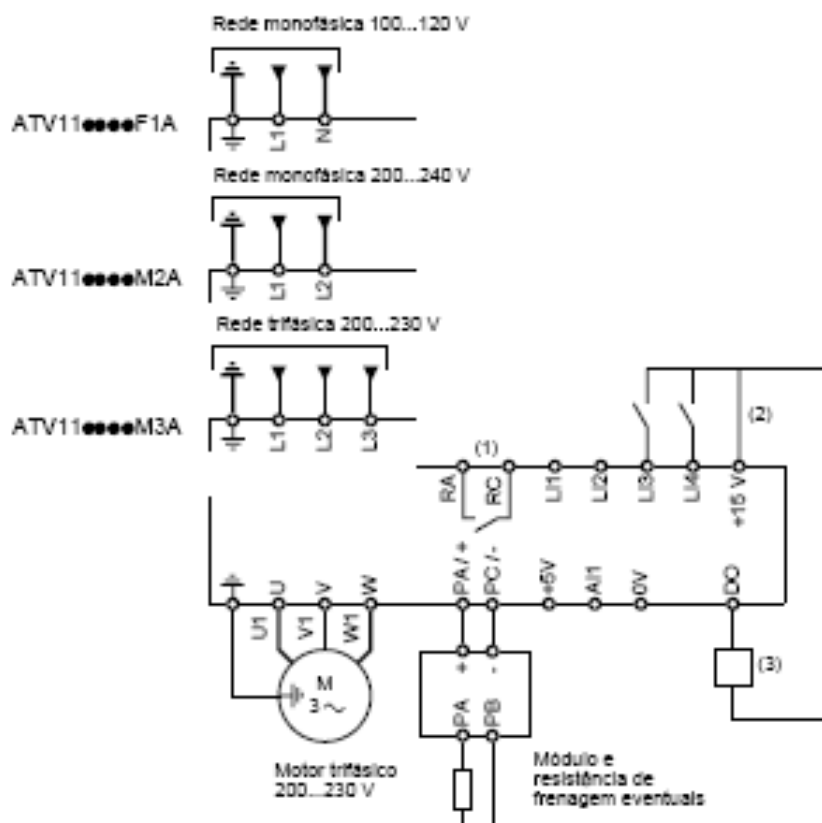
- Capacidade de conexão máx.: 1,5 mm² - AWG 16
- Torque de aperto máx.: 0,5 Nm.

Borne	Função	Características elétricas
RC RA	Contato do relé de falha (aberto no caso de falha ou desenergização)	Capacidade de comutação mínima: 10 mA para 24 V \dots Capacidade de comutação máxima: • 2 A para 250 V \sim e 30 V \dots com carga indutiva ($\cos \varphi = 0,4 - L/R = 7 \text{ ms}$) • 5 A para 250 V \sim e 30 V \dots com carga resistiva ($\cos \varphi = 1 - L/R = 0$)
0V	Comum das entradas/saídas	0 V
AI1	Entrada analógica em tensão ou em corrente	Entrada analógica 0 + 5V ou 0 + 10 V: Impedância 40 k Ω , 30 V máx. Entrada analógica 0 - 20mA ou 4 - 20mA: Impedância 250 Ω (sem adição de resistência).
+5V	Alimentação para potenciômetro de referência 2,2 a 10 k Ω	• precisão: - 0 + 5 % • capacidade máx. disponível: 10 mA
DO	Saída configurável analógica ou lógica	Saída analógica a coletor aberto tipo PWM a 2 kHz: • tensão 30 V máx., impedância 1 k Ω , 10 mA máx. Saída lógica a coletor aberto: • tensão 30 V máx., impedância 100 Ω , 50 mA máx.
LI1 LI2 LI3 LI4	Entradas lógicas programáveis	• Alimentação + 15 V (máx. 30 V), impedância 5 k Ω • estado 0 se < 5 V, estado 1 se > 11 V em lógica positiva • estado 1 se < 5 V, estado 0 se > 11 V ou desenergizado (não ligado) em lógica negativa
+ 15V	Alimentação das entradas lógicas	+ 15 V \pm 15% protegido contra curtos-circuitos e sobrecargas. Capacidade máx. disponível cliente 100 mA

Esquema de ligação para pré-regulagem de fábrica



- bornes da rede na parte superior, bornes do motor na parte inferior
- ligar os bornes de potência antes dos bornes de controle



(1) Contato do relé de falha, para sinalizar a distância o estado do Inversor.

(2) + 15 V interno. No caso de utilização de uma fonte externa (+ 24 V máx.), ligar o 0 V deste ao borne 0V, e não utilizar o borne + 15 V do Inversor.

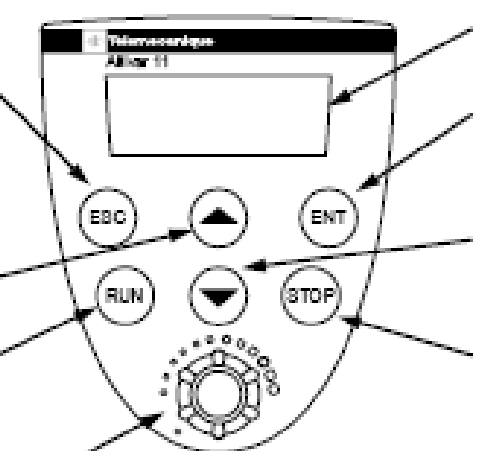
(3) Galvanômetro ou relé de nível baixo.

Nota: Equipar com antiparasitas todos os circuitos Indutivos próximos do Inversor ou acoplados no mesmo circuito (relés, contatores, eletroválvulas...)

Escolha dos componentes associados:

Ver o catálogo Altivar 11.

Funções do display e das teclas

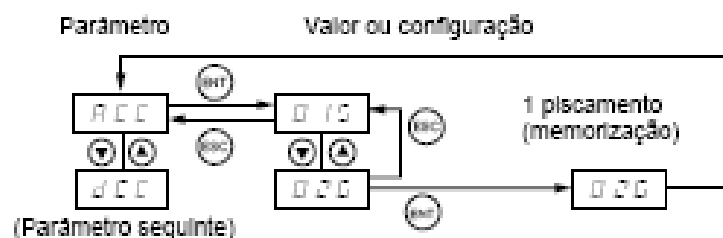
- 
- Sai de um menu ou de um parâmetro, ou abandona o valor escolhido para voltar ao valor anterior na memória
 - Entra num menu ou num parâmetro, ou registra o parâmetro ou o valor escolhido
 - Passa para o menu ou o parâmetro anterior, ou aumenta o valor escolhido
 - Passa para o menu ou parâmetro seguinte, ou diminui o valor escolhido
 - Botão RUN: comanda a energização do motor no sentido avanço, se o parâmetro tCC do menu FUn estiver configurado em LOC
 - Botão STOP: pode sempre comandar a parada do motor.
 - Se tCC (menu FUn) não estiver configurado em LOC, a parada será por inércia.
 - Se tCC (menu FUn) estiver configurado em LOC, a parada será por rampa, mas se a frenagem por injeção estiver em curso, esta será então por inércia.
 - Potenciômetro de referência, ativo se o parâmetro LSr do menu FUn estiver configurado em LOC



Pressionar ou não memoriza a escolha.

Memorização da escolha visualizada:

Exemplo:



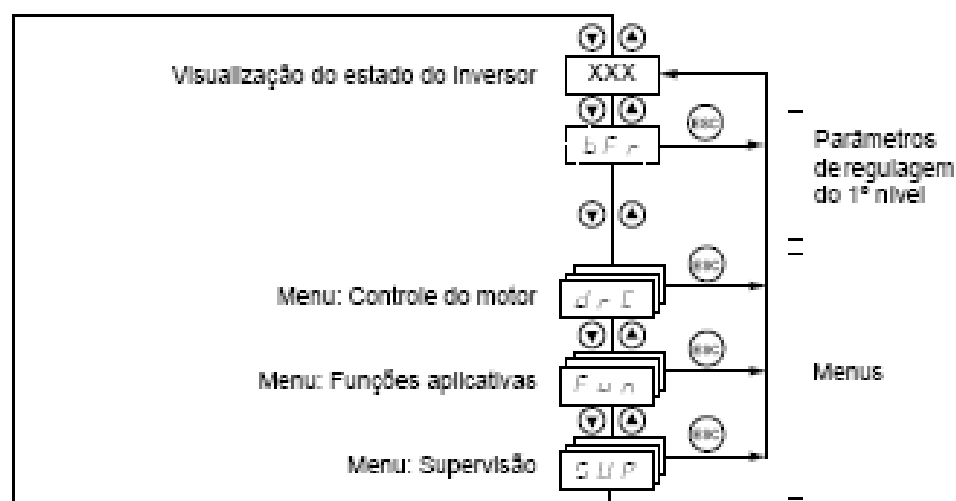
A memorização é acompanhada de piscamento do valor escolhido.

Visualização normal sem falha e sem comando de partida:

- rdY: Inversor pronto.
- 43.0: Visualização do parâmetro selecionado no menu SUP (de fábrica: referência de frequência).
- dcb: Frenagem por injeção de corrente contínua em curso.
- nSt: Parada por inércia.

No caso de falha, este será visualizado piscante.

Parâmetros de regulagem de 1º nível



Os parâmetros que não estão cinza somente são modificáveis na parada, com o Inversor travado.

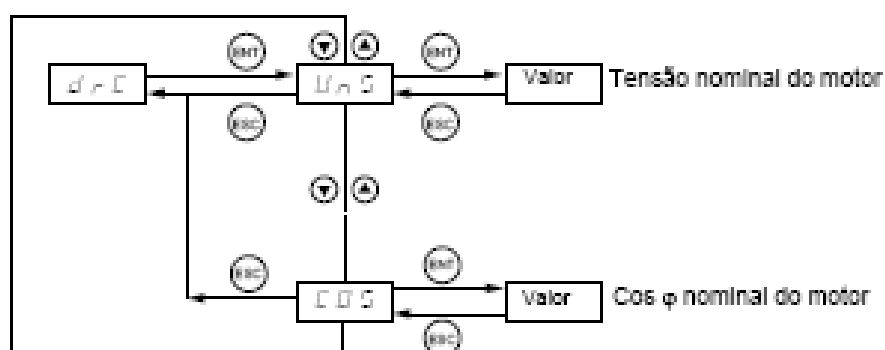
Os parâmetros em cinza são modificáveis na partida e na parada.

Código	Descrição	Faixa de regulagem	Regulagem de fábrica
bFr	Frequência do motor	50 Hz ou 60 Hz	50
Este parâmetro somente é visível aqui na primeira energização. Ele permanece sempre modificável no menu FUn.			
drC	Tempo da rampa de aceleração	0,1 s a 99,9 s	3
Definido para ir de 0 Hz a frequência nominal do motor FrS (parâmetro do menu drC).			
drD	Tempo da rampa de desaceleração	0,1 s a 99,9 s	3
Definido para ir da frequência nominal do motor FrS (parâmetro do menu drC) a 0 Hz.			
LSP	Velocidade mínima	0 Hz a HSP	0
Frequência do motor com referência 0.			
HSP	Velocidade máxima	LSP a 200 Hz	= bFr
Frequência do motor com referência máx. Assegurar-se que esta regulagem convém ao motor e às aplicações.			
ItH	Corrente térmica do motor	0 a 1,5 In (1)	Segundo o calibre do Inversor
Corrente utilizada para a proteção térmica do motor. Regular ItH com a corrente nominal lida na placa de identificação do motor.			
O estado térmico do motor não é memorizado na desenergização do Inversor.			
SPZ	2ª velocidade pré-selecionada (2)	0,0 a 200 Hz	10
SP3	3ª velocidade pré-selecionada (2)	0,0 a 200 Hz	25
SP4	4ª velocidade pré-selecionada (2)	0,0 a 200 Hz	50
RAE	Configuração da entrada analógica	5U, 10U, 0A, 4A	5U
- 5U: em tensão 0 - 5 volts (alimentação interna) - 10U: em tensão 0 - 10 volts (alimentação externa) - 0A: em corrente 0 - 20 mA - 4A: em corrente 4 - 20 mA			

(1) In = corrente nominal do Inversor

(2) As velocidades pré-selecionadas somente aparecem se a função correspondente continuar com a regulagem de fábrica ou se foram reconfiguradas no menu FUn.

Menu de controle do motor drC



Os parâmetros que não estão cinza somente são modificáveis na parada, com o inversor travado.

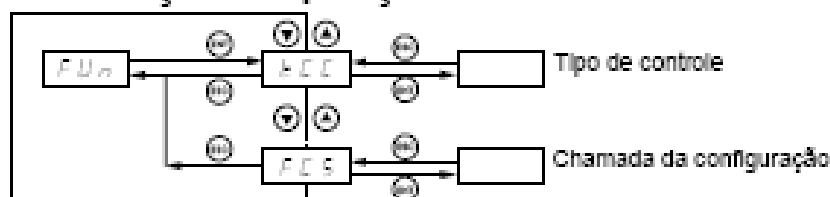
Os parâmetros em cinza são modificáveis na partida e na parada.

A otimização das performances de acionamento é obtida ao inserir os valores lidos na placa de identificação do motor.

Código	Descrição	Faixa de regulação	Pré-regulação de fábrica
U n S	Tensão nominal do motor lida na placa de identificação.	100 a 500 V	Segundo o calibre
F r S	Frequência nominal do motor lida na placa de identificação.	40 a 200 Hz	50 / 60Hz segundo bFr
S b R	Estabilidade da malha de frequência.	0 a 100% na parada 1 a 100% em marcha	20
	Valor muito alto: prolongamento do tempo de resposta. Valor muito baixo: ultrapassagem de velocidade, eventualmente uma instabilidade.		
F L G	Ganho da malha de frequência.	0 a 100% na parada 1 a 100% em marcha	20
	Valor muito alto: ultrapassagem de velocidade, instabilidade. Valor muito baixo: prolongamento do tempo de resposta.		
U F r	Compensação RI Permite otimizar o conjugado em baixíssima velocidade, ou adaptar-se a casos especiais (exemplo: para motores em paralelo, reduzir UFr).	0 a 200%	50
n I r	Corrente nominal do motor lida na placa de identificação.	0,25 a 1,5 In (1)	Segundo o calibre
I L I	Corrente de limitação	0,5 a 1,5 In (1)	1,5 In
n S L	Esco regamento nominal do motor	0 a 10,0 Hz	Segundo o calibre
	A calcular segundo a fórmula: nSL = parâmetro FrS x (1 - Nn/Ns) Nn = velocidade nominal do motor lida na placa de identificação Ns = velocidade de sincronismo do motor		
S L P	Compensação de esco regamento	0 a 150% (de nSL)	100
	Permite regular a compensação de esco regamento em torno do valor fixado pelo esco regamento nominal do motor nSL, ou adaptar-se a casos especiais (exemplo: para motores em paralelo, reduzir SLP).		
C O S	Cos φ nominal motor lido na placa de identificação	0,50 a 1,00	Segundo o calibre

(1) In = corrente nominal do inversor

Menu Funções de aplicações FUN





Os parâmetros que não estão cinza somente são modificáveis na parada, com o Inversor travado.



Os parâmetros em cinza são modificáveis na partida e na parada.

Código	Descrição	Pré-regulagem de fábrica
<p>R E L</p> <p>Tipo de controle 2C = comando a 2 fios 3C = comando a 3 fios L D C = comando local (RUN / STOP do Inversor)</p> <p>Comando a 2 fios: É o estado aberto ou fechado da entrada que comanda a partida ou a parada. Exemplo de ligação: </p> <p>LI1: avanço LIx: reverso</p> <p>Comando a 3 fios (Comando por pulsos): um pulso "avanço" ou "reverso" é suficiente para comandar a partida, um pulso "stop" é suficiente para comandar a parada. Exemplo de ligação: </p> <p>LI1: parada LI2: avanço LIx: reverso</p> <p> Para mudar a configuração de tCC, deve-se fazer uma pressão prolongada (por 2 s) da tecla "ENT", o que provoca o retorno às regulagens de fábrica das funções: rS, tCt, Atr, PS2 (LIA, LIB).</p>	<p>L E L</p> <p>Tipo de comando a 2 fios (parâmetro acessível somente se tCC = 2C): L E L : o estado 0 ou 1 é considerado para a partida ou a parada. L R S : uma mudança do estado (transição ou subida do sinal) é necessária para ativar a marcha, o que evita uma partida intempestiva após uma interrupção da alimentação. P F D : como LEL, mas a entrada de sentido "avanço" é sempre prioritária sobre a entrada de sentido "reverso".</p>	<p>LOC</p> <p>trn</p>
<p>P E S</p> <p>Sentido reverso n D : função inativa LI1 a LI4: escolha da entrada configurada no comando do sentido reverso Se tCC = LOC, este parâmetro é inacessível.</p>		<p>se tCC = 2C: LI2 se tCC = 3C: LI3</p>
<p>L I A</p> <p>Velocidades pré-selecionadas (ativas mesmo se tCC e Lsr = LOC) Se LIA e LIB = 0: velocidade = consigne Se LIA = 1 e LIB = 0: velocidade = SP2 Se LIA = 0 e LIB = 1: velocidade = SP3 Se LIA = 1 e LIB = 1: velocidade = SP4</p> <p>Configuração da entrada LIA - n D : função inativa - L I J a L I H : escolha da entrada configurada em LIA</p> <p>Configuração da entrada LIB - n D : função inativa - L I J a L I H : escolha da entrada configurada em LIB SP2 somente será acessível se LIA estiver configurada, SP3 e SP4, se LIA e LIB estiverem configuradas.</p>		<p>LI3, exceto se tCC = 3C: LI4 LI4, exceto se tCC = 3C: nD</p>
<p>SP2</p> <p>SP3</p> <p>SP4</p>	<p>2ª velocidade pré-selecionada, regulável de 0,0 a 200 Hz (1) 3ª velocidade pré-selecionada, regulável de 0,0 a 200 Hz (1) 4ª velocidade pré-selecionada, regulável de 0,0 a 200 Hz (1)</p>	<p>10 25 50</p>

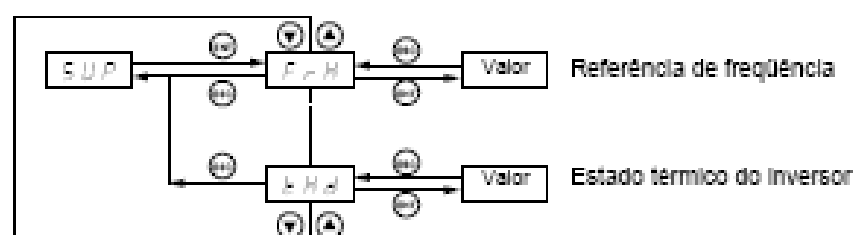
(1) As velocidades pré-selecionadas são acessíveis também nos parâmetros de regulagens do 1º nível.

Código	Descrição	Pré-regulagem de fábrica
S F	Rearme após falha - D : função Inativa - L J J a L J H : escolha da entrada configurada para esta função O rearme é feito numa transição da entrada (subida do sinal de 0 a 1), ele somente é permitido se a falha desapareceu.	nO
L J	Segunda rampa Configuração da entrada de comando da 2ª rampa - D : função Inativa - L J J a L J H : escolha da entrada configurada AC2 e dE2 somente são acessíveis se LI estiver configurada.	nO
A C 2	tempo da 2ª rampa de aceleração, regulável de 0,1 a 99,9 s	5,0
d E 2	tempo da 2ª rampa de desaceleração, regulável de 0,1 a 99,9 s	5,0
S E P	Parada controlada no corte da rede - D : travamento do Inversor e parada do motor por inércia - F S P : parada segundo a rampa válida (dEC ou dE2) - F S E : parada rápida, o tempo de parada depende da inércia e das possibilidades de frenagem do Inversor.	nO
M R	Adaptação da rampa de desaceleração - D : função Inativa - M R S : esta função aumenta automaticamente o tempo de desaceleração, se este foi regulado num valor muito baixo, considerando a inércia da carga, evitando assim a falha de sobretensão.	YES
A C t	Injeção de corrente contínua automática Modo de funcionamento - D : função Inativa - M R S : Injeção de corrente contínua na parada, de tempo regulável por tDC, quando não há mais comando de partida e se a velocidade do motor for nula. O valor desta corrente é ajustável por SdC. - C t : Injeção de corrente contínua permanente na parada, quando não há mais comando de partida e se a velocidade do motor for nula. O valor desta corrente é ajustável por SdC. Em comando a 3 fios, a Injeção somente é ativa com LI1 em 1. tDC somente é acessível se ACt = YES, SdC se ACt = YES ou Ct.	YES
t d C	Tempo de Injeção na parada, regulável de 0,1 a 30,0 s	0,5
S d C	Corrente de Injeção, regulável de 0 a 1,2 In (In = corrente nominal do Inversor)	0,7 In
S F t	Frequência de chaveamento Gama de frequência - L F r : frequência aleatória em torno de 2 ou 4 kHz segundo SFr - L F : frequência fixa 2 ou 4 kHz segundo SFr - H F : frequência fixa 8, 12 ou 16 kHz segundo SFr.	LF
S F r	Frequência de chaveamento: - 2 : 2 kHz (se ACt = LF ou LFr) - 4 : 4 kHz (se ACt = LF ou LFr) - 8 : 8 kHz (se ACt = HF) - 12 : 12 kHz (se ACt = HF) - 16 : 16 kHz (se ACt = HF) Quando SFr = 2 kHz, a frequência passa automaticamente a 4 kHz em velocidade elevada. Quando SFr = HF, a frequência seleccionada passa automaticamente à frequência inferior se o estado térmico do Inversor for muito elevado. Ela retoma automaticamente à frequência SFr quando o estado térmico permitir.	4 (se ACt = LF ou LFr) 12 (se ACt = HF)

Código	Descrição	Pré-regulagem de fábrica
F L r	<p>Religamento automático com retomada de velocidade Permite um religamento do motor sem trancos, se for mantido o comando de partida após os seguintes eventos:</p> <ul style="list-style-type: none"> - falta de rede ou simples desenergização, - rearme após falha ou religamento automático, - parada por inércia. <p>O motor parte da velocidade estimada no momento do religamento, depois segue a rampa até a referência. Esta função necessita da ativação do comando a 2 fios (ICC = 2C) com tCt = LEL ou PFO. - r D : função inativa - M E S : função ativa A função intervém a cada comando de partida, provocando um pequeno retardo (1 segundo máx). Se a frenagem por injeção automática foi configurada em contínua (Ct), esta função não pode ser ativada.</p>	nO
A D A E b F b d C b d	<p>Saída analógica / lógica DO Configuração</p> <ul style="list-style-type: none"> - r D : não configurada - D C r : saída analógica = corrente no motor. O pleno sinal corresponde a 200% da corrente nominal do Inversor. - r F r : saída analógica = frequência do motor. O pleno sinal corresponde a 100% de HSP. - F b A : saída lógica = nível de frequência atingido, fechada (estado 1) se a frequência do motor ultrapassar o nível regulável Ftd. - S r A : saída lógica = referência atingida, fechada (estado 1) se a frequência motor igualar a referência. - C b A : saída lógica = nível de corrente atingido, fechada (estado 1) se a corrente do motor ultrapassar o nível regulável Ctd. <p>Ftd somente é acessível se ACT = FbA, Ctd somente é acessível se ACT = CtA.</p> <p>nível de frequência, regulável de 0 a 200 Hz nível de corrente, regulável de 0 a 1,5 In (In = corrente nominal do Inversor)</p>	rFr = bFr In
A b r	<p>Religamento automático</p> <ul style="list-style-type: none"> - r D : função inativa - M E S : Religamento automático após travamento do Inversor por falha, se esta desapareceu e se as outras condições de funcionamento o permitirem. Este religamento efetua-se por uma série de tentativas automáticas separadas por tempos de espera crescentes: 1 s, 5 s, 10 s, depois 1 min para os seguintes. Se o religamento não for efetuado ao fim de 6 minutos, o procedimento é abandonado e o Inversor permanece travado até a desenergização e reenergização.. <p>As falhas que autorizam esta função são: OHF, OLF, ObF, OSF, PHF. O relé de falha do Inversor permanece energizado, se função estiver configurada. A referência de velocidade e o sentido de rotação devem ser mantidos. Esta função somente é acessível com comando a 2 fios (ICC = 2C) com tCt = LEL ou PFO.</p> <p> Assegurar-se que o religamento intempestivo não apresenta perigo a pessoas ou equipamentos.</p>	nO
L S r	<p>Modo referência de frequência</p> <ul style="list-style-type: none"> - L D C : a referência de velocidade é dada pelo potenciômetro na face frontal do Inversor. - b E r : a referência de velocidade é dada pela entrada analógica AI. <p> Para que sejam validadas LOC e tEr, deve-se fazer uma pressão prolongada (por 2 s) da tecla ENT.</p>	LOC

Código	Descrição	Pré-regulagem de fábrica
n P L	Escolha da lógica das entradas lógicas - P O S: as entradas são ativas (estado 1) com tensão superior ou igual a 11 V (borne + 15 V, por exemplo) e inativas (estado 0) na desenergização ou com tensão inferior a 5 V. - n E G: as entradas são ativas (estado 1) com tensão inferior a 5 V (borne 0V, por exemplo) e inativas (estado 0) com tensão superior ou igual a 11 V ou na desenergização.  Para que sejam validadas POS e nEG, deve-se fazer uma pressão prolongada (por 2 s) da tecla ENT.	POS
b F r	Frequência do motor (Retomada do parâmetro bFr de regulagem 1º nível) Regulagem a 50 Hz ou 60 Hz, a obter na placa de identificação do motor.	50
J P L	Configuração da falha perda de fase da rede Este parâmetro somente é acessível nos inversores trifásicos. - n D: eliminação da falha perda de fase da rede - M F S: ativação da supervisão da falha perda de fase da rede	YES
S C S	Memorização da configuração - n D: função Inativa - M F S: memoriza a configuração em curso na memória EEPROM. SCS passa automaticamente a nO desde que a memorização tenha sido efetuada. Esta função permite conservar uma configuração como reserva além da configuração em curso. Nos inversores saídos de fábrica, a configuração em curso e a configuração em memória são inicializadas na configuração de fábrica.	nO
F C S	Chamada da configuração - n D: função Inativa - r E C: a configuração em curso torna-se idêntica à configuração memorizada anteriormente por SCS. rEC somente é visível se uma memorização foi feita. FCS passa automaticamente a nO desde que esta ação tenha sido efetuada. - I n I: a configuração em curso torna-se idêntica à regulagem de fábrica. FCS passa automaticamente a nO desde que esta ação tenha sido efetuada.  Para que sejam validadas rEC e InI, deve-se fazer uma pressão prolongada (por 2 s) da tecla ENT.	nO

Menu supervisão SUP



Quando o inversor estiver em marcha, o valor visualizado corresponde ao valor de um dos parâmetros de supervisão. De fábrica, o valor visualizado é a referência do motor (parâmetro FrH).

Durante a visualização do valor do novo parâmetro de supervisão desejado, é necessário pressionar uma segunda vez a tecla "ENT" para validar a mudança de parâmetro de supervisão e memorizá-lo. Passa então a ser o valor deste parâmetro que será visualizado em marcha (mesmo após uma desenergização).

Se a nova escolha não for confirmada pressionando duas vezes "ENT", este retornará ao parâmetro anterior após a desenergização.

Os parâmetros seguintes são acessíveis, na parada ou em marcha.

Código	Parâmetro	Unid.
F r H	Visualização da referência de frequência (configuração de fábrica)	Hz
r F r	Visualização da frequência de saída aplicada ao motor	Hz
I L r	Visualização da corrente do motor	A

Código	Parâmetro	Unid.
U L m	Visualização da tensão da rede	V
t H r	Visualização do estado térmico do motor: 100% corresponde ao estado térmico nominal. Acima de 118%, o Inversor desliga com falha OLF (sobrecarga do motor). Ele é reativado abaixo de 100%.	%
t H n	Visualização do estado térmico do Inversor: 100% corresponde ao estado térmico nominal. Acima de 118%, o Inversor desliga com falha OHF (sobreaquecimento do Inversor). Ele é reativado abaixo de 80%.	%

Falhas - causas - soluções

Sem partida, sem visualização de falha

- Assegurar-se que a(s) entrada(s) de comando de marcha foram acionadas conforme o modo de controle escolhido.
- Numa energização ou em um rearme manual após as falhas ou após um comando de parada, o motor somente poderá ser alimentado após um prévio rearme dos comandos "avanço", "reverso". Com falha, o Inversor mostra "rdY" ou "nSt", mas não parte.

Falhas visualizadas

A causa da falha deve ser eliminada antes do rearme. As falhas SOF, OHF, OLF, OSF, ObF e PHF permitem rearme por uma entrada lógica se esta função foi configurada. As falhas OHF, OLF, OSF, ObF e PHF permitem rearme pela função religamento automático, se esta função foi configurada. Todas as falhas são rearmáveis na desenergização e reenergização.

Falha	Solução
D L F sobrecorrente	<ul style="list-style-type: none"> • Rampa muito curta, verificar as regulagens. • Inércia ou carga muito elevada, verificar o dimensionamento do motor / Inversor / carga. • Bloqueio mecânico, verificar o estado da mecânica.
S L F curto-circuito do motor, falha de Isolação	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar os cabos de ligação do Inversor ao motor, e a Isolação do motor.
I n F falha interna	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar as condições ambientais (compatibilidade eletromagnética). • Enviar o Inversor para uma Assistência Técnica Schneider.
L F F falha de configuração	<ul style="list-style-type: none"> • Fazer um retorno às regulagens de fábrica ou uma chamada da configuração em memorização, se estiver válida. Ver parâmetro FCS do menu FUn.
S D F sobrevelocidade	<ul style="list-style-type: none"> • Instabilidade, verificar os parâmetros do motor, ganho e estabilidade. • Carga traçante muito elevada, acrescentar um módulo e uma resistência de frenagem e verificar o dimensionamento do motor / Inversor / carga.
t H F sobrecarga do Inversor	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar a carga do motor, a ventilação do Inversor e as condições ambientais. Aguardar o resfriamento para dar nova partida.
t L F sobrecarga do motor	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar a regulagem da proteção térmica do motor e a carga do motor. Aguardar o resfriamento para dar nova partida.
t S F sobretensão	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar a tensão da rede.
t b F sobretensão em desaceleração	<ul style="list-style-type: none"> • Frenagem muito brusca ou carga traçante, aumentar o tempo de desaceleração, ou acrescentar uma resistência de frenagem, se necessário, ou ativar a função brA, se compatível com a aplicação.
P H F falha de fase da rede	<p>Esta proteção age somente em carga.</p> <ul style="list-style-type: none"> • Verificar a ligação de potência e os fusíveis. • Rearmar. • Verificar a compatibilidade rede / Inversor. • No caso de carga traçante, eliminar a falha por IPL = nO (menu FUn).
t S F subtensão	<ul style="list-style-type: none"> • Verificar a tensão e o parâmetro da tensão.
L r F circuito de carga	<ul style="list-style-type: none"> • Enviar o Inversor para uma Assistência Técnica Schneider.