

UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

Curso de Engenharia Elétrica

**MARCOS FERNANDO PRAXEDES**

**A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PARTIDA DOS  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS – MIT**

Itatiba  
2011

**MARCOS FERNANDO PRAXEDES – R.A. 002200800264**

**A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PARTIDA DOS  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS – MIT**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. D.r Geraldo Peres Caixeta

Itatiba  
2011

**MARCOS FERNANDO PRAXEDES**

**A EVOLUÇÃO DOS SISTEMAS DE PARTIDA DOS  
MOTORES ELÉTRICOS TRIFÁSICOS - MIT**

Monografia aprovada pelo Programa de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade São Francisco, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

**Data de aprovação:** \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_.

**Banca Examinadora:**

---

**Prof. D.r Geraldo Peres Caixeta (Orientador)**  
**Universidade São Francisco**

---

**Prof. André Renato Bakalereskis (Examinador)**  
**Universidade São Francisco**

---

**Elton Soares de Souza (Convidado Externo)**  
**Engenheiro Eletricista CREA 5062273797**

*Ao meu querido avô Anézio,  
que hoje me acompanha ao lado de Deus...*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade particular de realizar mais um grande sonho em minha vida. De ter consciência, capacidade e a oportunidade de dedicar meu tempo para que a idéia se tornasse realidade.

Agradeço imensamente aos meus pais João e Antônia, pessoas base de minha vida, que sempre estiveram unidos e próximos de mim, torcendo muito para que este sonho tornasse realidade. Incluo também, minha querida irmã Josi Mara, que por diversas vezes me proporcionou energias positivas para continuar caminhando e acreditando neste objetivo.

Ao meu querido avô Anézio, que tanto me ajudou com seus ensinamentos e sonhava tanto com este momento, porém, há alguns meses, está ao lado de Deus. Minha avó Maria, dona de um amor verdadeiro e grande amiga durante o início dos meus passos, rumo à minha formação profissional.

Agradeço a todos os professores da Universidade São Francisco, em especial ao professor Geraldo Peres Caixeta, meu orientador e exemplo de profissional, ao Coordenador da Engenharia Elétrica, professor Renato Franco de Camargo, ao meu primeiro professor do SENAI, Luis Antônio Ribeiro Froio, pela grande capacidade técnica e paciência para me ensinar os primeiros conceitos da profissão. Devo incluir também, o Prof. Ademir Sebastião de Almeida, que muito contribuiu para o início de minha carreira como instrutor do SENAI, onde desde o início de 2004, me dedico intensamente.

Ao Prof. Itamar Rodrigues Cruz, um exemplo de pessoa e que em 2007, confiou em minhas palavras, me proporcionando condições favoráveis para concluir esta graduação. Aqui incluo também, o professor Izidoro José de Matos, atual Diretor da escola SENAI onde trabalho, pela confiança depositada e companheiro de sempre, por fim, que muito me orgulha pelo seu idealismo. Os citados aqui sabem o motivo especial.

A Thiane, minha companheira, pela paciência e companhia de sempre, pelas diversas vezes em que me enriqueceu de idéias e de otimismo para atingir o objetivo, pela revisão do texto final e pela capacidade de me fazer feliz.

Finalmente, agradeço aos colegas de classe, em especial ao Adriano e o Cláudio, que sempre estiveram próximos durante todo o curso e também, a todos aqueles que me ajudaram na elaboração deste trabalho, direta ou indiretamente, com palavras, atitudes, apoio moral e tantos outros ideais de vida.

## RESUMO

A energia elétrica se faz cada vez mais importante e fundamental à sociedade moderna. Ela está presente em praticamente todos os trabalhos desenvolvidos no nosso dia-a-dia. Por isso, cada vez mais intensamente, engenheiros, técnicos, pesquisadores e demais profissionais da área se mostram preocupados e muito envolvidos em trabalhos que venham a contribuir com a melhor eficiência dos sistemas elétricos, tendo um objetivo em comum – Apresentar soluções para o uso racional e inteligente da energia elétrica em diversas áreas fins. Diante disso, este trabalho propõe como objetivo, além de apresentar o atual estado da técnica, relatar os avanços tecnológicos existentes para os métodos de acionamento dos motores elétricos de indução trifásicos, bem como suas vantagens e desvantagens. Ao final, são apresentados os relatos de 03 empresas que utilizam sistemas inteligentes e os principais pontos positivos advindos de suas implementações.

Palavras-chave: motor trifásico. acionamento. inversor de frequência.

## **ABSTRACT**

Electrical power is ever more important and fundamental to modern society. It is present in virtually all the work done in our day to day. Therefore, more and more intensely, engineers, technicians, researchers and other professionals express concern and very involved in work that will contribute to better efficiency of electrical systems, having one common goal – Provide solutions to the rational use and intelligent energy purposes in various areas. Therefore, this paper proposes as a goal: present the current state of the art, report on existing technological methods for operating the three-phase induction motors, as well as their advantages and disadvantages. At the end, we present the reports of 03 companies using intelligent systems and the main positive points arising from their implementation.

Key-words: three phase motor. drive. frequency inverter.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 01 – Motor Elétrico de Indução Trifásico em corte parcial.....	17
FIGURA 02 – Estator com ranhuras de ferro-silício.....	18
FIGURA 03 – Rotor em gaiola de esquilo.....	18
FIGURA 04 – Ranhuras inclinadas no rotor.....	19
FIGURA 05a – Conexão na rede elétrica trifásica.....	20
FIGURA 05b – Carcaça, pólos e rotor.....	20
FIGURA 05c – Onda trifásica.....	21
FIGURA 06 – Caminho da corrente elétrica em 1 ciclo.....	22
FIGURA 07 – Esquema simplificado de enrolamentos.....	25
FIGURA 08 – Formação de um pólo.....	25
FIGURA 09 – Formação de um par de pólos nas bobinas.....	26
FIGURA 10 – Conexões para formação de Pólos ativos.....	26
FIGURA 11 – Pólos consecuentes.....	27
FIGURA 12 – Exemplo de um motor de 6 terminais.....	28
FIGURA 13 – Exemplo de diagrama Multifilar.....	31
FIGURA 14 – Exemplo de diagrama Funcional.....	32
FIGURA 15 – Exemplo de diagrama de Execução.....	33
FIGURA 16 – Exemplos de identificação de componentes por letras e números.....	33
FIGURA 17 – Exemplos de identificação de função e posição de contatos.....	36
FIGURA 18 – Curva de Conjugado do motor.....	37
FIGURA 19 – Curva de Conjugado inversamente proporcional à RPM.....	38
FIGURA 20 – Curva de Conjugado constante em relação à RPM.....	38
FIGURA 21 – Curva de Conjugado proporcional em relação à rpm.....	39
FIGURA 22 – Comparação entre conjugados do motor e da carga.....	39
FIGURA 23 – Curva de Conjugado e Corrente para a Partida Direta.....	42
FIGURA 24 – Curva de conjugado resistente alto (Curva MR).....	45
FIGURA 25 – Curva de conjugado resistente menor (Curva MR).....	46
FIGURA 26 – Curva de conjugado e corrente para a partida Compensadora.....	48
FIGURA 27 – Diagramas de potência e comando para a partida direta.....	50
FIGURA 28 – Diagramas de potência e comando para a partida Estrela-Triângulo...	52
FIGURA 29 – Diagramas de potência e comando para a partida com auto-trafo.....	54
FIGURA 30 – Exemplo de Diagrama em blocos para a Soft-Starter SSW03.....	57
FIGURA 31 – Exemplo de Diagrama Funcional da Soft-Starter SSW03.....	58
FIGURA 32 – Exemplo de uma Soft-Starter modelo SSW03.....	59

FIGURA 33 – Elementos de controle em blocos de um Inversor de Frequência.....	60
FIGURA 34 – Diagrama de Potência para os sistemas de partida com Inversores de Frequência.....	61
FIGURA 35 – Diagrama de Comando para os sistemas de partida com Inversores de Frequência.....	62
FIGURA 36 – Exemplo de Conexão de potência para o Movidrive.....	63
FIGURA 37 – Exemplo de Conexão para comando do Movidrive.....	64
FIGURA 38 – Placa de expansão digital e analógica do Movidrive.....	66
FIGURA 39 – Cabo de comunicação entre drive e PC.....	66
FIGURA 40 – Cabo de comunicação entre drives tipo mestre-escravo.....	67
FIGURA 41 – Terminal de comunicação local - IHM.....	68
FIGURA 42 – Tela inicial do software dedicado.....	69
FIGURA 43 – Modelos de drives existentes atualmente.....	69
FIGURA 44 – Diagrama simplificado do Inversor de Frequência.....	71

## LISTA DE TABELAS

TABELA 01 – Velocidade síncrona de motores.....	23
TABELA 02 – Equivalências na identificação dos terminais dos MIT.....	29
TABELA 03 – Letras “Símbolos” para designar elementos do circuito.....	34
TABELA 04 – Prováveis soluções para redução de Harmônicos produzidos pelos conversores.....	74

## LISTA DE EQUAÇÕES

EQUAÇÃO 01 – Cálculo da rotação síncrona.....	22
EQUAÇÃO 02 – Cálculo do escorregamento percentual (E%).....	24
EQUAÇÃO 03 – Cálculo do conjugado.....	37
EQUAÇÃO 04 – Cálculo da rotação assíncrona.....	70
EQUAÇÃO 05 – Cálculo da tensão no link DC do inversor.....	71

## **LISTA DE ABREVIATURAS**

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

MIT – Motor de Indução Trifásico

NBR – Norma Brasileira Regulamentada

RPM – Rotações Por Minuto

IHM – Interface Homem Máquina

CLP – Controlador Lógico Programável

CA – Corrente Alternada

DC – Corrente Contínua

# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>14</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>15</b>
2.1 O SURGIMENTO.....	15
2.2 DEFINIÇÃO.....	16
2.3 MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO .....	16
2.3.1 Componentes do Motor .....	17
2.3.2 Princípio de Funcionamento .....	19
2.3.3 Principais Características .....	21
2.3.3.1 Rotação Síncrona .....	21
2.3.3.2 Rotação Assíncrona .....	23
2.3.3.3 Escorregamento .....	24
2.3.4 Identificação das Bobinas .....	24
2.3.4.1 Formação de um pólo .....	25
2.3.4.2 Polarização .....	26
2.3.4.3 Pólos ativos e conseqüentes .....	26
2.3.5 Conexões dos Enrolamentos .....	27
<b>3 SISTEMAS DE PARTIDA .....</b>	<b>30</b>
3.1 DIAGRAMAS ELÉTRICOS .....	30
3.2 DEFINIÇÕES IMPORTANTES .....	37
3.3 NORMALIZAÇÃO .....	40
3.3.1 Comparação entre Sistemas de Partida Convencionais.....	42
3.4 DIAGRAMAS DOS SISTEMAS CONVENCIONAIS.....	49
3.5 DIAGRAMAS DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS .....	55
3.5.1 Acionamento via chave Soft-Starter.....	56
3.5.2 Acionamento via Inversor de Frequência.....	59
3.5.3 Acionamento via Inversor de Frequência com CLP incorporado.....	62
3.5.4 Variação de velocidade de motores de indução.....	70
3.5.5 Modos de controle .....	71
3.6 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS.....	72
<b>4 METODOLOGIA .....</b>	<b>75</b>
<b>5 RESULTADOS.....</b>	<b>76</b>
5.1 CASO 01: Atividade Moveleira .....	76
5.2 CASO 02: Atividade Metalúrgica .....	77

5.3 CASO 03: Atividade Alimentícia .....	78
<b>6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>79</b>
<b>7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE.....</b>	<b>82</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>83</b>

# 1 INTRODUÇÃO

No Brasil, estima-se que aproximadamente 85% da energia elétrica gerada pelas centrais hidroelétricas, termoeleétricas, à gás e até pelas nucleares, seja consumida pelos motores elétricos instalados nas indústrias em geral, dentre eles, destacam-se os motores trifásicos movidos pelo princípio da Indução eletromagnética, que abrangem cerca de 90% das aplicações.

Baseada na grande fatia de consumo e visando estabelecer critérios padronizados para o acionamento dessas máquinas girantes, surgiram as diversas Normas Técnicas específicas para a área.

Diante disso, este trabalho mostrará a *Evolução dos Sistemas de Partida dos Motores Elétricos de Indução Trifásicos (MIT)*, por acreditar que a área está em constante avanço tecnológico e merece grande destaque dentre o sistema energético atual brasileiro.

O objetivo principal é apresentar, esclarecer e comparar os diversos métodos de acionamento e controle, não deixando para trás, os fundamentos e origens de cada etapa descoberta ao longo de décadas de pesquisa e desenvolvimento.

No decorrer deste trabalho, serão analisados os fatores positivos e negativos dos principais sistemas de partida aplicáveis aos MIT.

Ao final, serão apresentados os relatos de empresas que se preocuparam em agregar valores aos seus processos produtivos, por meio da automação eletroeletrônica, focando sistemas de partida inteligentes para os MIT.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O SURGIMENTO

No ano de 1866, o cientista alemão Werner Siemens inventou o primeiro gerador de corrente contínua auto-induzido, fato que é considerado o último estágio de um processo de estudos, pesquisas e invenções de muitos outros cientistas, por quase três séculos.

Os relatos iniciais citam que, por volta de 1600 o cientista inglês William Gilbert publicou uma obra com definições sobre a força de atração magnética. A primeira máquina eletrostática foi construída em 1663, por Otto Guericke e aperfeiçoada em 1774 pelo suíço Martin Planta. O professor italiano Aloísio Galvani percebeu em 1786, que ao tocar com o bisturi em coxas de rãs que estavam penduradas em uma grade de ferro, estas apresentavam uma contração, a qual chamou de “eletricidade animal”.

Outro italiano, Alessandro Volta, descobriu que entre dois metais diferentes e imersos em líquido condutor, surgia uma tensão elétrica. Em 1799 ele desenvolveu uma fonte de energia que chamou de “coluna de Volta” e esta tinha a capacidade de fornecer corrente elétrica. O físico dinamarquês Hans Christian Oersted verificou em 1820, que a agulha magnética de uma bússola era desviada de sua posição norte-sul quando passava perto de um condutor no qual circulava uma corrente elétrica. Essa observação foi o primeiro passo em direção ao desenvolvimento do motor elétrico.

O sapateiro inglês William Sturgeon, baseado na descoberta de Oersted, constatou em 1825, que um núcleo de ferro envolvido por um fio condutor elétrico se transformava num ímã quando se aplicava uma corrente elétrica. Estava inventado o eletroímã. O inglês Michael Faraday descobriu, em 1831, a indução eletromagnética. Em 1832 o cientista italiano S. Dal Negro construiu a primeira máquina de corrente alternada com movimento de vaivém. Em 1833 o inglês W. Ritchie inventou o comutador, construindo um pequeno motor elétrico em que o núcleo de ferro enrolado girava em torno de um ímã permanente. Para dar uma volta completa, a polaridade do eletroímã era alternada a cada meia volta, através do comutador.

Em 1838 o professor alemão Moritz Hermann Von Jacobi desenvolveu um motor elétrico e aplicou-o a uma lancha. A aplicação prática da energia elétrica em trabalho mecânico ficou assim comprovada. Entretanto, toda a energia provinha de baterias, que eram caras e de uso restrito. A preocupação voltou-se para a geração de energia elétrica de baixo custo.

Em 1856, o eletrotécnico Werner Siemens relatou o sucesso obtido na construção de um gerador de corrente, magnético, com induzido T duplo. Mas esse aparelho não podia

gerar energia suficiente para alimentar indústrias e aparelhos domésticos. Os imãs permanentes eram de aço restrita. Somente em 1866 Siemens construiu um gerador sem imã permanente, provando que a tensão necessária para o magnetismo poderia ser retirada do próprio enrolamento do rotor, isto é, que a máquina poderia auto-excitar-se.

O primeiro dínamo de Werner Siemens possuía uma potência de aproximadamente 30 watts e uma rotação de 1200 rpm. A máquina podia também funcionar como motor, desde que aplicasse aos seus bornes uma corrente contínua. Em 1879 a empresa Siemens & Halske apresentou a primeira locomotiva elétrica, com potência de 2 KW. Mas a máquina tinha alto custo e era vulnerável em serviço, exigindo o desenvolvimento de um motor mais barato, robusto e de menor custo de manutenção.

Em 1885 o engenheiro eletricista italiano Galileu Ferraris construiu um motor de corrente alternada de duas fases. Em 1887 o iugoslavo Nicola Tesla apresentou um pequeno protótipo de motor de indução bifásico com rotor em curto circuito. Em 1889 o engenheiro eletricista russo Michael Von Dolivo Dobrowolsky, da empresa AEG, de Berlim, persistindo na pesquisa do motor de corrente alternada, entrou com o pedido de patente de um motor trifásico com rotor de gaiola. Ele era simples, silencioso, tinha menos manutenção e alta segurança em operação.

Em 1891 Dobrowolsky iniciou a fabricação em série de motores assíncronos, nas potências de 0,4 a 7,5 KW e atualmente, estes dispositivos continuam sendo fabricados para as mais diversas aplicações que se pode imaginar nas indústrias em geral.

## 2.2 DEFINIÇÃO

É a máquina elétrica de corrente alternada, com rotor em curto-circuito, cuja *Rotação Por Minuto - RPM* depende da frequência da rede elétrica e do número de pólos do motor.

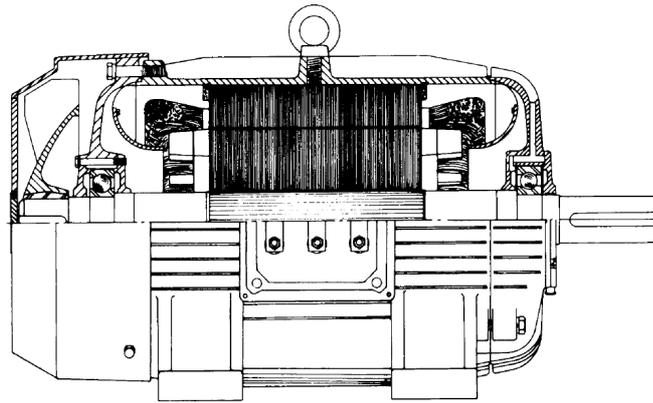
## 2.3 MOTOR ELÉTRICO DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Grande parte dos motores elétricos atualmente empregados na indústria é do tipo assíncrono e também podem ser chamados de *Motor de Indução Trifásico – MIT*.

O funcionamento desta máquina é muito eficiente e requer poucos cuidados na manutenção, pois possui sua construção física bem simplificada, vida útil longa, baixo custo e grande facilidade de manobra, sendo bastante empregado para a obtenção de força motriz em aparelhos domésticos e principalmente em maquinaria de indústrias em geral.

A principal vantagem do MIT em relação aos motores síncronos é o fato de possuírem a capacidade de partirem sozinhos, mesmo estando à plena carga, ou seja, não necessitam de equipamentos elétricos auxiliares para entrarem em funcionamento, partindo do momento de repouso e atingindo seu máximo de movimento rotativo, imediatamente após receberem tensão elétrica da fonte geradora em seus terminais elétricos.

A figura 01 apresenta um exemplo de motor de indução trifásico, em corte parcial.



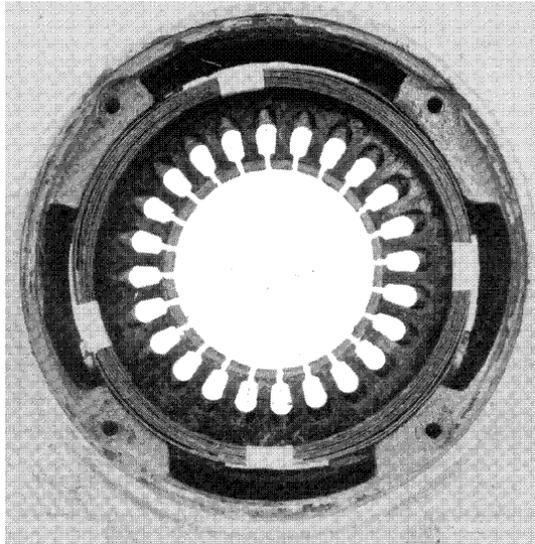
(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 01 - Motor Elétrico de Indução Trifásico em corte parcial

### 2.3.1 Componentes do Motor

Este equipamento é composto basicamente por duas partes, sendo conhecidas como fixa e móvel.

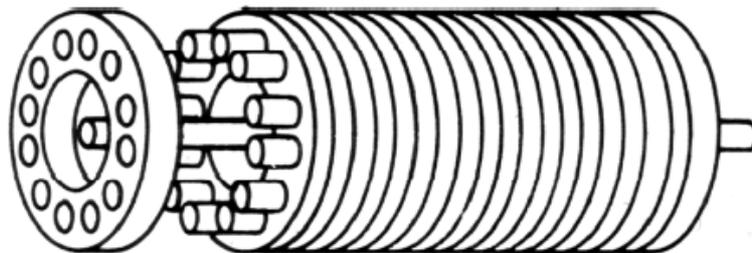
A FIGURA 02 apresenta a parte fixa que também é chamada de estator, compreendendo a carcaça e o núcleo. A carcaça é a parte externa do motor, feita de ferro fundido ou chapas de aço e serve para sustentar toda a máquina. O núcleo por sua vez, é constituído de chapas de ferro-silício em forma de pacote rígido e em seu interior há ranhuras longitudinais onde se alojam as bobinas.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 02 - Estator com ranhuras de ferro-silício

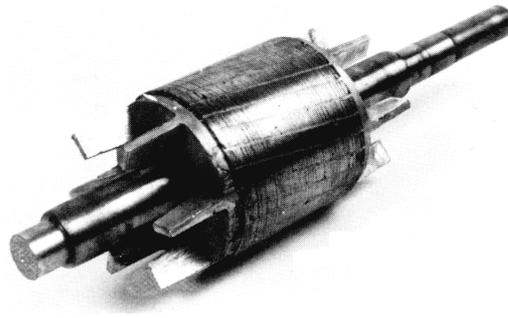
A parte móvel é constituída pelo induzido ou rotor e é composto de barras condutoras fechadas em curto-circuito por meio de anéis. Essas barras têm a forma de uma “gaiola de esquilo”, daí a origem do nome “*MOTOR ELÉTRICO COM ROTOR EM GAIOLA DE ESQUILO*”, como apresentado na figura 03.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 03 - Rotor em gaiola de esquilo

Quando se trata de motores pequenos, as barras condutoras e os anéis de curto-circuito são feitos de uma liga de alumínio que é fundida e injetada diretamente no rotor laminado. Alguns rotores apresentam ainda, as ranhuras inclinadas em relação ao eixo, como apresentado na FIGURA 04, visando a diminuição do ruído causado pelo corte das linhas magnéticas criadas pelo indutor.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 04 - Ranhuras inclinadas no rotor

### 2.3.2 Princípio de Funcionamento

Nas ranhuras do estator existem três enrolamentos, distintos um do outro, chamados fases do motor. Essas três fases são idênticas, porém, defasadas uma da outra de  $120^\circ$  elétricos<sup>1</sup> (FIGURA 05c) e produzem campos magnéticos girantes, que se combinam para formarem os pólos<sup>2</sup> do estator.

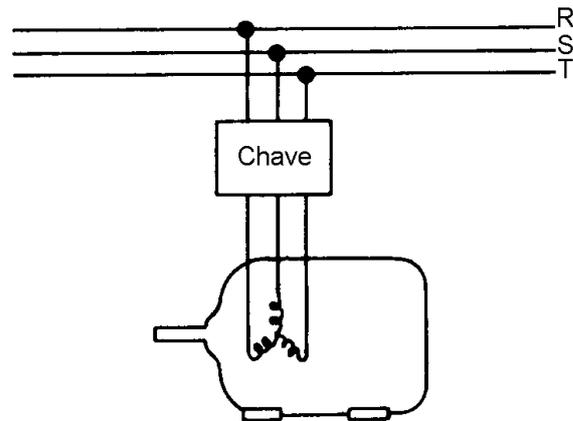
O rotor gira dentro de três enrolamentos constituídos por bobinas existentes no estator, que formam o campo magnético e são apresentados na figura 05a, b e c.

---

#### **Notas:**

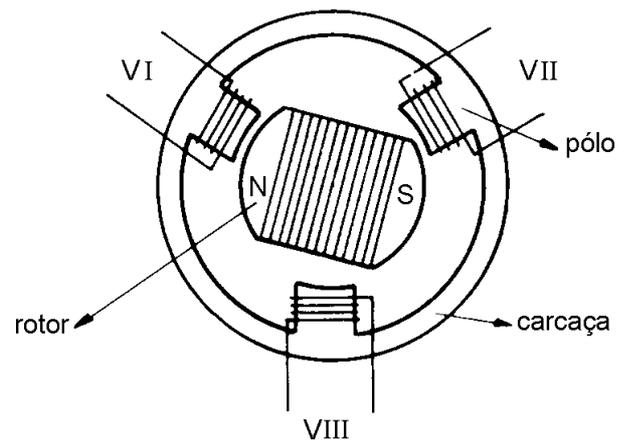
1.  $120^\circ$  elétricos: geralmente podem ser coincidentes com graus radianos. Para maiores esclarecimentos, consultar bibliografias específicas sobre Máquinas Elétricas Trifásicas.

2. pólos: Geralmente são formados pela própria bobina (ligação ativa), porém, há casos em que são formados parcialmente por interação de campos magnéticos existentes entre dois lados de bobinas diferentes (ligação conseqüente).



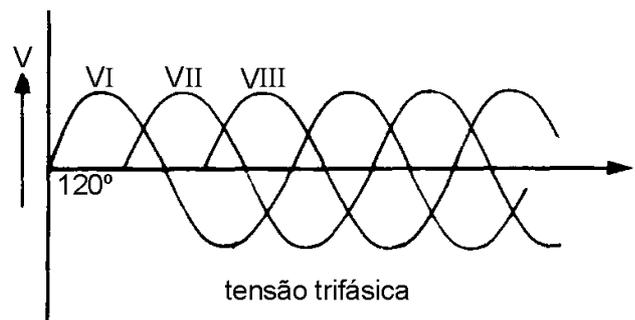
(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 05a - Conexão na rede elétrica trifásica



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 05b - Carcaça, pólos e rotor



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 05c - Onda trifásica

Ao analisar a FIGURA 05c, percebe-se que a tensão  $V$  atinge seu valor máximo na bobina  $V_I$ , depois na bobina  $V_{II}$  e finalmente na bobina  $V_{III}$ , de modo a gerar um campo magnético rotativo, pois as bobinas estão defasadas entre si em  $120^\circ$ . Vale lembrar que a corrente trifásica tem igual defasagem, ou seja,  $120^\circ$ .

### 2.3.3 Principais Características

O MIT é um dispositivo elétrico e como diversos outros, o mesmo possui diversas características específicas, que envolvem fatores elétricos, mecânicos e construtivos, porém, o foco principal deste trabalho é mostrar apenas uma breve definição das principais características, deixando em aberto os diversos caminhos para busca de informações mais detalhadas das informações complementares.

#### 2.3.3.1 Rotação Síncrona

A rotação síncrona é a velocidade teórica do campo magnético girante, que não considera as perdas como atrito, aquecimento e demais causas.

O campo magnético rotativo, gerado pelas bobinas  $V_I$ ,  $V_{II}$  e  $V_{III}$  no estator faz girar o rotor e este, por sua vez, cria fluxo magnético que gera por indução, uma *força eletromotriz*<sup>3</sup> no rotor.

---

**Nota:**

3. *força eletromotriz*: Originada pela interação dos campos eletromagnéticos produzidos em decorrência da existência de RPM no MIT.

O campo magnético do estator e o campo magnético do rotor tendem a se atrair e, como o campo magnético do estator é rotativo, o rotor procura acompanhar a rotação, que é uma função direta da frequência da rede elétrica e do número de pólos do motor. Portanto, a equação da rotação síncrona por minuto será:

$$N = \frac{60 \cdot F}{PP} \quad (01)$$

Onde:

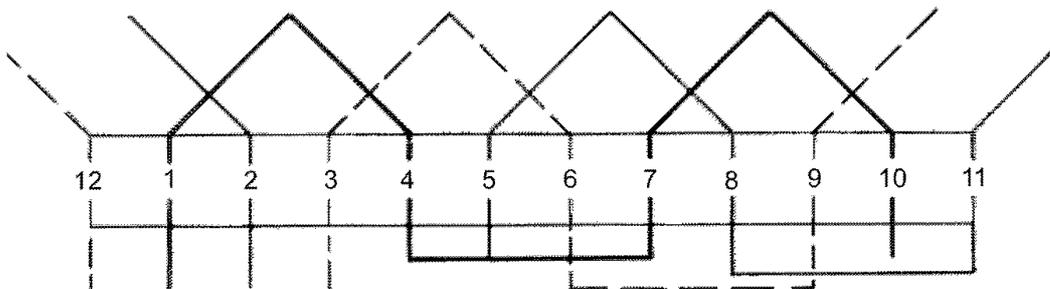
N = rpm

F = frequência em Hz

PP = pares de pólos

Se o motor tiver dois pólos, sendo um norte e um sul, o campo magnético completará uma volta para cada ciclo de frequência. Por outro lado, existindo 4 pólos, sendo dois pólos norte e dois sul, o campo magnético completará meia volta para cada ciclo de frequência.

Para cada ciclo de frequência, o campo magnético percorre um caminho que vai de um pólo norte até outro pólo norte, conforme a figura 06.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 06 - Caminho da corrente elétrica em 1 ciclo

Se o motor tiver dois pólos, denominados respectivamente de norte e sul, o campo magnético completará uma volta para cada ciclo de frequência. Por outro lado, se o motor tiver quatro pólos, sendo dois pólos norte e dois sul, o campo magnético completará meia volta para cada ciclo de frequência.

Para motor de dois pólos, o cálculo da rotação síncrona seria:

$$N = \frac{60 \cdot 60}{1} = 3600\text{rpm}$$

Para motor de dois pólos, o cálculo da rotação síncrona seria:

$$N = \frac{60 \cdot 60}{2} = 1800\text{rpm}$$

Percebe-se com isso, que o número de pólos influencia inversamente nas *Rotações por Minuto - RPM* do motor.

Para facilitar os trabalhos, foi desenvolvida uma tabela com as velocidades mais utilizadas em motores elétricos na indústria em geral, que é apresentada na TABELA 01.

TABELA 01 - *Velocidade síncrona de motores*

<b>Quantidade de pólos</b>	<b>rpm em 60Hz</b>	<b>rpm em 50Hz</b>
2	3600	3000
4	1800	1500
6	1200	1000
8	900	750
10	720	600

(fonte: obtida da equação 01)

### 2.3.3.2 Rotação Assíncrona

A rotação assíncrona, também conhecida como rotação “efetiva” é a velocidade não simultânea entre o campo magnético girante e o rotor. Na prática, a grande maioria dos motores de indução possui rotação assíncrona como resultado final da conversão de energia elétrica em mecânica, no eixo giratório.

Quando a rotação do rotor cai em função do acréscimo de carga em seu eixo giratório, o fluxo magnético aumenta para tentar impor maior torque no eixo do motor. Isso faz a rotação aumentar até chegar a um pré-equilíbrio de forças. Assim, o rotor pode acompanhar a rotação do campo magnético indutor desde que seja a uma velocidade inferior para que se processe a geração das correntes induzidas e a reação motora.

Para os motores que não possuem a velocidade de rotação do induzido coincidente com a velocidade do campo rotativo do indutor são chamados assíncronos. Portanto, os motores assíncronos não possuem rotação síncrona com o campo indutor.

### 2.3.3.3 Escorregamento

A diferença entre a rotação síncrona e assíncrona do motor é denominada **escorregamento**, que geralmente é expresso em porcentagem.

Para melhor compreensão, são apresentados os dados de um MIT com 5cv, 2 pólos, 3520rpm em 60Hz. Com os dados informados, é possível calcular o escorregamento percentual (E%), de acordo com a EQUAÇÃO 02.

$$E(\%) = \frac{\text{rpm}_s - \text{rpm}_{pc}}{\text{rpm}_s} \cdot 100 \quad (02)$$

Onde:

E = escorregamento em porcentagem;

$\text{rpm}_s$  = rotação por minuto síncrona;

$\text{rpm}_{pc}$  = rotação por minuto nominal ou plena carga.

Portanto:

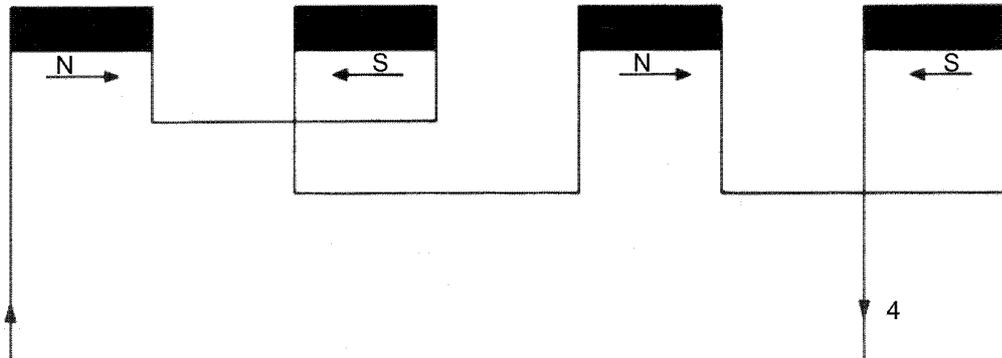
$$E = \frac{3600 - 3520}{3600} \cdot 100 = 2,2\%$$

### 2.3.4 Identificação das Bobinas

Os esquemas de enrolamento para motores são desenhos esquemáticos nos quais se representam bobinados de estatores e suas ligações internas de modo a demonstrar os detalhes essenciais de cada circuito.

Os esquemas indicam através de traços, a posição relativa das bobinas e suas interligações no conjunto que forma a estrutura elétrica do motor. Para aplicá-los, deve-se fazer o esquema com linhas ou traços diferentes, podendo ser linhas grossas, finas, pontilhadas, tracejadas ou de cores diversas quando queremos representar os enrolamentos pertencentes a diferentes fases, no caso do motor trifásico e enrolamentos com diferentes funções, no caso dos motores monofásicos com bobina de arranque e trabalho.

Na FIGURA 07, é ilustrado um esquema de enrolamento de forma bem simplificada.



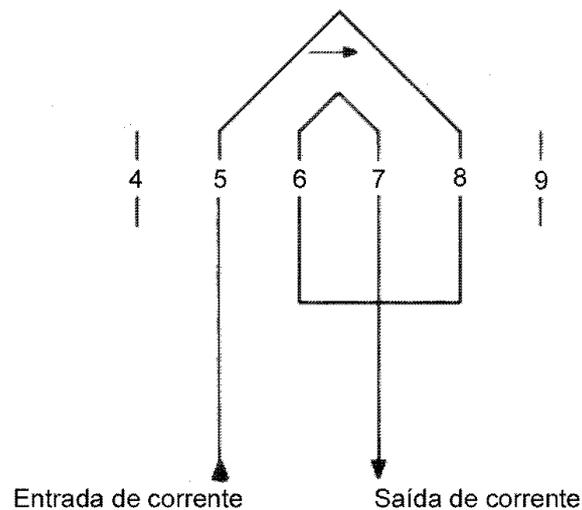
(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 07 – Esquema simplificado de enrolamentos

### 2.3.4.1 Formação de um pólo

Um pólo pode ser formado por uma ou mais bobinas ligadas em série ou em paralelo, de modo que a corrente circule sempre no mesmo sentido entre tais bobinas e assim, propiciar a somatória dos campos magnéticos produzidos por cada bobina constituinte.

Como ilustração do exposto acima, é apresentada na sequência, a situação em que o pólo é formado por duas bobinas ligadas em série, de forma concêntrica.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

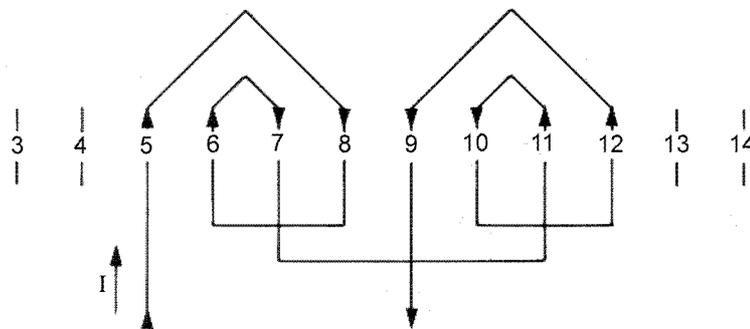
FIGURA 08 – Formação de um pólo

### 2.3.4.2 Polarização

Todo e qualquer motor elétrico tem, no mínimo, um par de pólos que convencionalmente são chamados de pólos *norte e sul*, sendo formados pela ligação de dois ou mais grupos de bobinas existentes nas ranhuras do estator.

Num dos grupos, o sentido da corrente é igual ao do movimento dos ponteiros do relógio; esse é o *pólo norte*. No outro, o sentido da corrente é em sentido contrário ou anti-horário; esse é o *pólo sul*.

Logo abaixo é apresentado o sentido da corrente elétrica em dois pólos, onde cada um é formado por duas bobinas concêntricas, situadas nas ranhuras do estator.

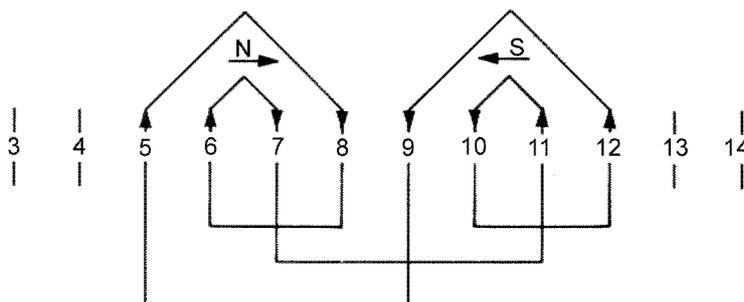


(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 09 - Formação de um par de pólos nas bobinas.

### 2.3.4.3 Pólos ativos e conseqüentes

Os pólos ativos são aqueles criados nas ligações dos grupos de bobinas, de modo que as ligações entre os grupos são feitas uma ao contrário da outra. Assim, havendo dois grupos de bobinas, haverá dois pólos ativos, sendo mais bem representados pela FIGURA 10.

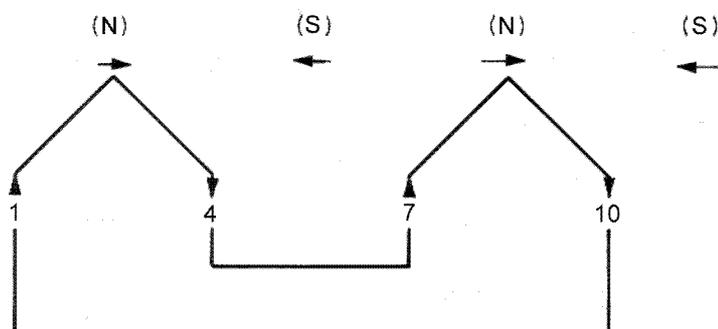


(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 10 – Conexões para formação de Pólos ativos

Por outro lado, os pólos consecuentes são pólos criados por consequência, como o próprio nome diz e nesta ligação, a metade do número de pólos é formada por pólos ativos e a outra metade aparece em consequência da primeira. A corrente circula nos grupos em um único sentido, que geralmente é o sentido horário, fato convencionado pelos diversos fabricantes de motores consultados durante as etapas de pesquisa para elaboração deste trabalho.

No exemplo da FIGURA 11, existem dois grupos de bobinas cuja ligação apresenta dois pólos ativos e dois pólos que aparecem por consequência. Isso propicia uma polarização de quatro pólos, influenciando diretamente na diminuição da rotação do MIT.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 11 – Pólos consecuentes.

Um fato importante aplicável aos bobinados de pólos consecuentes é que os mesmos são utilizados para motores de quatro pólos ou mais, devido à impossibilidade de se obter um pólo sul por consequência, a partir de um pólo norte apenas, por fase.

### 2.3.5 Conexões dos Enrolamentos

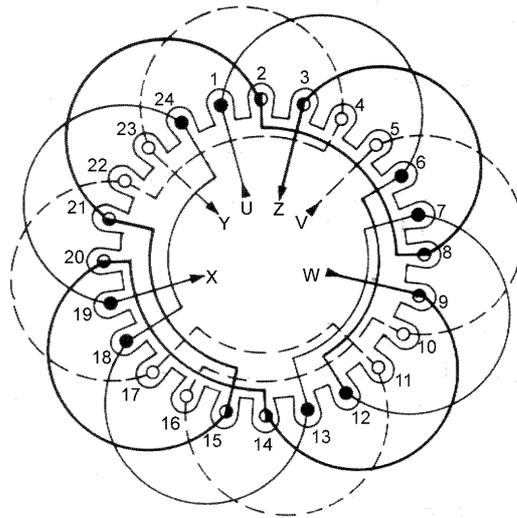
As bobinas de todo motor trifásico são ligadas de modo a formar três enrolamentos separados, chamados fases. As três fases têm o mesmo número de bobinas e isso significa que o número de bobinas por fase será igual à terceira parte do número total de bobinas existentes nas ranhuras da parte fixa do motor.

O esquema da FIGURA 12 corresponde ao motor com 24 ranhuras, 4 pólos, com bobinado meio imbricado<sup>4</sup>, ligação ativa e 4 bobinas por fase, localizadas nas ranhuras do estator.

---

**Nota:**

4. Meio Imbricado: Tipo específico de enrolamento trifásico onde cada lado de bobina ocupa uma ranhura do estator.



(fonte: Máquinas Elétricas Rotativas)

FIGURA 12 - Exemplo de um motor de 6 terminais

Nos diagramas esquemáticos utilizados para representação de enrolamentos dos motores elétricos trifásicos, cada fase é representada por linhas que possuem traços diferentes, podendo ser grossas, finas, pontilhadas ou coloridas. Tais diagramas mostram também, o passo das bobinas, que pode ser definido através da contagem das ranhuras utilizadas para a alocação das mesmas no estator. Neste caso, o passo da bobina é 1 à 6 e tal contagem é válida para todas as bobinas existentes no estator.

Para o exemplo apresentado na FIGURA 12, cada pólo é formado por uma única bobina e assim obtêm-se quatro bobinas que formam quatro pólos ativos em cada fase do motor. A polarização descrita acima é idêntica em cada enrolamento, pois cada fase forma quatro pólos e assim a corrente elétrica que circula em cada grupo sempre em sentido contrário ao do grupo anterior.

As letras U, V, W, X, Y e Z, as últimas do alfabeto, são utilizadas como norma internacional para motores trifásicos, onde U, V e W são adotadas para as entradas e X, Y e Z, são adotadas para as saídas. Existem diversas versões de motores, que podem variar de três até 12 terminais para conexão à rede elétrica.

As letras citadas acima podem ser substituídas por números correspondentes e tal relação é apresentada na TABELA 02.

TABELA 02 – Equivalências na identificação dos terminais dos MIT

	Letra Padrão	Número Equivalente
Fase A	U e X	1 e 4
Fase B	V e Y	2 e 5
Fase C	W e Z	3 e 6

(fonte: Máquinas Elétricas – Teoria e Ensaios)

## 3 SISTEMAS DE PARTIDA

Atualmente, existem diversas formas de acionamento dos MIT, sendo que algumas são bem simples e apresentam baixo custo de instalação, porém, são altamente limitadas quando se considera o fator “*controle de velocidade*”, por exemplo.

Por outro lado, existem os sistemas de acionamento mais sofisticados, com um custo de instalação mais elevado, porém, com uma alta capacidade de regulação da rotação durante a partida, regime de serviço e parada do MIT.

Alguns dos diversos sistemas de acionamentos existentes na atualidade são apresentados através de diagramas elétricos em dois momentos, aqui chamados de Convencionais e Eletrônicos.

Para exemplificar sistemas Básicos ou Convencionais, citam-se três tipos específicos, de baixa complexidade e fácil compreensão:

- *Partida Direta;*
- *Partida Estrela-Triângulo;*
- *Partida com Auto-trafo Compensador.*

Por outro lado, visando exemplificar os sistemas Avançados ou Eletrônicos, é válido citar dois tipos específicos, de média complexidade:

- *Partida com chave Soft-Starter;*
- *Partida com Inversor de Frequência.*

### 3.1 DIAGRAMAS ELÉTRICOS

Seja qual for o tipo de projeto da área eletroeletrônica que se queira realizar, seja instalação, montagem ou reparo, a maneira adequada de representar a disposição dos componentes e o modo como eles se relacionam entre si é por meio do diagrama elétrico.

O diagrama elétrico é um desenho que mostra a maneira como as várias partes de um dispositivo, rede, instalação, grupo de aparelhos ou itens de um aparelho são inter-relacionados e/ou interconectados. É a representação de uma instalação elétrica ou parte dela por meio de símbolos gráficos, definidos pelas normas NBR 5259, NBR 5280, NBR 5444, NBR 12519, NBR 12520 e NBR 12523.

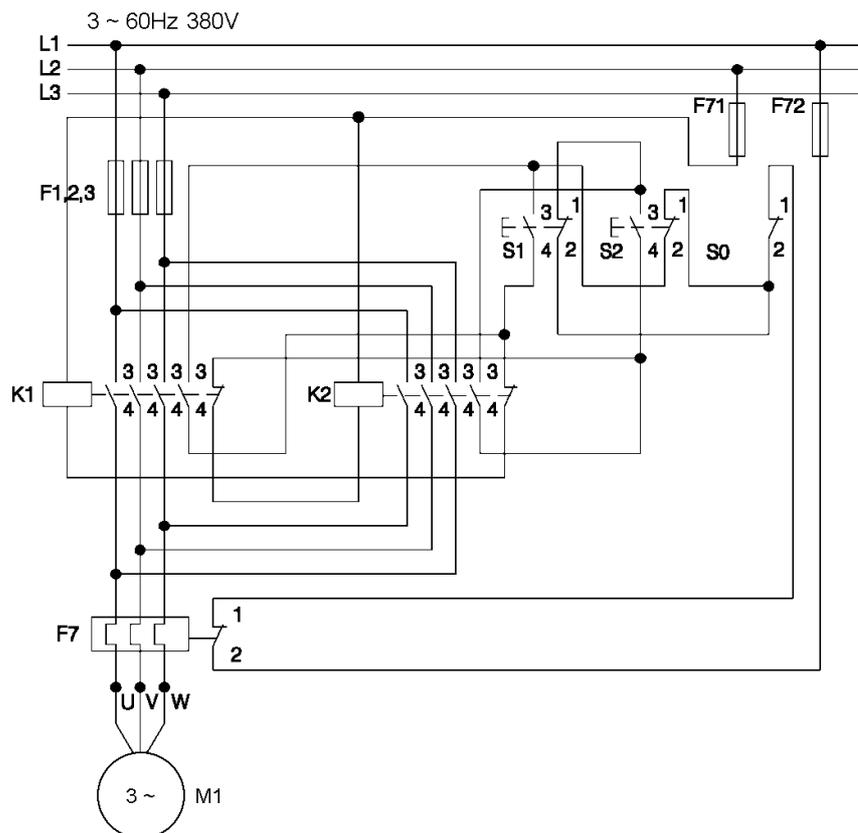
O diagrama de comando faz a representação esquemática dos circuitos elétricos e demonstra de forma clara os seguintes aspectos:

- Funcionamento seqüencial dos circuitos;

- Representação dos elementos, suas funções e as interligações, conforme as normas estabelecidas;
- Visão analítica das partes ou do conjunto;
- Possibilidade de rápida localização física dos componentes.

Os diagramas elétricos podem ser do tipo Multifilar completo (ou tradicional), Funcional e de Execução.

O diagrama Multifilar completo (ou tradicional) representa o circuito elétrico da forma como é montado e no qual todos os elementos, os componentes e todas as ligações dos circuitos são representados por símbolos gráficos. Esse tipo de diagrama é difícil de ser interpretado e elaborado, principalmente quando os circuitos a serem representados são complexos. A seguir, é apresentado um exemplo do diagrama de comando do tipo Multifilar, que compreende os principais componentes associados a uma partida de motor elétrico por meios convencionais.

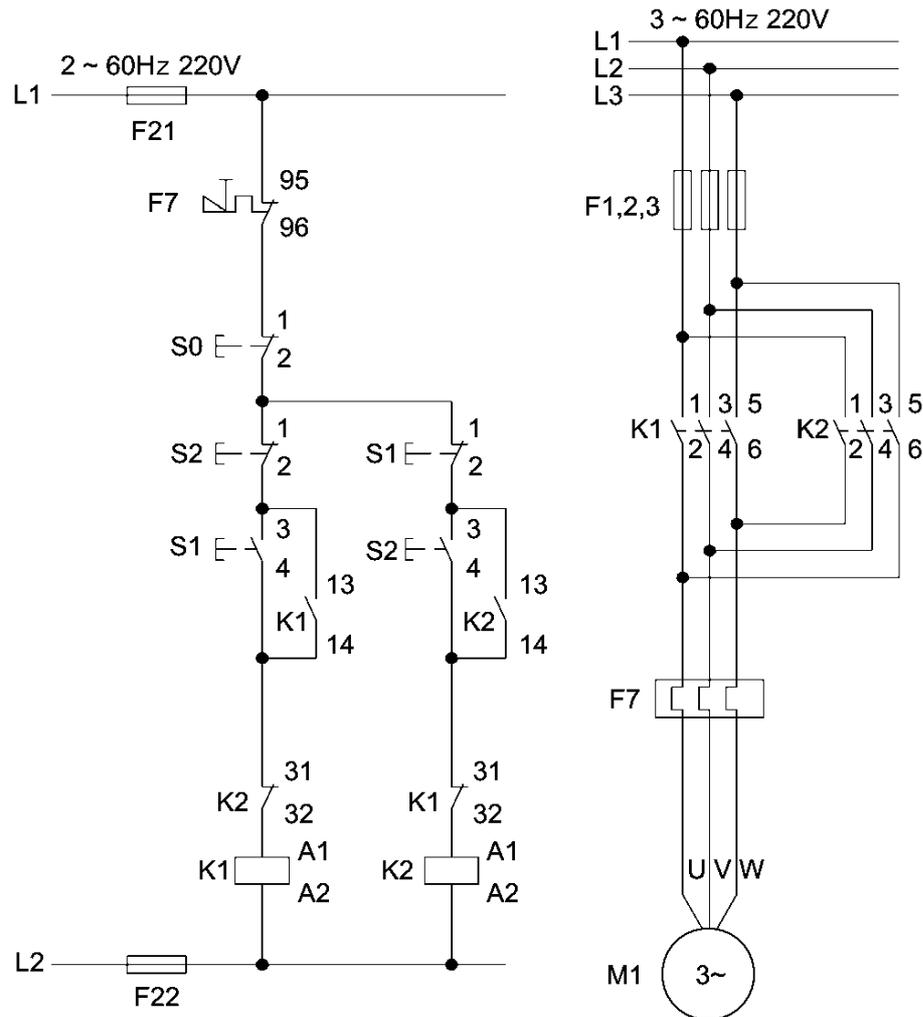


(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 13 - Exemplo de diagrama Multifilar

Em razão das dificuldades de interpretação desse tipo de diagrama, os três elementos básicos dos diagramas, ou seja, os caminhos da corrente, os elementos e suas funções e a seqüência funcional são separados em duas partes representadas por diagramas diferentes.

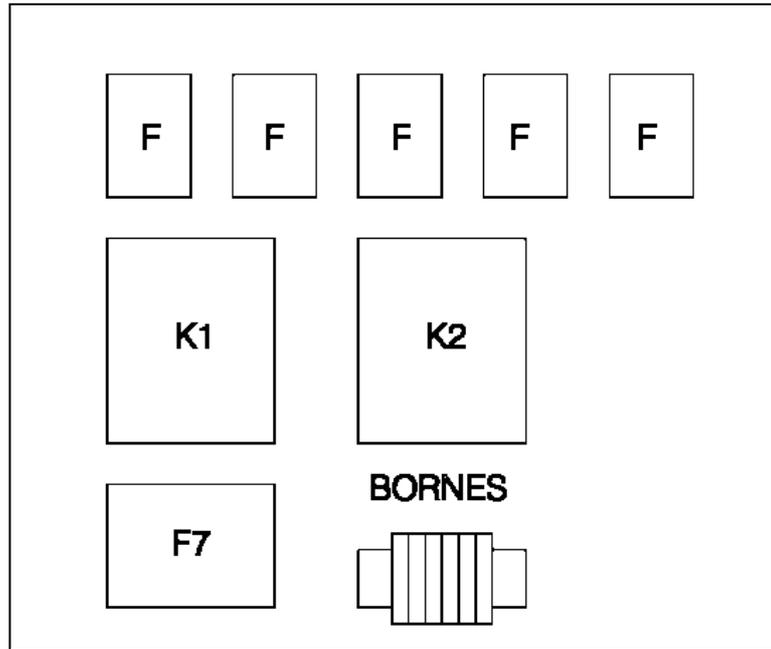
O diagrama simplificado no qual os aspectos básicos são representados de forma prática e de fácil compreensão é chamado de diagrama Funcional, conforme a FIGURA 14.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 14 - Exemplo de diagrama Funcional

A representação, a identificação e a localização física dos elementos tornam-se facilmente compreensíveis com o diagrama de Execução (ou de disposição) mostrado pela FIGURA 15.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

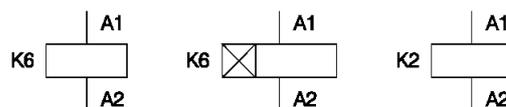
FIGURA 15 - Exemplo de diagrama de Execução

- Símbolos literais

De acordo com a norma NBR 5280/1983, símbolos literais para elementos de circuitos são representações em forma de uma letra maiúscula inicial, podendo ser seguida por números, outras letras ou combinações alfanuméricas para particularizar cada elemento do circuito.

Os símbolos literais têm a função de facilitar a identificação dos elementos do circuito, ou seja, componentes, equipamentos, conjuntos, subconjuntos, quando relacionados em uma lista de materiais e sua utilização ajuda na interpretação de esquemas e diagramas de circuitos.

A seguir são apresentados alguns exemplos de representação e identificação de componentes por letras e números, através da FIGURA 16.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 16 – Exemplos de identificação de componentes por letras e números

A TABELA 03 abaixo foi extraída da norma ABNT/NBR 5280 e apresenta as letras maiúsculas iniciais para designar elementos do circuito.

TABELA 03 – Letras “Símbolos” para designar elementos do circuito

<i>Letra</i>	<i>Tipos de elementos</i>	<i>Exemplos</i>
A	Conjuntos, subconjuntos	Amplificadores com válvulas ou transistores, amplificadores magnéticos laser, maser.
B	Transdutores de grandezas não-elétricas, paraelétricas e vice-versa.	Sensores termoeletrônicos, células fotoelétricas, dinamômetros, transdutores a cristal, microfones, alto-falantes.
C	Capacitores	
D	Elementos binários, dispositivos de atraso, dispositivos de memória	Elementos combinatórios, linhas de atraso, elementos biestáveis, monoestáveis, núcleo de memória, fitas magnéticas de gravação.
E	Miscelânea.	Dispositivos luminosos, de aquecimento ou outros não especificados nesta tabela.
F	Dispositivos de proteção.	Fusíveis, pára-raios, dispositivos de descarga de sobre-tensão.
G	Geradores, fontes de alimentação	Geradores rotativos, conversores de frequência rotativos, baterias, fontes de alimentação, osciladores.
H	Dispositivos de sinalização	Indicadores óticos e acústicos.
K	Relés, contadores.	
L	Indutores.	

M	Motores	
P	Equipamento de medição e ensaio	Dispositivos de medição, integradores, indicadores, geradores de sinal, relógios.
Q	Dispositivos mecânicos de conexão para circuitos de potência.	Abridor, isolador.
R	Resistores	Resistores ajustáveis, potenciômetros reostatos, derivadores (shunts), termistores.
S	Seletores, chaves	Chaves de controle, "push buttons" chaves limitadoras, chaves seletoras, seletores.
T	Transformadores	Transformadores de tensão, de corrente.
U	Moduladores	Discriminadores, demoduladores, codificadores, inversores, conversores.
V	Válvulas, semicondutores.	Válvulas, tubos de descarga de gás, diodos, transistores, tiristores
W	Elemento de transmissão, guias de onda, antenas.	"Jumpers", cabos, guias de onda, acopladores direcionais, dipolos, antenas parabólicas.
X	Terminais, plugues, soquetes.	Tomadas macho e fêmea, pontos de prova, quadro de terminais e barra de terminais.
Y	Dispositivos mecânicos operados eletricamente	Válvulas pneumáticas, freios, embreagens.

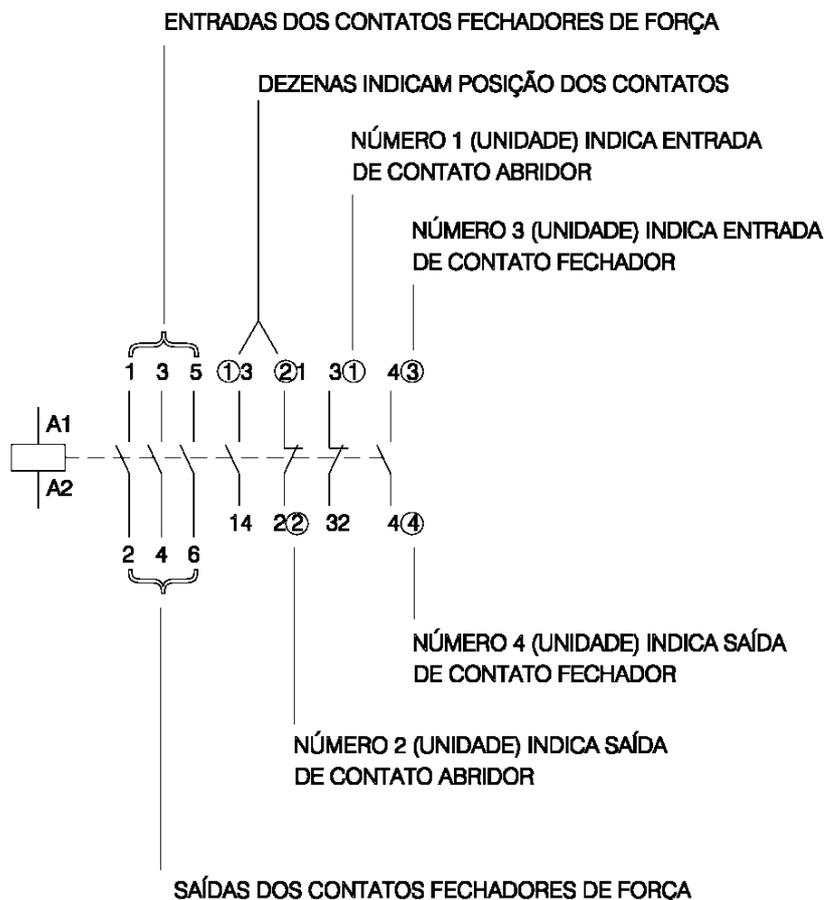
Z	Transformadores híbridos, equalizadores, limitadores, cargas de terminação.	Filtros a cristal, circuitos de balanceamento, compressores expansores ("compandors").
---	---	--

(fonte: Adaptado da ABNT/NBR 5280)

Por fim, especificamente nos contadores e relés, os contatos são identificados por números que indicam:

- Função - contatos abridores e fechadores do circuito de força ou de comando; contatos de relés temporizados ou relés térmicos;
- Posição - entrada ou saída e a posição física dos contadores. Nos diagramas funcionais, essa indicação é acompanhada da indicação do contator ou elemento correspondente.

Na FIGURA 17 são mostradas as identificações de função e posição dos contatos de um dispositivo contator, com bobina, três contatos de potência e quatro contatos auxiliares.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 17 – Exemplos de identificação de função e posição de contatos

### 3.2 DEFINIÇÕES IMPORTANTES

Existem diversos termos e definições específicas aplicáveis aos sistemas de partida para os MIT e dentre elas, considera-se talvez o mais importante sendo o conjugado ou momento.

Por definição, conjugado ou momento, é o conjunto de forças (binário) produzido pelo eixo do rotor que provoca o movimento de rotação.

O conjugado não é constante do momento da partida até que a velocidade nominal seja alcançada. Essa variação chama-se curva de conjugado, cujos valores são expressos em porcentagem em relação ao conjugado nominal, ou seja, com relação ao conjugado na velocidade a plena carga.

Cada motor tem suas próprias curvas de conjugado, que variam com a potência e a velocidade do motor. Assim, em motores de velocidade e potência iguais, mas de fabricantes diferentes, geralmente a curva do conjugado é diferente.

O conjugado pode ser calculado pela EQUAÇÃO 03:

$$M = 9,55 \cdot \frac{P(w)}{n} \text{ (em newton/ metro)} \quad (03)$$

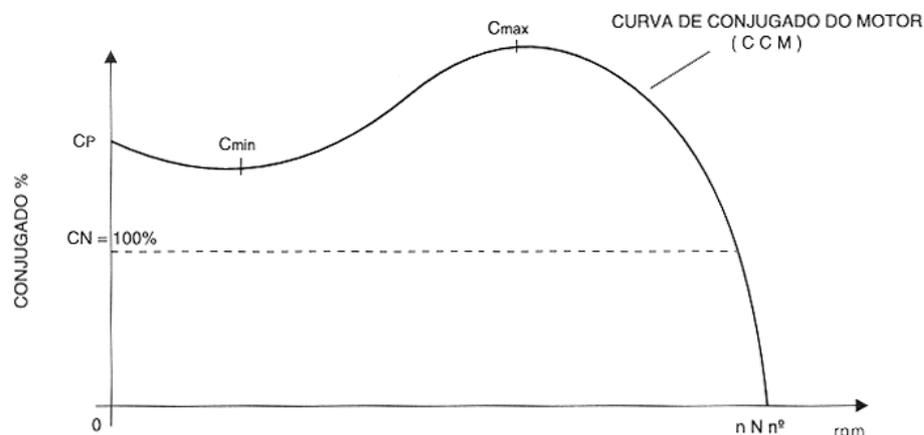
Onde:

M= momento de conjugado

P= potência do motor

n= rotação em rpm

A curva típica do conjugado de um motor (CCM) é mostrada a seguir.

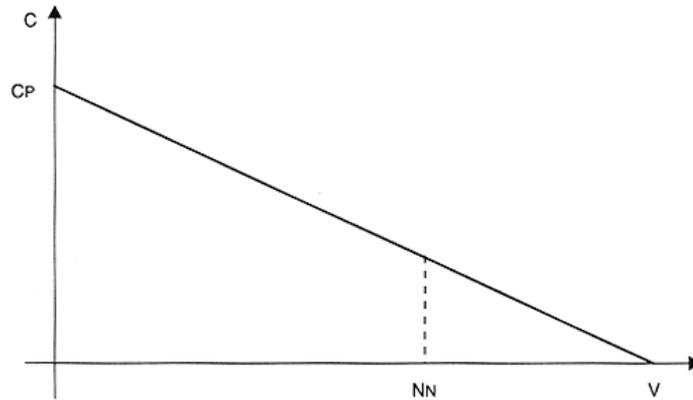


(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 18 – Curva de Conjugado do motor

Para a carga, é válido considerar que o conjugado resistente (CCR) varia de acordo com cada tipo específico de carga, sendo assim, na sequência são apresentadas as principais curvas do conjugado resistente.

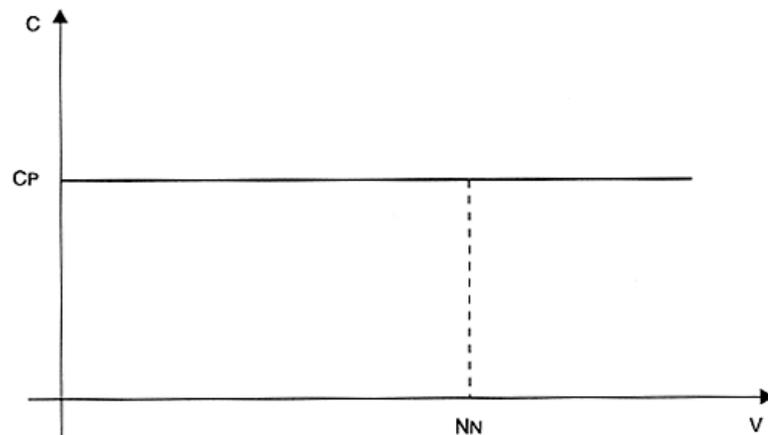
Pela FIGURA 19, apresenta-se o caso em que o conjugado resistente diminui com o aumento da velocidade.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 19 – Curva de Conjugado inversamente proporcional à rpm

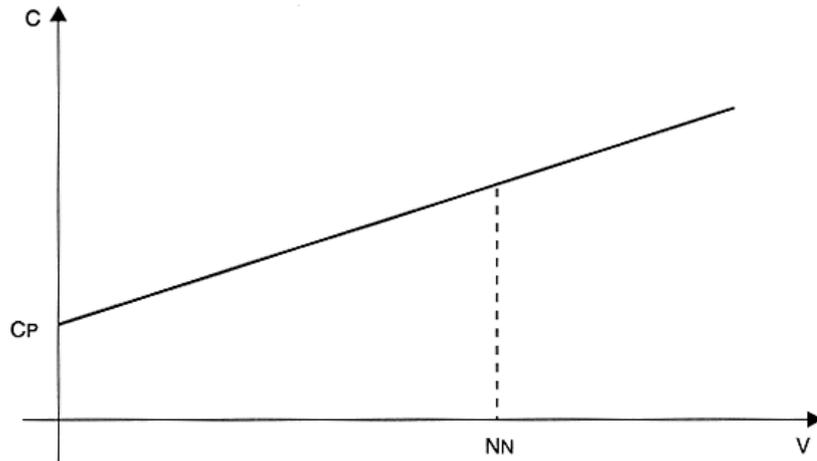
Na FIGURA 20, o caso abordado trata-se de conjugado que permanece constante com o aumento da velocidade.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 20 – Curva de Conjugado constante em relação à rpm

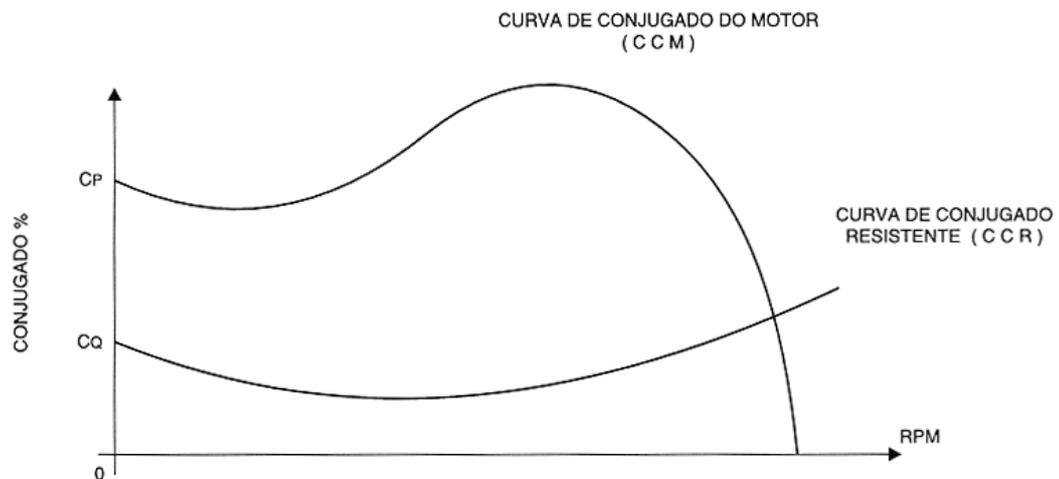
Por fim, na FIGURA 21, o conjugado em análise aumenta de forma diretamente proporcional à velocidade.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 21 – Curva de Conjugado proporcional em relação à rpm

É importante salientar que a curva do conjugado do motor (CCM) deve situar-se sempre acima da curva do conjugado resistente da carga (CCR), para garantir a partida do motor e sua aceleração até a velocidade nominal. Portanto, quanto maior a curva do conjugado do motor em relação ao conjugado resistente da carga, melhor será o desempenho do motor.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 22 – Comparação entre conjugados do motor e da carga

### 3.3 NORMALIZAÇÃO

Os sistemas de partida dos MIT podem ocorrer de diversas maneiras, nos quais podemos citar as chaves de *partida direta*, *estrela-triângulo* ou com *auto-trafo compensador*, entre outras.

A instalação desses sistemas deve sempre obedecer aos critérios técnicos e legais, de acordo com as normas da ABNT para Instalações Elétricas de Baixa Tensão, que no Brasil são obtidos através da NBR 5410/2004.

A NBR 5410/2004 refere-se aos dispositivos de partida sob os seguintes aspectos:

A. Deve ser levada em consideração, em cada região do país, a potência máxima dos MIT que podem ser ligados diretamente à rede. Tal potência é fixada pela concessionária de energia elétrica, levando em conta também o tipo e motor.

B. Os dispositivos de partida devem ser capazes de fazer partir e parar os motores aos quais estão ligados. No caso particular de um motor de corrente alternada, o dispositivo deve ser capaz de interromper a corrente do motor com rotor travado.

C. Para os casos em que os motores possuem potência igual ou inferior à 1/8cv, os sistemas de partidas estão dispensados.

D. Quanto à instalação, normaliza-se que os dispositivos de partida deverão ficar encerrados em caixas metálicas e, dependendo do caso, à vista dos motores que comandam.

E. Estabelece ainda, que dispositivos de partida pela tensão reduzida deverão ter os seguintes recursos mínimos:

- Mecanismo que evite que o dispositivo se mantenha fechado por si na posição de partida;
- Mecanismo que exclua a necessidade de manobra rápida entre a partida e o regime nominal<sup>5</sup>;
- Que sejam dotados de relé de subtensão;
- Que tenham mecanismo que trave os contatos móveis após um desligamento em condição anormal, para evitar sua religação nessas condições.

---

**Nota:**

5. Regime Nominal é a situação em que o MIT está com sua rotação máxima na ponta do eixo.

Essas condições gerais, estabelecidas pela Norma de Instalações Elétricas de Baixa Tensão, são a base para as Normas particulares dos diversos dispositivos de comando, quando estas existirem.

De acordo com a NBR 5410/2004, fica claro que tais dispositivos são necessários, quando a potência do motor ou as condições de partida estabeleçam uma corrente elevada, por um longo tempo, visando não prejudicar as condições da rede elétrica de alimentação.

Assim, podem-se verificar os seguintes aspectos na determinação do dispositivo de partida:

#### 1. Potência do Motor

Conforme a região do país, cada concessionária fornecedora de energia elétrica permitirá a partida direta de motores de determinada potência.

Quando for necessário um dispositivo de partida com tensão reduzida ou corrente reduzida, o sistema será determinado pela carga conforme as possibilidades ou características. Assim, considerando as possibilidades, o motor pode partir em vazio até a plena rotação e sua carga deve ser incrementada pouco a pouco, até o limite final.

#### 2. Tipo de Carga

Quando for necessário um dispositivo de partida com tensão reduzida ou corrente reduzida, o sistema será determinado pela carga conforme as possibilidades ou tipo de carga. Assim, considerando as possibilidades, o motor pode partir em vazio até a plena rotação e sua carga deve ser incrementada posteriormente, até o limite final.

Como exemplos de cargas relativamente suaves, aparecem as serras circulares, os tornos mecânicos ou os compressores em vazio. Nesse caso, a partida pode ser estrela-triângulo, pois a carga ou o conjugado resistente de partida fica reduzido em aproximadamente 50% da carga nominal.

Para cargas consideradas de alta inércia, como as calandras, bombas e britadores, emprega-se a chave de partida com auto-trafo compensador, utilizando as saídas de 65% e 80% do trafo. Vale ressaltar que nestas aplicações, a carga ou o conjugado resistente de partida fica entre 50 e 85% dos valores nominais.

Por muitos anos, as indústrias em geral aplicaram este sistema de partida para os grandes motores, pois não se dispunha de tecnologias que garantiam uma partida eficaz e com baixos inconvenientes gerados na rede elétrica de alimentação, porém, nos últimos anos, é notável a grande evolução das tecnologias para os acionamentos de motores, tornando-os altamente eficazes e com maior vida útil em seus processos.

Este avanço tecnológico será tratado com mais detalhes nos próximos capítulos deste trabalho.

### 3.3.1 Comparação entre Sistemas de Partida Convencionais

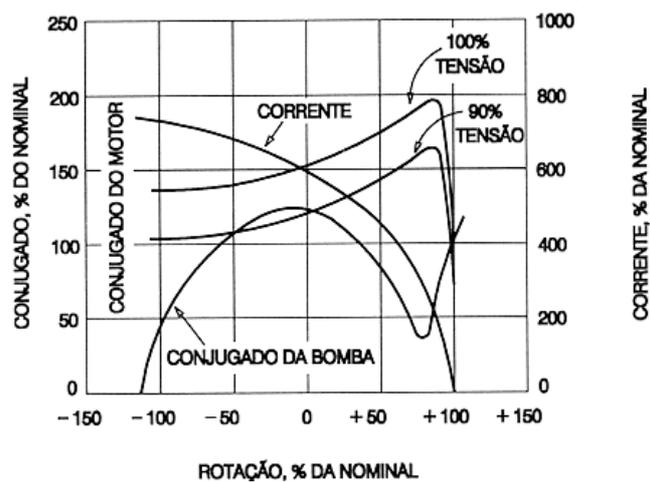
Os MIT podem ser submetidos à partida direta ou a diversas modalidades de partida indireta que fornecerão curvas de conjugados diferentes e assim, pode-se escolher um tipo de partida mais adequado à curva do conjugado da máquina, diminuindo a corrente de partida do motor.

Na sequência, são analisados os sistemas de partida eletromecânicos mais comuns para a maquinaria em geral.

- Partida Direta

Na partida direta a plena tensão, o MIT pode partir a plena carga e com a corrente elevando-se até 5 a 6 vezes a nominal, conforme o tipo e número de pólos.

A FIGURA 23 mostra a relação entre a rotação, o conjugado e a corrente. A curva de corrente mostra que a corrente de partida é 06 vezes o valor da corrente nominal<sup>5</sup>. A curva de conjugado mostra que o conjugado na partida atinge aproximadamente 1,5 vezes o valor do conjugado nominal<sup>6</sup>.



(fonte: Manual Técnico de Motores Elétricos WEG)

FIGURA 23 – Curva de Conjugado e Corrente para a Partida Direta

**Nota:**

6. Corrente Nominal e Conjugado Nominal são valores estabelecidos pelos fabricantes e geralmente são expressos na placa de dados do MIT.

Para cargas diferentes, as curvas características do motor permanecem constantes, pois a carga não exerce influência no comportamento do motor. A influência da carga se limita ao tempo de aceleração do motor e assim, se a carga colocada no eixo do motor for elevada, ele levará mais tempo para alcançar a velocidade nominal.

Na partida direta, o motor não atinge a rotação nominal basicamente em duas situações:

- Conjugado de partida do motor é menor que o conjugado de partida de carga;
- Conjugado mínimo do motor é menor que o conjugado da carga na velocidade nominal.

Se uma situação dessas ocorrer, o MIT terá o rotor travado e poderá ser danificado se as altas correntes que circulam em seu enrolamento não forem eliminadas rapidamente.

A utilização da partida direta apresenta as seguintes desvantagens:

- Aquecimento nos condutores da rede elétrica devido aos picos de corrente;
- Elevada queda de tensão no sistema de alimentação da rede elétrica, fato que provoca interferências em equipamentos instalados no sistema;
- Custo elevado quando considerada a necessidade de superdimensionamento do sistema de proteção.

Quando não é possível o emprego da partida direta, deve-se usar a partida indireta, cuja finalidade é reduzir o pico de corrente na partida do MIT.

A redução do pico de corrente somente é possível se a tensão de alimentação do motor for reduzida, ou se for alterada a característica do motor, mudando as ligações dos seus terminais de conexão.

A queda de corrente de partida é diretamente proporcional à queda de tensão e a queda do conjugado é diretamente proporcional ao quadrado da relação entre a tensão aplicada e a tensão nominal.

- Partida Estrela-Triângulo

A partida Estrela-Triângulo é um tipo de partida indireta e pode ser usada quando a curva do conjugado do motor é suficientemente elevada para poder garantir a aceleração da máquina com a corrente reduzida. Isso acontece nos MIT aplicados em serras circulares, torno ou compressores que devem partir com válvulas abertas.

A condição fundamental para a partida com a chave Estrela-Triângulo é a possibilidade de ligação do MIT em dupla tensão, ou seja, 220/380 V, 380/660 V ou 440/760 V. Também é necessário que os motores tenham no mínimo 06 bornes para ligações elétricas com a rede de alimentação oriunda do sistema de partida em pautas, pois o mesmo recebe as 03 fases da rede de alimentação e envia 06 condutores para sua saída.

A partida Estrela-Triângulo, como seu próprio nome diz, iniciará seu processo de acionamento sempre pela ligação em Estrela e, decorrido um determinado tempo, a conexão dos enrolamentos passa para o tipo Triângulo.

Na ligação Estrela, a corrente de partida fica reduzida para 25 a 30% da corrente de partida direta. Também, a curva do conjugado é reduzida na mesma proporção e por esse motivo, sempre que for necessária uma partida Estrela-Triângulo, deverá ser usado um MIT com elevada curva de conjugado.

A seguir, é apresentado um exemplo de cálculo da corrente absorvida em Estrela e Triângulo.

Para o MIT ligado em Triângulo na rede elétrica de 220 V, é absorvida a corrente de 208 A.

A corrente na fase desse motor será de  $208/1,73=120$  A, ou  $208 \times 0,58$ .

Este motor ligado em Estrela estará sob uma tensão de fase de  $220/1,73=127$  V.

Portanto, havendo uma redução da tensão de fase, conseqüentemente haverá uma redução na corrente:

$$220 \text{ V} \rightarrow 120 \text{ A}$$

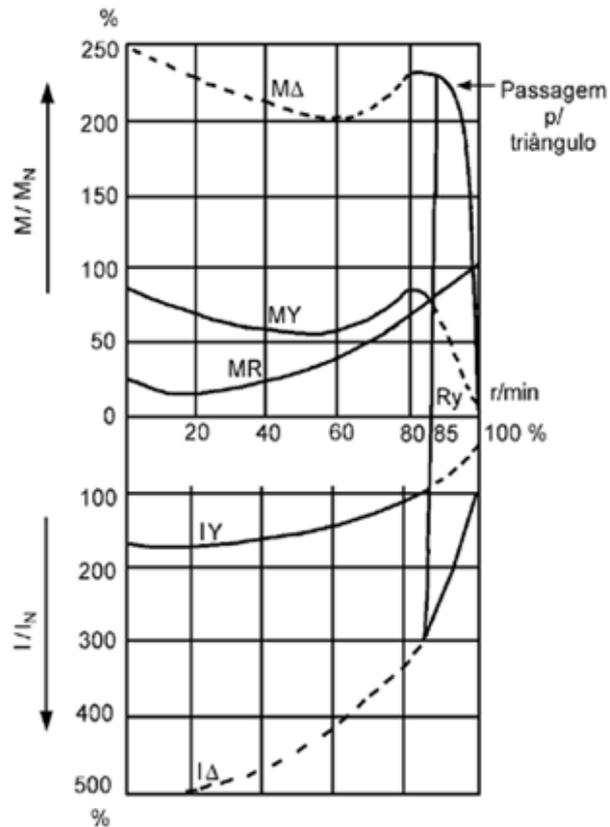
$$127 \text{ V} \rightarrow x \text{ A}$$

Calculando, temos  $x=69,3$  A

Assim, a corrente de linha em Triângulo é de 208 A, enquanto em Estrela é de 69,3 A o que representa aproximadamente 30% da corrente em Triângulo.

Na partida em Estrela, a corrente de partida é de 1,5 a 2,0 vezes a corrente nominal, mas o conjugado de partida e o conjugado máximo se reduzem entre 25 e 30% do conjugado nominal, enquanto que na partida em Triângulo, os conjugados de partida são máximos, mas a corrente de partida é aproximadamente 6,0 vezes a corrente nominal.

Como exemplo, na FIGURA 24 é apresentada a ligação Estrela-Triângulo de um MIT, com cargas diferentes, e assim, apresentando dados comparativos em % pelas curvas de corrente e conjugados.



(fonte: Manual Técnico de Motores Elétricos WEG)

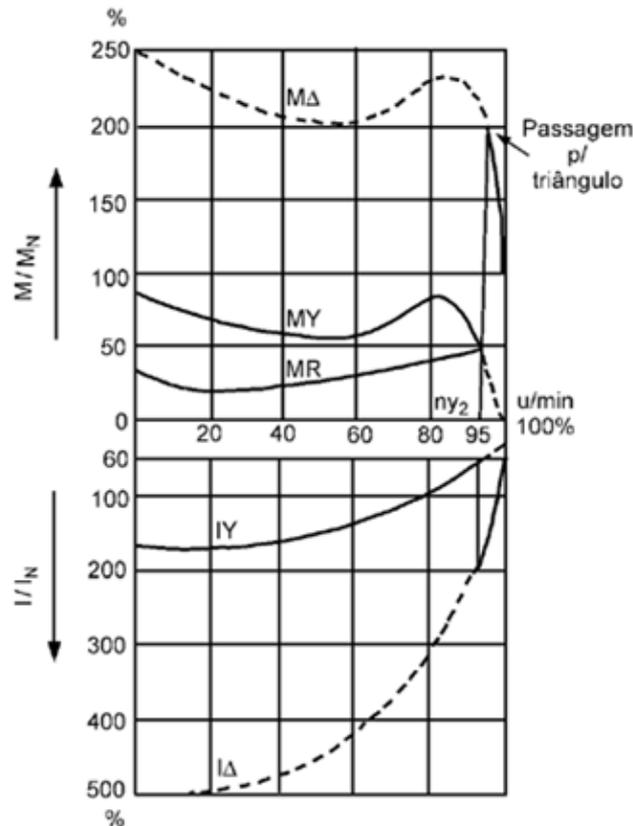
FIGURA 24 – Curva de conjugado resistente alto (Curva MR)

LEGENDA:

- $M/M_n$  = Relação, em porcentagem, entre conjugado nominal e conjugado do motor
- $I/I_n$  = Relação, em porcentagem, entre corrente nominal e corrente durante a partida
- $M_{\Delta}$  = Curva do conjugado motor em Triângulo
- $M_Y$  = Curva do conjugado motor em Estrela
- $M_R$  = Curva do conjugado resistente
- $I_Y$  = Curva da corrente em Estrela
- $I_{\Delta}$  = Curva da corrente em Triângulo

De acordo com as curvas acima, existe um alto conjugado resistente, conhecido também simplesmente por MR. Se a partida for a Estrela, o motor acelerará a carga até o cruzamento da curva MR com a curva MY, ponto este, chamado de velocidade  $R_y$ , que corresponde a aproximadamente 85% da rotação nominal. Nesse ponto, o sistema de partida deverá ser transferido para Triângulo, através de componentes elétricos específicos.

Após a transferência, a corrente de partida que era aproximadamente a nominal, ou seja, 100%, salta repentinamente para 300%, o que não é nenhuma vantagem, uma vez que na partida em Estrela a corrente era de apenas 170%.



(fonte: Manual Técnico de Motores Elétricos WEG)

FIGURA 25 - Curva de conjugado resistente menor (Curva MR)

Na FIGURA 25, é apresentada a curva de conjugado resistente menor (Curva MR) e neste caso, o motor apresenta as mesmas características anteriores, porém o momento resistente MR é bem menor quando comparado com os dados da FIGURA 24.

Na ligação em Estrela, o motor acelera a carga até o cruzamento da curva MR com a curva MY, ponto este, chamado de velocidade  $n_{y_2}$ , que corresponde a aproximadamente 95% da rotação nominal. Nesse ponto, o sistema de partida deverá ser transferido para Triângulo, através de componentes elétricos específicos, provocando o acréscimo de corrente que até então era de aproximadamente 60%, para 190%, ou seja, praticamente igual à da partida em Estrela.

Neste caso, a ligação Estrela-Triângulo apresenta vantagem, porque se o MIT fosse ligado com partida Direta, absorveria da rede, 500% da corrente nominal durante a partida. A chave Estrela-Triângulo em geral só pode ser empregada em partidas da máquina em vazio, isto é, sem carga. Somente depois de ter atingido 95% da rotação nominal, a carga poderá ser inserida. O exemplo da FIGURA 19 pode ser aplicado em um grande compressor que desenvolve sua partida com as válvulas abertas.

Na FIGURA 24, a partida se desenvolve sob carga no eixo do MIT, isto é, assim que começa a girar o compressor já comprime o ar, mas geralmente isso não acontece, pois na

grande maioria dos casos os compressores partem em vazio, caracterizando a curva apresentada na FIGURA 25, e assim, permitindo o fechamento das válvulas após a obtenção da rotação nominal.

Como vantagens da partida Estrela-Triângulo pode-se citar os seguintes pontos:

- Custo reduzido;
- Ilimitado número de manobras/hora;
- Componentes com tamanho compacto;
- Redução da corrente de partida para aproximadamente 1/3 da corrente de partida da ligação Triângulo.

Em contra partida, as principais desvantagens da partida Estrela-Triângulo são:

- Necessidade da existência de 06 bornes ou terminais acessíveis para a ligação da chave de partida;
- Necessidade de coincidência da tensão da rede com a tensão em Triângulo do motor;
- Redução do conjugado ou momento de partida para 1/3 como consequência da redução da corrente de partida para 1/3;
- Pico de corrente na comutação quase correspondente a uma partida direta caso o motor não atinja pelo menos 85% de sua velocidade nominal. Como consequências aparecem problemas nos contatos dos contadores<sup>7</sup> bem como na rede elétrica.

Em geral, esse tipo de partida só pode ser empregado em partidas de máquinas em vazio, ou seja, sem carga. Somente depois do MIT atingir 95% da rotação, a carga poderá ser ligada.

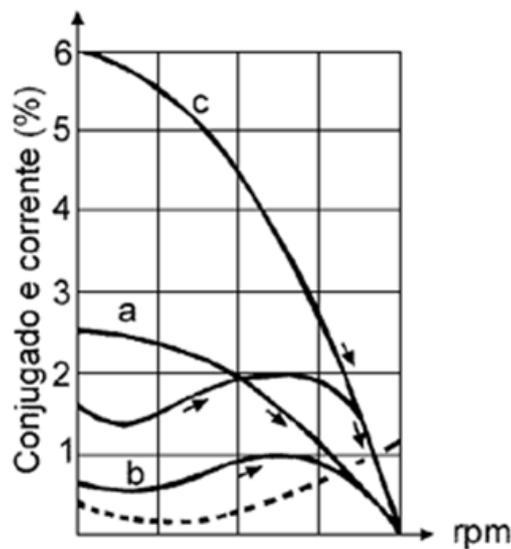
---

**Nota:**

7. A definição técnica do dispositivo "contator" poderá ser facilmente encontrada em catálogos e informativos técnicos, dos seus respectivos fabricantes.

- Partida com Auto-trafo Compensador

Uma opção para acionamento dos MIT sob carga é a partida com Auto-trafo Compensador, comumente chamada de Compensadora. Ela reduz a corrente de partida, evitando uma sobrecarga na rede de alimentação, deixando, porém, o MIT com um conjugado suficiente para a partida e aceleração.



(fonte: Manual Técnico de Motores Elétricos WEG)

FIGURA 26 - Curva de conjugado e corrente para a partida Compensadora

A partida efetua-se em dois estágios, sendo que, no primeiro, a alimentação do MIT é feita sob tensão reduzida por meio do autotransformador.

No início da partida, o pico de corrente e o conjugado são reduzidos proporcionalmente ao quadrado da relação de transformação e conforme o tap do transformador, esta relação de transformação pode ser 65 ou 80%.

Assim, o conjugado do motor atinge, ainda no primeiro estágio, maior velocidade do que a atingida no sistema Estrela-Triângulo.

No segundo estágio, decorrido o tempo inicial da partida, o ponto neutro do autotransformador é aberto, o MIT é ligado sob plena tensão, retornando suas características nominais.

A tensão no motor é reduzida proporcionalmente com os taps do transformador, pois ao se utilizar a posição de 65%, a corrente de linha é aproximadamente igual à do sistema de partida Estrela-Triângulo, entretanto, na passagem da tensão reduzida para a plena tensão, o motor não é desligado, assim, o segundo pico de corrente é bastante reduzido

porque o auto-trafo, por um curto período de tempo, se torna uma reatância ligada em série com o MIT.

Ao utilizar um auto-trafo para um motor ligado a uma rede 220 V e que absorva a corrente de 100 A, observa-se que:

- Se o auto-trafo for ligado no tap de 65%, a tensão aplicada nos bornes do motor será de:  $0,65 \times 220 = 143 \text{ V}$ ;
- Com a tensão reduzida em 65%, a corrente nos bornes do motor também será reduzida de 65%, ou seja:  $0,65 \times 100 = 65 \text{ A}$ ;
- Como o produto da tensão pela corrente na entrada do auto-trafo é igual ao produto da tensão pela corrente na saída, a corrente na rede será de 42,25 A, conforme o demonstrado a seguir:

$$220 \times I_e = 143 \times 65$$

$$I_e = (143 \times 65) / 220 = 42,25 \text{ A}$$

- O conjugado ou momento de partida será proporcional ao quadrado da tensão aplicada aos bornes do motor, que no caso acima, é  $0,65 \times 0,65 = 0,42$ , ou seja, aproximadamente metade do conjugado nominal. A mesma regra é válida para o tap de 80%, onde  $0,80 \times 0,80 = 0,64$ , ou seja, dois terços do conjugado nominal.

Como vantagens da partida com auto-trafo, pode-se citar:

- Corrente de linha semelhante à da partida Estrela-Triângulo no tap de 65%;
- Possibilidade de variação do tap de 65% para 80% da tensão da rede;
- Possibilidade de início da partida com carga conectada;

Por outro lado, também existem desvantagens:

- Limitação da frequência de manobra por hora;
- Custo mais elevado quando comparado ao da partida Estrela-Triângulo;
- Necessidade de quadros de comando maiores devido ao tamanho do auto-trafo.

### 3.4 DIAGRAMAS DOS SISTEMAS CONVENCIONAIS

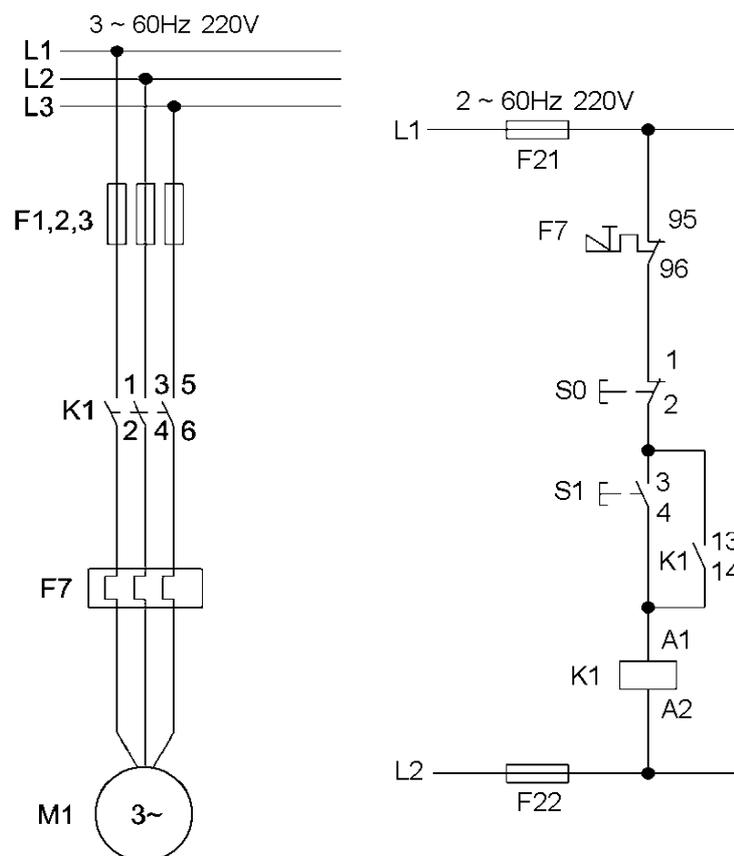
- *Partida Direta*

A partida direta é realizada por meio de contadores eletromecânicos e uma de suas aplicações é o acionamento indireto dos MIT, utilizando componentes de simples funcionamento e baixo custo.

Neste tipo de partida, o MIT recebe a plena tensão da rede elétrica trifásica para iniciar o processo de magnetização de seus enrolamentos internos. Assim, decorrido um breve intervalo de tempo, a rotação presente no eixo está praticamente com seu valor máximo, em função da máxima magnetização produzida pela tensão.

O MIT pode partir a plena carga e com corrente se elevando de cinco a seis vezes o valor da corrente nominal, conforme o seu tipo ou número de pólos. Assim, as imposições existentes atualmente são provenientes das concessionárias de energia elétrica de cada região específica, que limitam a potência máxima de utilização para esse tipo de acionamento, ficando em 5 CV para instalações em geral e em alguns casos, 10 CV para instalações industriais.

A FIGURA 27 apresenta os diagramas elétricos de potência e comando de uma partida direta para o MIT.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 27 – Diagramas de potência e comando para a partida direta.

Para os diagramas elétricos apresentados na FIGURA 27 a sequência operacional ocorre da seguinte maneira:

- Estando sob tensão os bornes<sup>8</sup> L1, L2 e L3, pressionando-se o botão<sup>8</sup> S1, a bobina do contator K1 será energizada. Esta ação faz fechar o contato de selo K1 (13-14), que manterá a bobina acionada e assim fazendo os contatos principais se fechar, propiciando o funcionamento do MIT.
- Para interromper o funcionamento do contator K1, é necessário pulsar o botão S0, que eliminará a alimentação da bobina de K1, fato que propiciará também a abertura do contato de selo e conseqüentemente dos contatos principais, propiciando a parada do MIT.

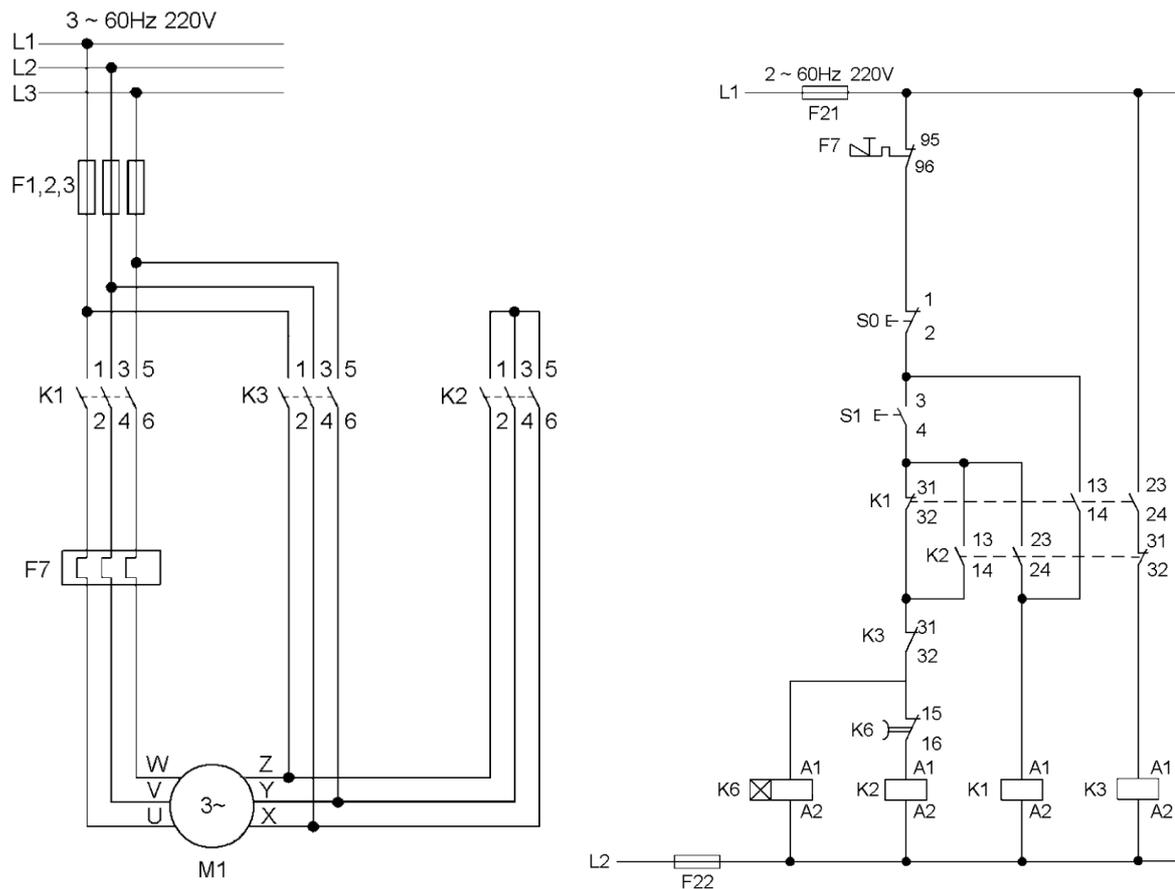
---

**Nota:**

8. Maiores informações dos dispositivos elétricos citados acima poderão ser facilmente encontrados em catálogos e informativos técnicos, dos seus respectivos fabricantes.

- *Partida Estrela-Triângulo*

A FIGURA 28 apresenta uma das diversas opções para os diagramas elétricos de potência e comando de uma partida direta para o MIT.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 28 – Diagramas de potência e comando para a partida Estrela-Triângulo.

Para os diagramas elétricos apresentados na FIGURA 28, a sequência operacional ocorre da seguinte maneira:

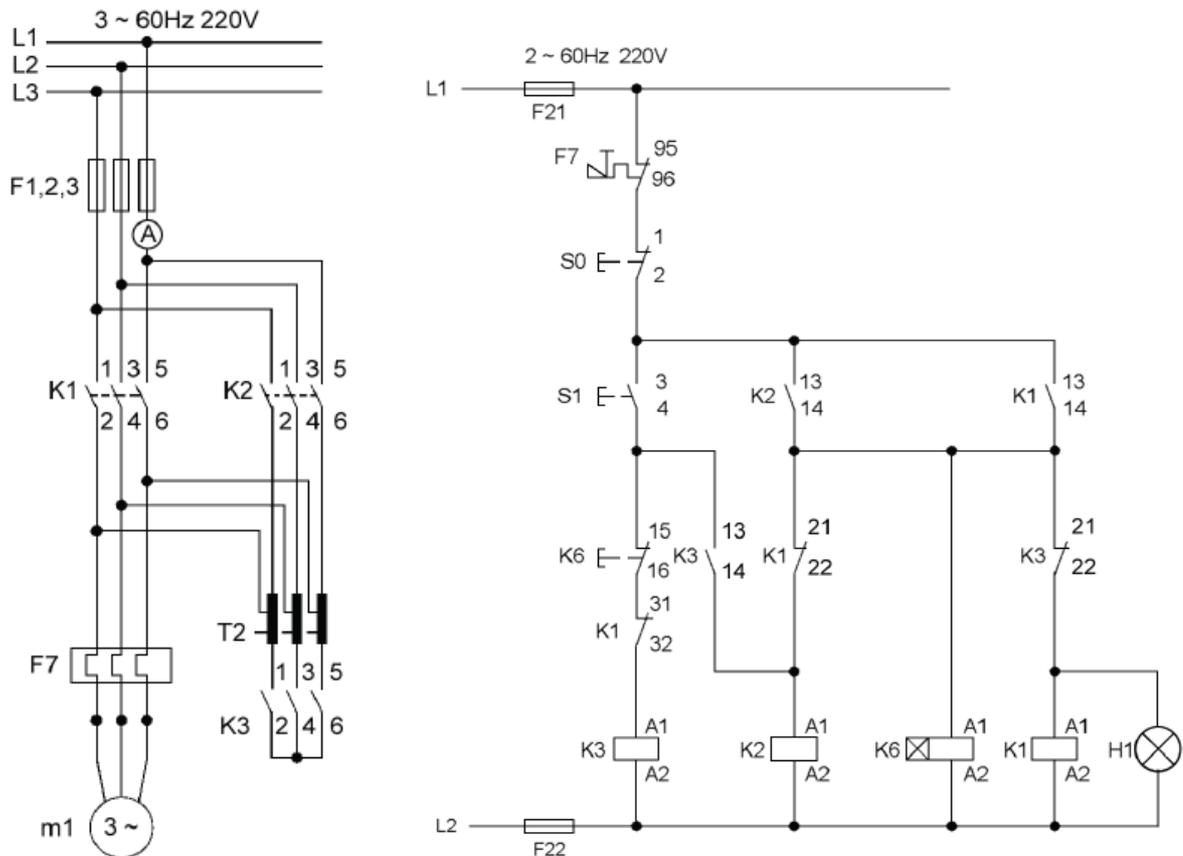
- Na condição inicial de partida do MIT em Estrela, K1, K2 e K3 estão desligados e os bornes da rede L1, L2 e L3 estão sob tensão nominal;
- Pulsando-se o botão S1, a bobina do contator K2 e o relé temporizado K6 serão alimentados, fechando os contatos de selo K2 (13-14) e K2 (23-24), que mantêm energizadas as bobinas dos contatores K1, K2 e o relé K6;
- O MIT é então energizado através da conexão em Estrela;

- Decorrido o tempo para o qual o relé temporizado foi ajustado, este atua fazendo com que o contato K6 (15-16) se desligue e assim, desenergizando a bobina de K2 e abrindo seus contatos principais;
- Assim, o contato K2 (31-32) permite o acionamento da bobina de K3, que por sua vez acionará o MIT em Triângulo;
- Para interromper o funcionamento do MIT, aciona-se o botão S0, que interrompe a energização da bobina K1 e assim, abre-se o contato K1 (13-14) e K1 (23-24), que interrompe também a bobina de K3.

Para a segurança do sistema, quando o MIT está em movimento, o contato K3 (31-32) fica aberto e impede a energização acidental da bobina K2. Existem também o relé de sobrecarga F7 e os dispositivos fusíveis F1, F2 e F3, que respectivamente protegem o MIT contra eventuais acréscimos indesejados de corrente e contra curtos-circuitos ou sobrecarga de longa duração.

- *Partida com auto-trafo Compensador*

A FIGURA 29 apresenta uma das diversas opções para os diagramas elétricos de potência e comando de uma partida direta para o MIT.



(fonte: Acionamentos Elétricos)

FIGURA 29 – Diagramas de potência e comando para a partida com auto-trafo compensador.

Para os diagramas elétricos apresentados na FIGURA 29, a sequência operacional ocorre da seguinte maneira:

- Na condição inicial de partida do MIT com tensão reduzida pelo auto-trafo, K1, K2 e K3 estão desligados e os bornes L1, L2 e L3 estão sob tensão nominal;
- Pulsando-se o botão S1, a bobina do contator K3 é acionada, fechando seu contato K3 (13-14) e este alimenta a bobina de K2. O contato de K2 (13-14) se fecha e sela a bobina K2 de forma independente de K3, o que possibilita a energização do relé temporizado K6;
- Energizadas as bobinas de K2 e K3, fecham-se os contatos principais dos mesmos e o MIT é então energizado através da conexão em tensão reduzida;
- Decorrido o tempo para o qual o relé temporizado K6 foi ajustado, este atua fazendo com que o contato K6 (15-16) se desligue e assim, desenergizando a bobina de K3 e abrindo seus contatos principais;

- Assim, o contato K3 (21-22) permite o acionamento da bobina de K1, que por sua vez, desenergizará K2 e acionará o MIT em tensão plena;
- O MIT é então alimentado pela tensão nominal da rede elétrica;
- Para interromper o funcionamento do MIT, aciona-se o botão S0, que interrompe a energização da bobina K1 e assim, abre-se o contato K1 (13-14);
- Com isso, o MIT ficará desenergizado.

Para a segurança do sistema, quando o MIT está em movimento, os contatos K1 (31-32) e K1 (21-22) ficam abertos e impedem respectivamente, a energização acidental das bobinas K3 e K2. Existem também o relé de sobrecarga F7 e os dispositivos fusíveis F1, F2 e F3, que respectivamente protegem o MIT contra eventuais acréscimos indesejados de corrente e contra curtos-circuitos ou sobrecarga de longa duração.

### 3.5 DIAGRAMAS DOS SISTEMAS ELETRÔNICOS

De acordo com sistemas de partida citados até o momento, é possível apenas realizar a partida, utilizar o MIT em rotação nominal, cujo valor depende da frequência da rede CA de alimentação e desligá-lo de forma simples e rápida. Porém, para aplicações em que se necessita de um maior e melhor desempenho durante o realizar do seu ciclo de funcionamento, tais métodos de acionamento se tornam altamente limitados.

Após intensas pesquisas sobre novas formas de acionamento e controle do MIT, começaram a surgir as primeiras configurações de sistemas de potência dedicados, de uso exclusivo para a colocação em funcionamento, regulagem da velocidade nominal durante o ciclo e também, para o desligamento. Todas as etapas podem assim, ser amplamente controladas de acordo com valores pré-estipulados e configuráveis, sendo inseridos através de softwares específicos (via rede de comunicação industrial), desenvolvidos por diversos fabricantes, ou mesmo nos próprios terminais de comunicação (IHM) inseridos geralmente no frontal dos equipamentos utilizados.

Basicamente, os sistemas de partida eletrônicos estão divididos em duas opções de funcionamento, definidas rapidamente com o uso das chaves de partida e de parada suave, mais conhecida como “Soft-Starter” e também, com o uso dos Inversores de Frequência, que por sua vez, são capazes de realizar, além do controle na partida e na parada, o total ajuste de rotação do MIT, durante todo o seu regime de funcionamento nominal.

### 3.5.1 Acionamento via chave Soft-Starter

As Soft-Starters são chaves de partida estática, destinadas à aceleração, desaceleração e proteção de motores de indução trifásicos. O controle da tensão aplicada ao motor, mediante o ajuste do ângulo de disparo dos tiristores, permite obter partidas e paradas suaves.

Com o ajuste adequado das variáveis, o torque produzido é ajustado à necessidade da carga, garantindo, dessa forma, que a corrente solicitada seja a mínima necessária para a partida.

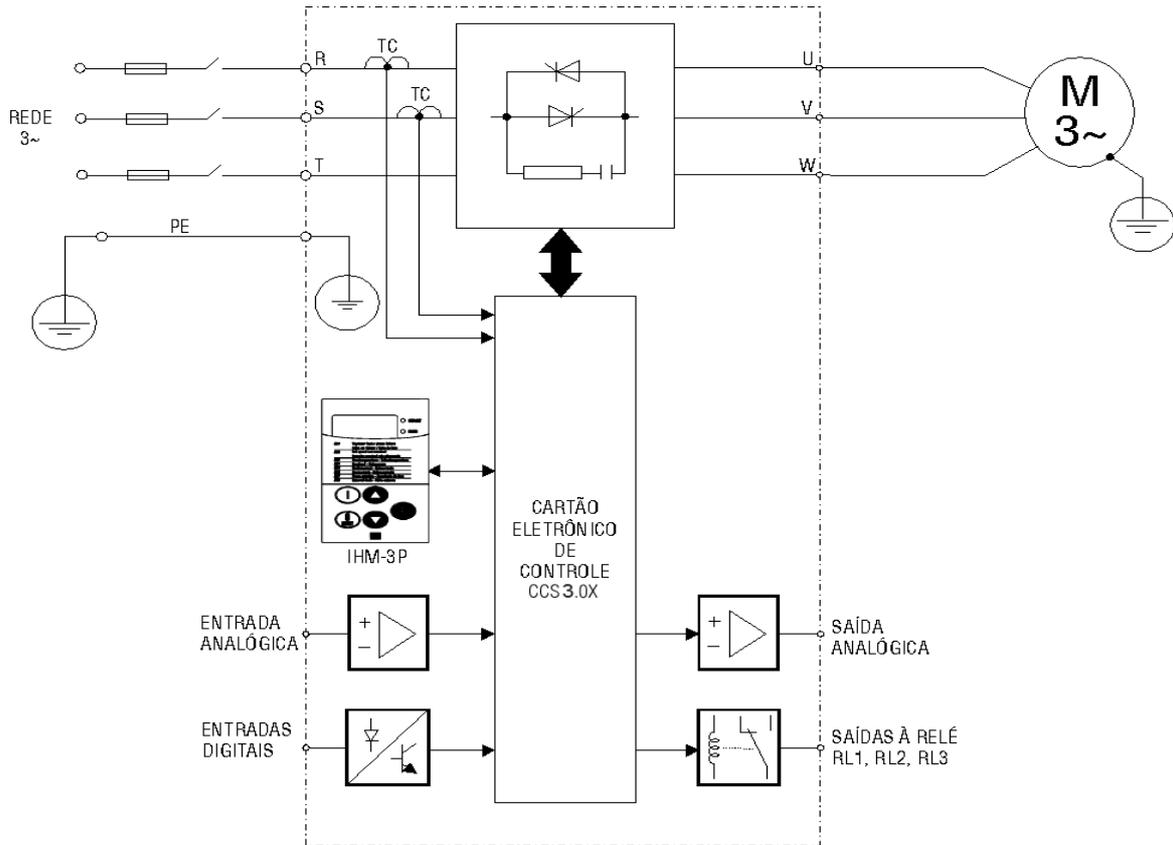
Para o acionamento via chave Soft-Starter, o MIT recebe um pulso inicial de tensão, que varia aproximadamente entre 10 e 30% do valor nominal da rede elétrica local (dependendo da aplicação, ajustes do usuário e do modelo de equipamento utilizado) e que após alguns segundos (configurável pelo usuário), atinge seu valor máximo (100%). Assim, o sistema de partida propicia o acionamento e a aceleração do MIT de forma suave, evitando golpes mecânicos para as partes móveis do mesmo e também, de todas as partes que constituem o sistema mecânico ao qual o MIT geralmente está acoplado.

Durante o desligamento (também configurável), ocorre o processo inverso, onde após o recebimento de um breve sinal de parada (proveniente de um botão pulsador ou semelhante), a tensão nos bornes de saída da Soft-Starter é decrementada continuamente até atingir o valor mínimo (0%). Assim, o MIT é colocado novamente em repouso como inicialmente estava, sem o registro de quaisquer danos e sobrecargas na rede elétrica de alimentação, durante a sua colocação ou retirada de funcionamento.

Nos acionamentos via Soft-Starter, os módulos de potência utilizados são compostos basicamente por componentes eletrônicos, conhecidos como tiristores, que por sua vez, entram em funcionamento apenas durante o tempo de partida ou de parada do MIT.

Durante todo o período de funcionamento nominal, o circuito de potência interno introduz um sistema de “by-pass” nos tiristores, tornando-os inúteis temporariamente e recolocando-os imediatamente no controle, no instante em que o sinal de parada for enviado pelo sistema.

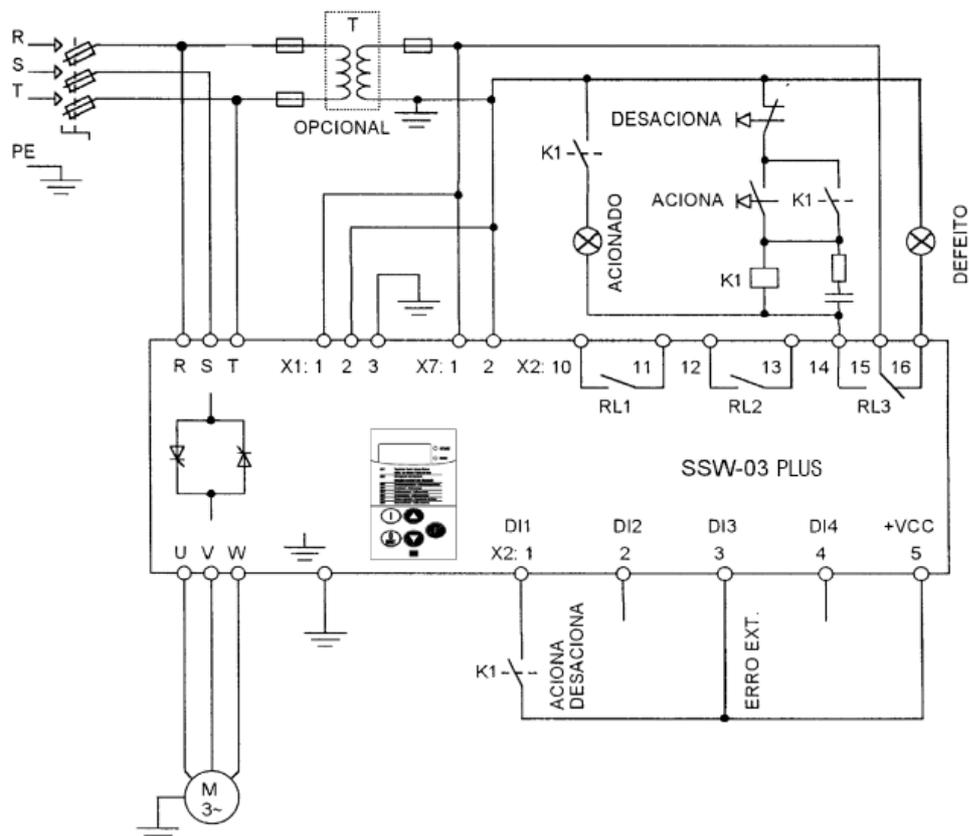
Para melhor visualização do método de funcionamento descrito acima, é apresentado na FIGURA 30, um exemplo em blocos, para acionamento do MIT, via chave Soft-Starter, com sistema de controle local instalado (IHM).



(fonte: Manual Técnico da Soft-Starter SSW03)

FIGURA 30 – Exemplo de Diagrama em blocos para a Soft-Starter SSW03 do fabricante WEG.

Na FIGURA 31, são apresentadas as conexões elétricas básicas (via diagrama funcional), necessárias para o funcionamento da Soft-Starter.



(fonte: Manual Técnico da Soft-Starter SSW03)

FIGURA 31 – Exemplo de Diagrama Funcional da Soft-Starter SSW03 do fabricante WEG.

Observa-se na FIGURA 31, a existência da IHM frontal para configuração e operação da chave em modo local, além dos botões de acionamento e emergência, que poderão ser instalados no frontal do painel elétrico de comando ou até mesmo, em pontos estratégicos da planta industrial, visando facilitar o trabalho do operador. Como proteção dos tiristores, utiliza-se fusíveis ultra-rápidos, do tipo NH, juntamente com um contator de potência.

Para o circuito acima, o comando é semelhante ao sistema de partida direta, onde através de dois botões é selado um contator. Porém, nesse caso, utiliza-se um contator auxiliar, que abre ou fecha um contato de comando (*K1 aciona/desaciona*) na parte inferior do diagrama. Após ser acionado o contator K1, esse fecha um segundo contato, fazendo o sinalizador “acionado” se acender, indicando o estado de funcionamento da Soft-Starter.

O transformador "T" (existente no diagrama acima) é opcional e deve ser utilizado quando houver diferença entre a tensão de rede e a tensão de alimentação da eletrônica e ventiladores internos da Soft-Starter.

Dentre as inúmeras aplicações possíveis para a chave Soft-Starter cita-se as Bombas centrífugas para saneamento, irrigação e petróleo, ventiladores, exaustores, sopradores, compressores de ar, refrigeração, misturadores e todas as demais aplicações que não necessitam do controle de rotação durante a realização do processo.

Visando uma rápida identificação física da Soft-Starter, a FIGURA 32 apresenta a foto de um modelo deste equipamento.



(fonte: Manual Técnico da Soft-Starter SSW03)

FIGURA 32 – Exemplo de uma Soft-Starter modelo SSW03 do fabricante WEG.

### 3.5.2 Acionamento via Inversor de Frequência

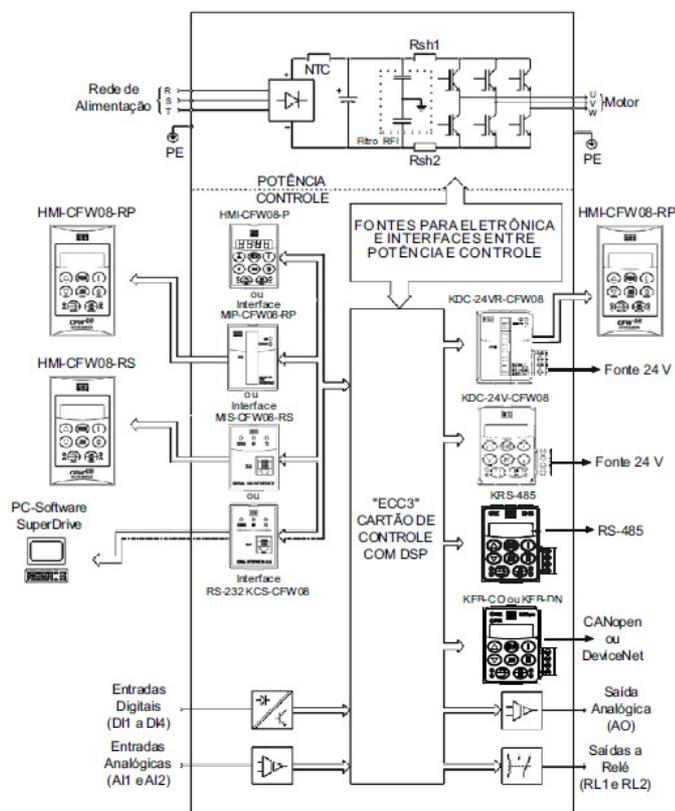
De modo mais elaborado, está o método de acionamento através dos Inversores de Frequência, que possuem todos os recursos de acionamento e de parada semelhantes aos já existentes na Soft-Starter, porém, o grande diferencial agora, é que os Inversores possuem uma metodologia mais avançada de acionamento, o que lhes permite o total controle de rotação do MIT durante toda a realização do ciclo de funcionamento.

Para os Inversores, os componentes de controle utilizados nos módulos de potência, geralmente são os IGBTs, que possibilitam alta performance de trabalho, além de possuir

rápida comutação e grande integração com a modulação PWM. Por esses e outros motivos (maior número de variáveis configuráveis, mais opções de controle e de programação física de seus contatos), os inversores são mais “ricos” do que as chaves Soft-Starters e assim, fica bem claro a existência de várias vantagens quando se utiliza o Inversor de Frequência ao invés da Soft-Starter para o acionamento do MIT.

O acionamento de motores elétricos de indução por conversores estáticos de frequência (comercialmente denominados também simplesmente *inversores de frequência*) é uma solução relativamente nova, porém, já amplamente utilizada na indústria. Assim sendo, muito ainda há por ser feito/estudado/compreendido em tais aplicações e percebe-se, com o avanço na área, a necessidade de se disponibilizar orientação técnica específica ao assunto por parte dos fabricantes de motores e conversores, para que tais aplicações sejam efetivamente vantajosas em termos de eficiência energética e atrativa em termos de custo.

A FIGURA 33 apresenta de forma resumida, uma visão geral do controle eletrônico utilizado atualmente, que reúne diversas opções de comunicação, propiciando assim, a realização do controle tanto pelo método local (via IHM frontal), quanto pelo método remoto, onde se utilizam as opções de redes industriais específicas, do tipo CANopen, Ethernet, Profibus, DeviceNet e outras.



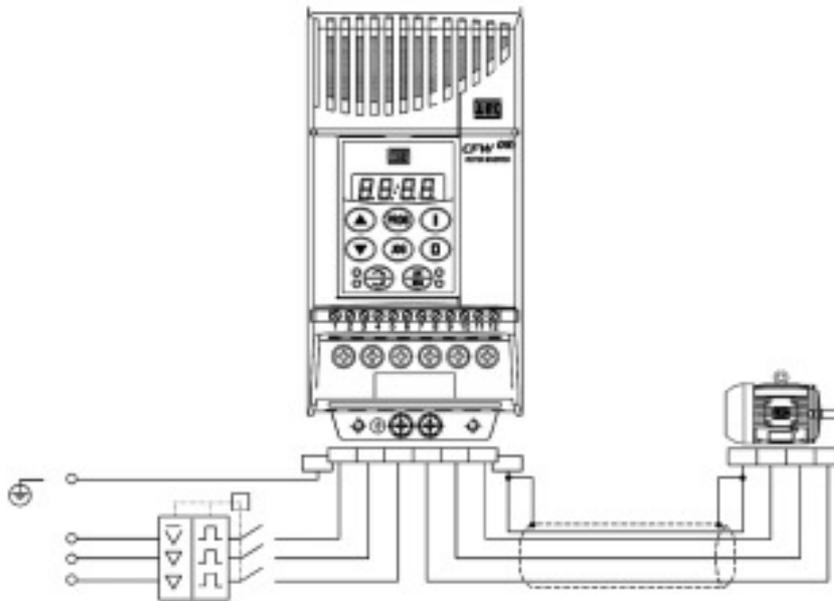
(fonte: Manual Técnico do Inversor CFW08)

FIGURA 33 – Elementos de controle em blocos de um Inversor de Frequência.

Ao comparar os recursos existentes nos equipamentos apresentados nas figuras 30 e 33, fica claro que a figura 33 possui diversos blocos de controle além da figura 30. Assim, pode-se evidenciar que o sistema de controle interno dos Inversores de Frequência é dotado de vários recursos específicos, capazes de controlar o disparo da eletrônica de potência utilizada para chaveamento das fases até o MIT, fato pouco configurável na Soft-Starter.

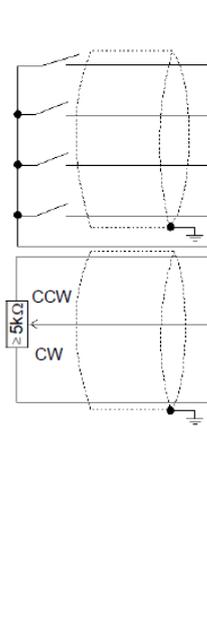
As figuras 34 e 35 apresentam uma sugestão de acionamento eletrônico, onde é utilizado o Inversor de Frequência modelo CFW08, da empresa WEG, que possui um simples e rápido método de conexão dos cabos de potência e comando, possibilitando assim, fácil interpretação por todos os usuários técnicos que o utilizarem. Possui também, uma interface de comunicação inserida no frontal, que é dotada de botões e display para configuração rápida, permitindo a total parametrização do dispositivo de forma simples e objetiva.

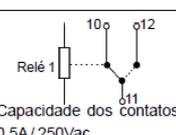
É válido ressaltar que existem atualmente, diversos modelos de equipamentos semelhantes ao Inversor de Frequência apresentado nesta obra, que estão disponíveis para comercialização, sendo fornecidos pelos mais variados fabricantes do ramo, sejam nacionais ou internacionais.



(fonte: Manual Técnico do Inversor CFW08)

FIGURA 34 – Exemplo de Diagrama de Potência para os sistemas de partida com Inversores de Frequência do fabricante WEG.



Conector XC1	Descrição		Especificações
		Função Padrão de Fábrica	
1	DI1	Entrada Digital 1	4 entradas digitais isoladas
		Habilita Geral (remoto)	
		Entrada Digital 2	
		Sentido de Giro (remoto)	
2	DI2	Entrada Digital 2	Nível alto mínimo: 10Vcc
		Sentido de Giro (remoto)	Nível alto máximo: 30Vcc
3	DI3	Entrada Digital 3	Nível baixo mínimo: 3Vcc
		Reset	Corrente de Entrada: -11mA @ 0Vcc
4	DI4	Entrada Digital 4	Corrente de Entrada Máxima: -20mA
		Gira/Pára (remoto)	
5	GND	Referência 0V	Não interligada com o PE
6	AI1	Entrada Analógica 1	0 a 10Vcc ou 0(4) a 20mA (fig. 3.10).
		Referência de frequência (remoto)	Impedância: 100kΩ (entrada em tensão), 500Ω (entrada em corrente). Resolução: 7bits. Tensão máxima de entrada: 30Vcc
7	+10V	Referência para o potenciômetro	+10Vcc, ± 5%, capacidade: 2mA
8		Sem Função	
9		Sem Função	
10	NF	Contato NF do Relé 1	
		Sem Erro	
11	Comum	Ponto Comum do Relé 1	Capacidade dos contatos: 0,5A / 250Vac
12	NA	Contato NA do Relé 1	
		Sem Erro	

(fonte: Manual Técnico do Inversor CFW08)

FIGURA 35 – Exemplo de Diagrama de Comando para os sistemas de partida com Inversores de Frequência do fabricante WEG.

### 3.5.3 Acionamento via Inversor de Frequência com CLP incorporado

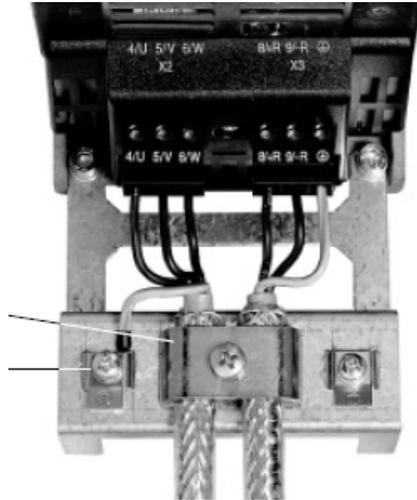
Em um passado não muito distante, era muito comum a utilização de dispositivos independentes para o acionamento e controle do MIT.

Com o avanço tecnológico cada vez mais presente na atualidade e novas exigências surgindo na área em pauta, oriundas de novas normalizações, novas aplicações e outras causas, surgiram os inversores de frequência com um novo conceito, onde todas as funções existentes anteriormente foram preservadas, porém, com uma grande inovação em evidência – O CLP (Controlador Lógico Programável) incorporado ao mesmo invólucro, integrando diretamente seus comandos e funções de programação com os inversores de frequência, tornando-os assim, um drive totalmente dedicado, apto para o acionamento do MIT através de software específico, fornecido juntamente com o equipamento ou diretamente ao terminal de IHM (Interface Homem Máquina) opcionalmente inserido no frontal do equipamento.

Para melhor ilustração e com o objetivo de ampliar os conhecimentos sobre o dispositivo em análise, este trabalho apresentará a diante, diversos detalhes do drive de potência e controle da família MOVIDRIVE, pertencente à empresa SEW Automação Ltda, por acreditar que a mesma possui ampla faixa de opções e detalhes altamente qualificados.

A FIGURA 36 apresenta sucintamente as conexões de potência (entrada e saída) para o dispositivo adotado como referência de estudo dos inversores inteligentes, bem como

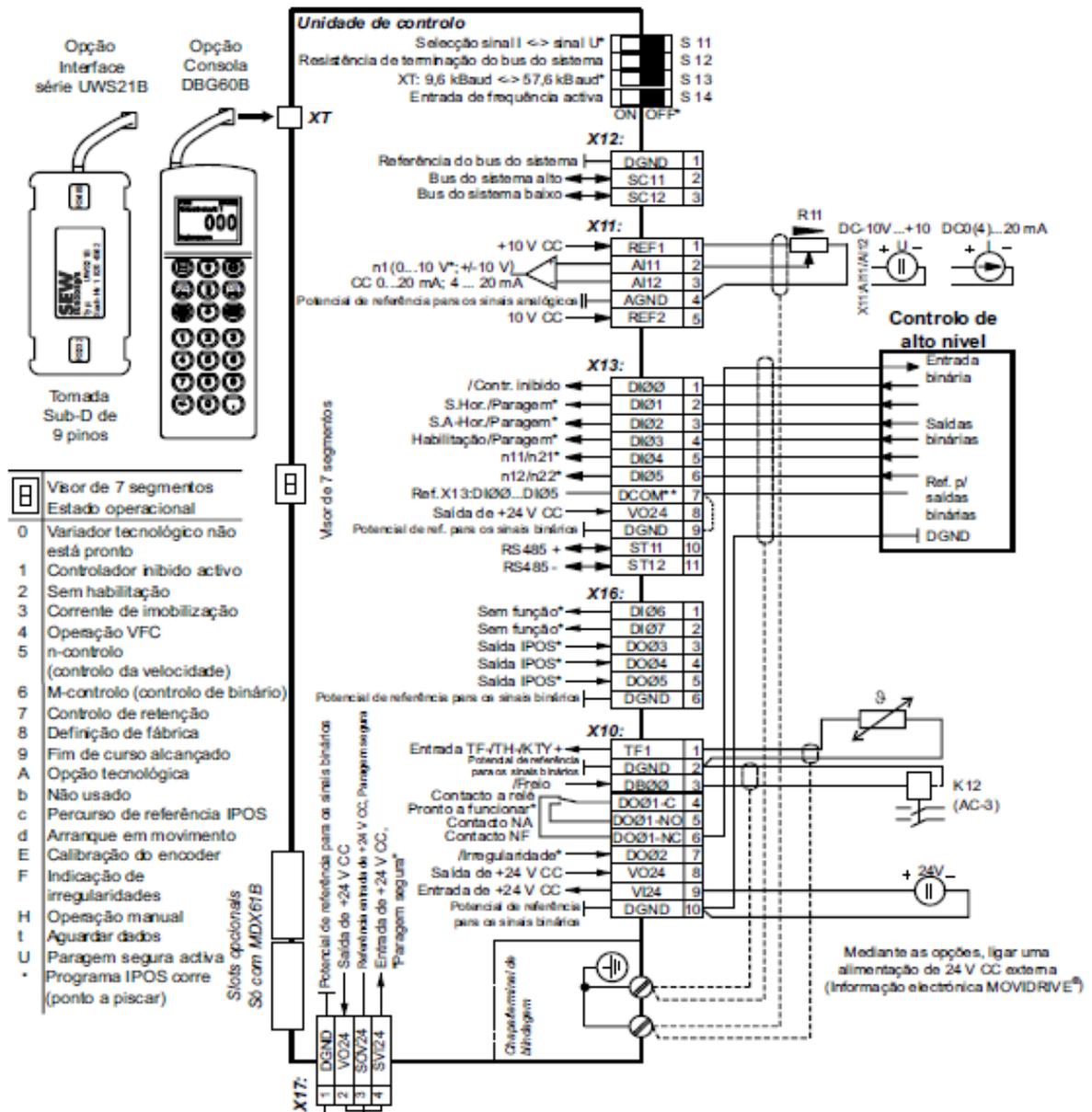
a evidência da necessidade de se utilizar o condutor PE (aterramento exclusivo) para o drive.



(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 36 – Exemplo de Conexão de potência para o Movidrive.

Na FIGURA 37, as conexões de comando são detalhadas com clareza. É válido ressaltar a ampla faixa de opções disponíveis para a implementação de um sistema de comando e controle, destinado ao acionamento do MIT e também, ao fornecimento de dados importantes para o controle do processo industrial.



(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 37 – Exemplo de Conexão para comando do Movidrive.

O fabricante dispõe de uma vasta diversidade de acessórios que podem ser incorporados ao drive em análise (nos slots<sup>9</sup> do bastidor base) e dentre eles, é válido destacar a placa de expansão digital identificada pelo código DIO11B. Esta placa de expansão incorpora ao drive, diversas entradas e saídas, divididas entre digitais e analógicas, que por sua vez, podem assumir integralmente as etapas do processo que anteriormente, eram realizadas apenas pelos CLPs.

Dessa forma, obtém-se um “drive inteligente”, que acumula as funções de um simples inversor (partida, controle e parada do MIT) e também, as funções de controle avançadas, tais como: comunicação com encoders<sup>10</sup>, resolvers<sup>11</sup>, IHMs simples ou gráficas,

portas seriais para acesso ao drive via PC, comunicação em rede entre drivers (mestre e escravo), existentes no mesmo processo e redes industriais como RS-485, Ethernet e outras.

Segundo informações fornecidas pelo fabricante deste equipamento, dentre as inúmeras aplicações possíveis para o mesmo, destacam-se os casos de posicionamento em alta precisão da máquina, onde se exige controle contínuo do produto final desejado. Para isso, se faz necessário utilizar um gerador de pulsos do tipo resolver, que informa a exata posição do MIT em relação ao realizar do processo.

Exemplificando o posicionamento preciso, é válido citar a aplicação em perfiladeiras, onde a máquina recebe uma bobina de chapa metálica que deverá ser transformada em perfis com dobras e tamanho pré-determinados, sendo inseridas suas medidas via IHM ou via software diretamente conectado ao PC. Nesse caso, a utilização de um resolver informará o drive da correta posição da peça a ser cortada, mediante combinações matemáticas realizadas na memória interna integrada com a CPU própria do drive, o que proporciona erro de posicionamento praticamente desprezível.

O MIT é submetido à aceleração e desaceleração a cada peça produzida, sendo controlado exclusivamente pelo “inversor inteligente” aqui chamado de Movidrive.

A FIGURA 38 apresenta uma configuração comumente encontrada para a placa de expansão citada anteriormente, composta por entradas e saídas digitais (tipo P ou N) e analógicas (0 – 10V e/ou 4 – 20 mA), sendo alimentadas com tensão de 24Vcc.

---

**Notas:**

9. slots são espaços disponíveis no bastidor (espécie de placa mãe) dos CLPs e inversores inteligentes.

10. encoder é um sensor de posicionamento, do tipo gerador de pulsos, que geralmente está acoplado mecanicamente no eixo do MIT a ser monitorado.

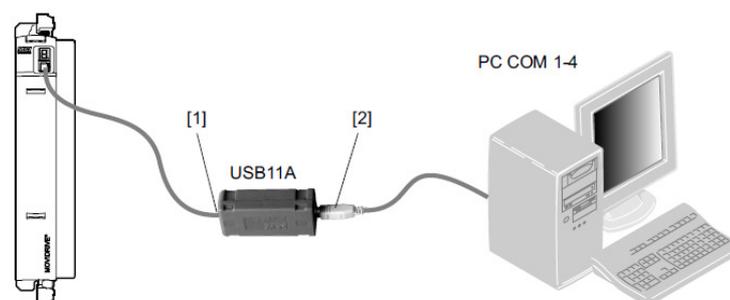
11. resolver é um sensor de posicionamento também gerador de pulsos em alta frequência, porém, com altíssima resolução, destinado ao controle de alta precisão.

Vista frontal da DIO11B	Terminal	Função	
	X20:1/2	AI21/22	Entrada de referência n2, -10 V...0...10 V CC ou 0...10 V CC (Entrada diferencial ou entrada com potencial de referência AGND)
	X20:3	AGND	Potencial de referência para sinais analógicos (REF1, REF2, AI..., AO...)
	X21:1	AOV1	Saída analógica em tensão V1, definição de fábrica: "velocidade actual"
	X21:4	AOV2	Saída analógica em tensão V2, definição de fábrica: "corrente de saída"
			Capacidade de carga das saídas analógicas em tensão: $I_{máx} = 10$ mA CC
	X21:2	AOC1	Saída analógica em corrente C1, definição de fábrica: "velocidade actual"
	X21:5	AOC2	Saída analógica em corrente C2, definição de fábrica: "corrente de saída"
			P642/645 "Modo de operação AO1/2" é válido, tanto para as saídas em tensão V1/2 (-10 V...0...10 V CC), como para as saídas em corrente C1/2 (0(4)...20 mA) CC.
			Opções de selecção para as saídas analógicas → Menu de parâmetros P640/643
			Comprimento máx. admitido para os cabos: 10 m / tensão máxima de saída: 15 V <sub>CC</sub>
	X21:3/6	AGND	Potencial de referência para sinais analógicos (REF1, REF2, AI..., AO...)
	X22:1...8	DI10...17	Entradas binárias 1...8, definição de fábrica "Sem função" As entradas binárias estão isoladas electricamente com opto-acopladores.
	X22:9	DCOM	Opções de selecção para as entradas binárias → Menu de parâmetros P61_
	X22:10	DGND	Potencial de referência para as entradas binárias DI10...17
		Potencial de referência para sinais binários	
		- sem shunt entre X22:9 e X22:10 (DCOM-DGND) → entradas binárias isoladas	
		- com shunt entre X22:9 e X22:10 (DCOM-DGND) → entradas binárias não isoladas	
X23:1...8	DO10...17	Saídas binárias 1...8, com definição de fábrica "Sem função" Capacidade das saídas binárias: $I_{máx} = 50$ mA CC (à prova de curto-circuito e protegido contra tensão externa até 30 V <sub>CC</sub> ) <b>Não ligar tensões externas nas saídas binárias!</b>	
X23:9	24VIN	Tensão de alimentação +24 V <sub>CC</sub> para saídas binárias DO10 ... DO17, não isoladas (potencial de referência DGND)	

(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 38 – Placa de expansão digital e analógica do Movidrive.

Como exemplo de conexão via porta serial ou USB do PC, visando o acesso e manipulação de informações em tempo real via software, é apresentada na FIGURA 39, a conexão sugerida pelo fabricante do equipamento.

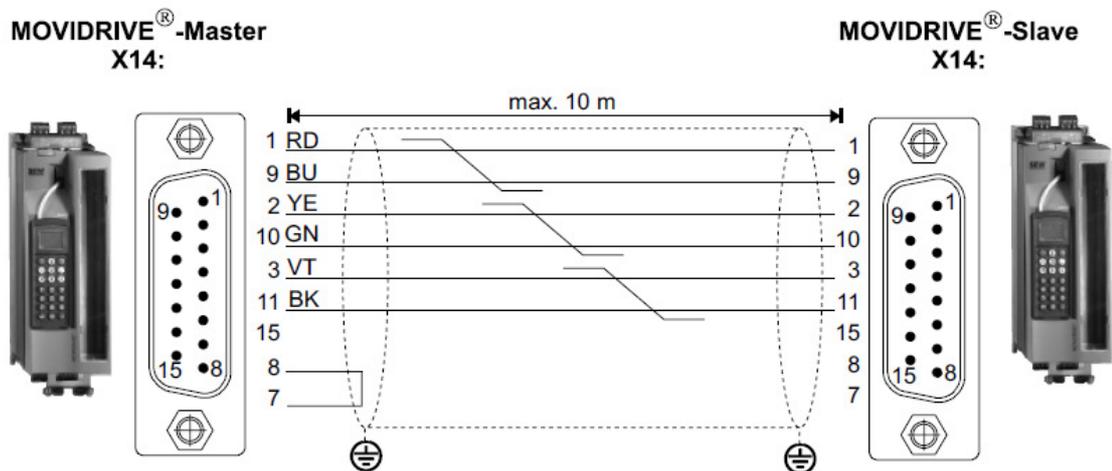


(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 39 – Cabo de comunicação entre drive e PC.

Como já citado anteriormente, em determinadas aplicações se faz necessário o uso de 02 ou mais MIT, que devem ser controlados simultaneamente por seus respectivos acionamentos inteligentes. Para isso, a função utilizada é a conexão conhecida como “mestre-escravo”, onde o controlador central é inserido sempre no drive de maior potência a ser acionada e desse ponto, estabelece a comunicação com os demais equipamentos de controle existentes no processo.

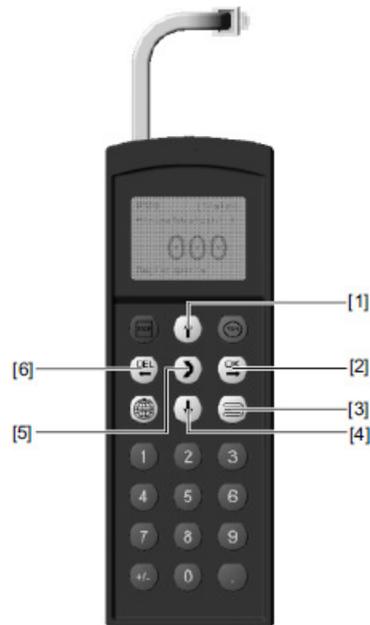
A FIGURA 40 apresenta a conexão detalhada dos terminais de acesso para a configuração “mestre-escravo” entre 02 acionamentos inteligentes. Caso seja necessário um terceiro drive, a pinagem em ambos os lados deve obedecer à conexão “slave” existente ao lado direito da FIGURA 40.



(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 40 – Cabo de comunicação entre drives tipo mestre-escravo.

Seja qual for a configuração necessária para a aplicação a ser executada, o terminal de conexão local (IHM) será sempre possível de ser inserido no sistema, possibilitando ajustes diversos que sejam necessários ao melhor desempenho do processo. Para melhor ilustração do modelo específico de IHM a ser utilizada, a FIGURA 41 apresenta o modelo padrão e suas teclas principais.



- [1] Tecla  Sobre para o próximo item do menu
- [2] Tecla  Confirma a introdução
- [3] Tecla  Activa o menu de contexto
- [4] Tecla  Desce para o próximo item do menu
- [5] Tecla  Mudança de menu, modo de indicação ↔ modo de edição
- [6] Tecla  Cancela ou termina a colocação em funcionamento

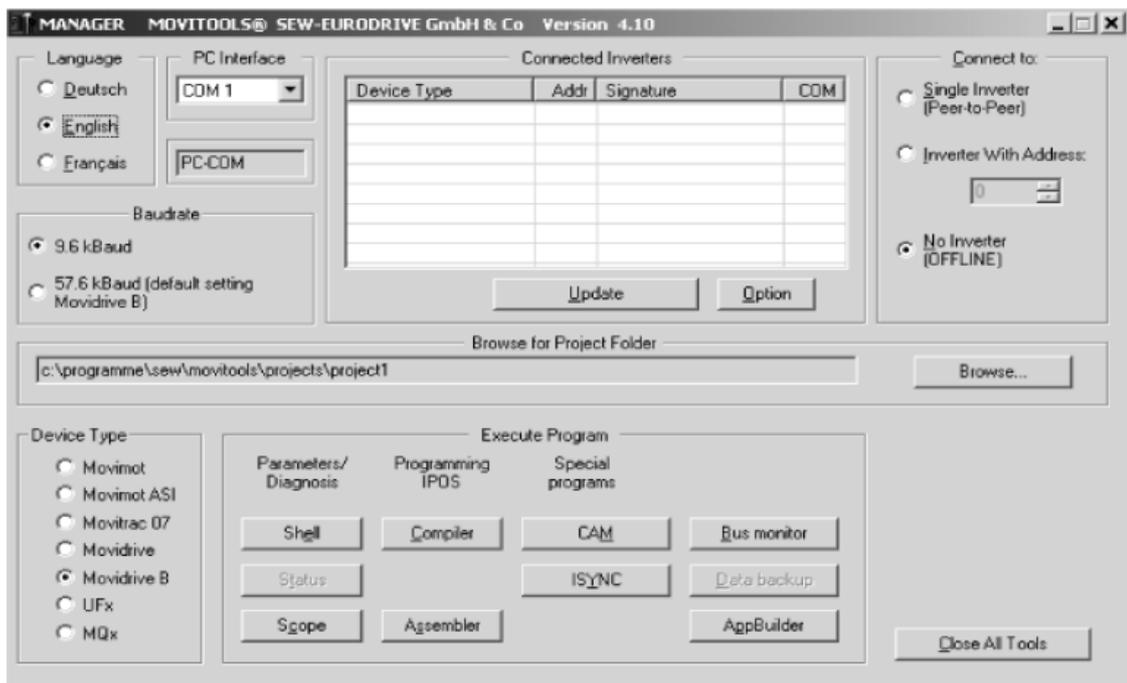
(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 41 – Terminal de comunicação local - IHM.

Quando se faz necessário o controle centralizado do sistema, em tempo real, com a necessidade de se obter informações sobre a realização do processo, bem como a emissão de relatórios para conferência, dentre outros, é possível a utilização de um software dedicado, cuja tela inicial é apresentada na FIGURA 42.

Vale lembrar que toda a parametrização do sistema a ser implementado também é possível de ser inserida via software, através da inserção dos respectivos endereços de rede, pré-estabelecidos inicialmente nos drives.

Para finalizar, a FIGURA 43 apresenta os modelos de drives inteligentes, dos tamanhos 01 até 06, que variam dependentemente da potência do MIT a ser acionado.



(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 42 – Tela inicial do software dedicado.

Séries  
**MOVIDRIVE®**  
**MDX61B,**  
tamanhos 1 até 6



(fonte: Manual Técnico do Movidrive SEW)

FIGURA 43 – Modelos de drives existentes atualmente.

### 3.5.4 Variação de velocidade de motores de indução

A relação entre a rotação, a frequência de alimentação, o número de pólos e o escorregamento de um motor de indução, obedece à seguinte equação:

$$n = \frac{120 \cdot f_1}{p} (1 - s) \quad (04)$$

Onde:

$n$ : velocidade (rotação mecânica) por minuto (rpm);

$f_1$ : frequência fundamental da tensão de alimentação (Hz);

$p$ : número de pólos;

$s$ : escorregamento.

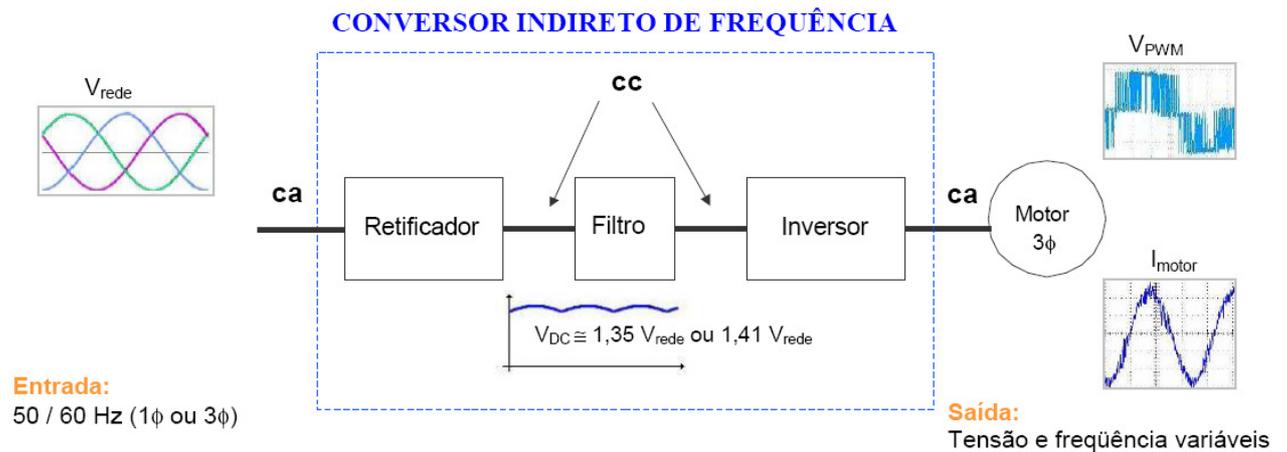
A utilização de conversores estáticos de frequência atualmente compreende o método mais eficiente para controlar a velocidade dos motores de indução. Os conversores transformam a tensão da rede, de amplitude e frequência constantes, em uma tensão de amplitude e frequência variáveis. Variando-se a frequência da tensão de alimentação, varia-se também a velocidade do campo girante e conseqüentemente a velocidade mecânica de rotação da máquina.

Conversores estáticos indiretos de frequência com tensão imposta PWM são atualmente os equipamentos mais empregados para a alimentação de motores de baixa tensão nas aplicações industriais que requerem variação de velocidade e operam como uma interface entre a fonte de energia (rede elétrica) e o motor de indução.

O processo de obtenção da tensão e frequência desejadas por meio de tais equipamentos passam por três estágios:

- 1- **Ponte de diodos** - Retificação do sinal alternado - de tensão e frequência constantes - proveniente da rede de alimentação;
- 2- **Filtro ou Link DC** - Alisamento/regulação da tensão retificada com armazenamento de energia por meio de um banco de capacitores;
- 3- **Transistores IGBT** - Inversão da tensão contínua proveniente do link DC, num sinal alternado, com tensão e frequência variáveis.

A FIGURA 44 ilustra claramente os estágios descritos acima e exemplifica os sinais de entrada (proveniente da rede CA senoidal trifásica) e de saída (modulação PWM).



(fonte: Manual Técnico do Inversor CFW08)

FIGURA 44 – Diagrama simplificado do Inversor de Frequência.

Quando o motor está em vazio ou com cargas leves, a tensão no link DC tende a estabilizar no valor de  $1,41 V_{rede}$ . Quando, porém, o motor está com cargas mais elevadas (por exemplo, plena carga), a tensão no link DC tende ao valor:

$$(3/\pi) * 1,41 V_{rede} = 1,35 V_{rede} \quad (05)$$

### 3.5.5 Modos de controle

Para os sistemas de partida eletrônicos, existem basicamente dois tipos de controle, conhecidos com escalar e vetorial.

O controle escalar baseia-se no conceito original do conversor de frequência: impor no motor uma determinada tensão/frequência, visando manter a relação V/f constante, ou seja, fazendo o motor trabalhar com fluxo aproximadamente constante.

Este método de controle é aplicado quando não há necessidade de respostas rápidas a comandos de torque e velocidade, sendo particularmente interessante quando há conexão de múltiplos motores a um único conversor. O controle é realizado em malha aberta e a precisão da velocidade é obtida em função do escorregamento do motor, que varia em consequência da carga.

Para melhorar o desempenho do motor em baixas velocidades, alguns conversores possuem funções especiais como a compensação de *escorregamento* (que atenua a variação da velocidade em função da carga) e o *boost de tensão* (aumento da relação V/f para compensar o efeito da queda de tensão na resistência estatórica), de maneira que a capacidade de torque do motor seja mantida.

O controle vetorial possibilita atingir um elevado grau de precisão e rapidez no controle do torque e da velocidade do motor. Este controle decompõe a corrente do motor em dois vetores, que produzem fluxo magnetizante e torque respectivamente, tendo ainda, a capacidade de regular separadamente as duas variáveis.

O controle vetorial em malha aberta, também conhecido como “*Sensorless*”, é o mais simples, porém, apresenta limitações de torque principalmente em baixíssimas rotações. Em velocidades maiores é praticamente tão bom quanto o controle vetorial com realimentação.

Já o controle em malha fechada, requer a instalação de um sensor de velocidade (por exemplo, um encoder) no motor. Esse tipo de controle permite a maior precisão possível no controle da velocidade e do torque, inclusive em rotação zero.

A principal diferença entre os dois tipos de controle é que o controle escalar só considera as amplitudes das grandezas elétricas instantâneas (fluxos, correntes e tensões), referindo-as ao estator e seu equacionamento baseia-se no circuito equivalente do motor, ou seja, são equações de regime permanente. Já o controle vetorial admite a representação das grandezas elétricas instantâneas por vetores, baseando-se nas equações espaciais dinâmicas da máquina, com as grandezas referidas ao fluxo enlaçado pelo rotor, ou seja, o motor de indução é visto pelo controle vetorial como um motor de corrente contínua, havendo regulação independente para torque e fluxo.

### 3.6 FATORES POSITIVOS E NEGATIVOS

Não é por acaso que tem crescido significativamente o número de aplicações em que a variação de velocidade de motores de indução é feita por meio de conversores eletrônicos estáticos de frequência, pois muitos benefícios são propiciados por essas aplicações:

- 1- **Controle a distância** – nos sistemas eletrônicos de variação de velocidade, o equipamento de controle pode situar-se em uma área conveniente, ficando apenas o motor acionado na área de processamento; ao contrário dos sistemas hidráulicos e mecânicos de variação de velocidade.
- 2- **Redução de custos** – partidas diretas ocasionam picos de corrente, que causam danos não apenas ao motor, mas também a outros equipamentos ligados ao sistema elétrico. Conversores estáticos proporcionam partidas mais suaves, reduzindo custos com manutenção.

- 3- **Aumento de produtividade** – sistemas de processamento industrial geralmente são sobre dimensionados na perspectiva de um aumento futuro de produtividade. Conversores estáticos possibilitam o ajuste da velocidade operacional mais adequada ao processo, de acordo com os equipamentos disponíveis e a necessidade de produção a cada momento.
- 4- **Eficiência energética** – o rendimento global do sistema de potência depende não apenas do motor, mas também do controle. Os conversores estáticos de frequência apresentam rendimento elevado, da ordem de 97% ou mais. Motores elétricos também apresentam alto rendimento, chegando a 95% ou mais em máquinas maiores operando sob condições nominais. Na variação eletrônica de velocidade a potência fornecida pelo motor varia de maneira otimizada, influenciando diretamente a potência consumida e conduzindo a elevados índices de rendimento do sistema (motor + conversor).
- 5- **Versatilidade** – conversores estáticos de frequência são adequados para aplicações com qualquer tipo de carga. Com cargas de torque variável (pequena demanda de torque em baixas rotações), o controle reduz a tensão do motor compensando a queda de rendimento que normalmente resultaria da diminuição de carga. Com cargas de torque (ou potência) constante a melhoria de rendimento do sistema provém da capacidade de variar continuamente a velocidade, sem necessidade de utilizar múltiplos motores ou sistemas mecânicos de variação de velocidade (como polias e engrenagens), que introduzem perdas adicionais.
- 6- **Maior qualidade** – o controle preciso de velocidade obtido com conversores resulta na otimização dos processos que por sua vez, proporciona um produto final de melhor qualidade.

Em contrapartida, existem fatores que influenciam negativamente no sistema elétrico em geral:

- 1- **Geração de Harmônicas na rede elétrica** – o controle preciso de velocidade obtido com conversores resulta na geração de distorções Harmônicas de tensão na rede de entrada. Basicamente, para reduzir as harmônicas geradas por um conversor de frequência PWM, existem as seguintes soluções, apresentadas na TABELA 04:

TABELA 04 – Prováveis soluções para redução de Harmônicos produzidos pelos conversores.

<b>Método de redução das harmônicas</b>	<b>Características da solução</b>
Instalação de filtros passivos de saída (L, LC (senoidal), dV/dt)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento do custo da instalação</li> <li>- Restrições para operação nos modos vetoriais</li> <li>- Queda de tensão (redução da potência do motor)</li> </ul>
Utilização de conversor com mais níveis	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Aumento de custos</li> <li>- Redução de confiabilidade do conversor</li> <li>- Aumento da complexidade do controle</li> </ul>
Melhoria na qualidade da modulação PWM (aprimoramento do padrão de pulsos)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Space Vector Modulation (SVM)*</li> <li>- Não aumenta custos</li> <li>- Melhoria no controle de tensão</li> <li>- Maior rendimento do conjunto (motor + conversor)</li> </ul>
Aumento da frequência de chaveamento	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução do rendimento do conversor (aumento das perdas por chaveamento)</li> <li>- Aumento das correntes de fuga para a terra</li> </ul>

(fonte: Manual Técnico do Inversor CFW08)

## 4 METODOLOGIA

O método utilizado para levantar dados sobre o avanço tecnológico das técnicas de acionamento do MIT consiste de uma breve entrevista (Apêndice) envolvendo técnicos da área, que atuam em empresas desenvolvedoras de equipamentos e/ou máquinas operatrizes, que por sua vez, são acionadas pelos MIT.

Tal entrevista tem por objetivo, a obtenção de informações sobre o histórico do equipamento, partindo de suas versões iniciais até os atualmente fabricados e comercializados, relatando os fatores positivos e negativos de cada caso.

Para evidenciar que os avanços tecnológicos contribuem positivamente para o aumento significativo do rendimento dos processos produtivos que envolvem diretamente o uso dos MIT, foram previstas três entrevistas, envolvendo em cada uma delas, empresas de diferentes áreas de atuação.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 CASO 01: Atividade Moveleira

Como primeiro exemplo de aplicação dos sistemas de partida automatizados, é apresentado o caso muito conhecido pela indústria moveleira.

O exemplo se aplica à máquina denominada Seccionadora Automática, utilizada para a execução dos cortes em chapas de madeira e/ou MDF, que por sua vez, são utilizadas na construção de móveis e similares. Tal exemplo foi apresentado pela Empresa CRS Máquinas e Equipamentos Ltda., que atua no seguimento de construção de máquinas operatrizes e gentilmente respondeu a pesquisa proposta.

Segundo a Empresa CRS, a inclusão de dispositivos eletrônicos destinados à partida e ao controle do MIT, proporcionou um acréscimo estipulado entre 15 e 25% na produção da máquina. A empresa cita também, que uma das melhorias específicas foi inserida no acionamento responsável pelo avanço e recuo da serra circular, onde anteriormente, ambos os movimentos eram realizados através de um MIT auxiliar, sempre acionado em 60 Hz. Hoje, o movimento de avanço pode ser controlado geralmente entre 20 a 120 Hz, dependendo do material e do número de chapas a serem cortadas ao mesmo tempo.

Paralelamente, o movimento de recuo atualmente é realizado via velocidades programadas no inversor de frequência utilizado, onde a faixa de operação pode variar geralmente, entre 60 e 180 Hz, proporcionando um movimento resultante de até três vezes mais rápido, quando comparado com o antigo método tradicional.

A empresa relata ainda, que outra melhoria implementada, foi a utilização de uma IHM para o gerenciamento do trabalho da máquina e dependendo do caso, a mesma poderá estar interligada com uma estação central de gerenciamento, que pode ser, por exemplo, o servidor de produção que gerencia todas as etapas do processo, compreendendo desde a criação do desenho, até a embalagem final das peças de madeira, proporcionando assim, o envio de informações para a execução do trabalho, diretamente de uma sala de controle central ou similar. Assim, resta ao operador, apenas o trabalho de alimentar adequadamente o pórtico de entrada da máquina, para que se realize todo o restante do ciclo automaticamente.

Como investimento, estima-se que apenas no início (por volta do ano de 2006), houve um ligeiro acréscimo nos custos de fabricação da máquina, devido à inclusão de novas tecnologias. Porém, a empresa relata ainda, que tais valores estão se tornando cada dia mais acessíveis por diversos fatores, dentre eles, pela expansão da produção dos inversores e acessibilidade na aquisição dos mesmos.

Em contrapartida, os benefícios na produção são consideráveis, pois ao reduzir o tempo de retorno da serra, o próximo ciclo de corte poderá ser iniciado com maior rapidez e assim sucessivamente, ocasionando um resultado extremamente positivo no final do dia ou turno de trabalho. Estima-se um acréscimo útil de aproximadamente 25% na produção, além de grandes melhorias na precisão, uniformidade e no sincronismo do equipamento.

## 5.2 CASO 02: Atividade Metalúrgica

Como segundo exemplo de aplicação dos sistemas de partida automatizados, é apresentado o projeto elétrico através do Anexo A, cujo objetivo é apresentar outra possível aplicação para os inversores de frequência.

O projeto elétrico se aplica à máquina denominada Perfiladeira Automática, utilizada para a execução dos cortes e dobras em chapas metálicas em geral, que por sua vez, são utilizadas na construção de carrocerias para caminhões e similares. Tal projeto é de propriedade da Empresa POLITEC Automação e Assistência Técnica Ltda., que atua no seguimento de construção e automatização de máquinas operatrizes e que gentilmente contribuiu com informações valiosas para a realização desta pesquisa.

A empresa relata que após a inclusão dos inversores de frequência, foi possível aumentar a capacidade produtiva da máquina entre 20 e 40%, dependendo da peça a ser confeccionada. Relata também, que a principal melhoria foi obtida no acionamento do desbobinador, que atualmente trabalha durante todo o ciclo de operação da máquina, acelerando e desacelerando o MIT conforme o processo exige, evitando assim, altos picos de corrente elétrica durante as sucessivas partidas (entre 20 e 30 por hora) que anteriormente eram necessárias para o desenvolvimento do mesmo ciclo.

Paralelo a isso, outra melhoria obtida foi no controle de rotação dos anéis perfilantes, acionados pelo “motor\_3 Perfiladeira”, que por intermédio do seu respectivo inversor de frequência, se movimenta lentamente (entre 20 e 30 Hz) durante o início e término das dobras da peça e rapidamente (entre 80 e 120 Hz) durante o intervalo necessário para realizar a dobra de cada peça. Com isso, por alguns instantes, a máquina atinge o dobro de sua velocidade antiga, quando até então, era acionada constantemente em 60 Hz.

Da mesma forma que o caso anterior, aqui também é utilizada uma IHM para o controle, monitoramento e interação com o usuário, visando otimizar o tempo de parada do processo, dentre outros.

Com relação aos investimentos iniciais, houve um acréscimo de aproximadamente 40% nos custos de produção da máquina, fato que atualmente, devido às facilidades de obtenção dos inversores, estão praticamente imperceptíveis.

### 5.3 CASO 03: Atividade Alimentícia

A Empresa Inter-Ar Refrigeração Industrial Ltda., possui atualmente, um método de controle de resfriamento, denominado “Controle VRF”, que consiste na variação do líquido refrigerante do compressor central que está integrado ao sistema de ar condicionado.

O método citado utiliza um inversor de frequência para o acionamento e controle do MIT principal do sistema, que é capaz de proporcionar a variação de resfriamento (acionamento entre 30 e 70 Hz) de acordo com a demanda, praticamente em tempo real. A variação ocorre devido à movimentação oscilante do gás refrigerante, sendo que, para a maior demanda de resfriamento exigida, será elevada para máxima, a rotação do MIT, enquanto que, para a menor demanda, a rotação será mínima.

Este método de controle por variação de demanda possibilita alto desempenho de controle da temperatura ambiente e como exemplo, a Empresa cita a linha de embalagem de frangos e seus derivados em frigoríficos em geral, além de proporcionar maior vida útil do equipamento como um todo, pois assim, o conjunto mecânico não está sujeito aos “golpes de aríetes” oriundos do instante em que o sistema inicia ou conclui o ciclo de funcionamento.

Como opções de controle, o equipamento atual permite comunicação com as redes industriais do tipo Profibus, Devicenet, Ethernet e outras, além de possuir uma IHM para rápida visualização do estado de funcionamento do conjunto, medição de carga e monitoramento de alarmes, dentre outros.

Como fatores positivos, a Empresa relata que os clientes obtiveram uma série de benefícios e dentre os mais importantes, é válido citar a constante uniformidade da temperatura controlada, sem os arranques excessivos dos MIT, além da inexistência dos golpes nas partes mecânicas fixas e móveis do sistema como um todo, fato que propiciou um acréscimo médio de 30% na vida útil do equipamento em geral.

Observando a média atual de consumo de energia, com a utilização do sistema de controle acima descrito, o conjunto obteve uma redução aproximada de 35%, comparado com sistemas de controle convencionais.

Como consequências foram citadas as interferências harmônicas provocadas pela eletrônica de controle utilizada, porém, a Empresa menciona que até o momento não recebeu notificações sobre a necessidade de instalar sistemas e/ou mecanismos de amortecimento ou filtragem destes inconvenientes. Outro ponto de destaque é o alto custo de instalação ainda encontrado pela Empresa, porém, foi ressaltado que já existem melhoras nos custos e em breve se tornarão facilmente adquiridos.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo, apresentar o princípio de funcionamento dos motores elétricos de indução, com rotor em gaiola de esquilo e também algumas formas amplamente utilizadas na indústria de modo geral, para o acionamento dessas magníficas máquinas.

Falando em acionamentos, estes foram apresentados em dois momentos (tradicionais e avançados), sendo o primeiro, voltado para os sistemas de partidas tradicionais, já largamente utilizados há tempos, por profissionais liberais, técnicos, engenheiros eletricitas, dentre outros, atuantes nas indústrias de modo geral. Já o segundo momento, ficou restrito aos métodos de acionamentos eletrônicos, onde foram apresentadas as chaves de partida do tipo Soft-Starters e também os Conversores de Frequência. Esses dois equipamentos destinados ao acionamento e controle dos motores de indução com rotor em gaiola, são relativamente novos no mercado elétrico, porém, podem ser encontrados em diversas aplicações práticas e suas vantagens propiciadas aos sistemas são altamente perceptíveis, devido à alta faixa de regulagens disponíveis nos tais equipamentos.

Com o avanço da eletrônica de potência, os motores de indução, que já eram uma tradicional solução para acionamentos de velocidade contínua, estão sendo utilizados com sucesso também em aplicações que exijam variação de velocidade. Nesses casos, porém, o motor não é alimentado diretamente pela rede (senoidal), mas sim, por meio de um conversor estático de frequência.

A utilização de motores de indução com conversores eletrônicos apresenta grandes vantagens tanto energéticas quanto econômicas, quando comparada com outras soluções existentes para aplicações industriais de velocidade variável. No entanto, o uso de conversor traz consequências, fato que os fabricantes de motores precisam estar atentos. Assim, o crescente número de aplicações com motores de indução operando em regime de velocidade variável (acionados por conversores); exige o bom entendimento do sistema de potência como um todo e das interações que ocorrem entre as partes que o compõem (rede – conversor – motor – carga).

Percebe-se que o futuro “recheado” de sucesso na área profissional relacionada a este trabalho, depende de muitos estudos detalhados sobre os fatores negativos que poderão surgir com o advento da implementação de uma eletrônica de potência em larga escala para aplicações industriais, pois como pode ser observado nos casos detalhados no capítulo 05, todas as empresas consultadas atualmente utilizam sistemas eletrônicos para o desenvolvimento de seus processos e nenhuma delas possuem as devidas restrições quanto aos fatores negativos (Harmônicos em geral).

Finalizando, durante vários momentos de pesquisas, estudos e até mesmo em sala de aula, ficou claro que os agentes negativos causadores de distorções e outros distúrbios na rede elétrica, já estão presentes em grande parte dos estabelecimentos industriais em geral. Portanto, caberá aos próximos idealizadores de pesquisas relacionadas a esta área específica, aprofundar seus conhecimentos para propor soluções efetivas, visando contornar tais inconvenientes.

## 7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- CARVALHO, Geraldo. **Máquinas Elétricas – Teorias e Ensaio**s. 4. ed. São Paulo: Érica, 2011.
- FRANCHI, Claiton Moro. **Acionamentos Elétricos**. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.
- MARTIGNONI, Alfonso. **Máquinas de Corrente Alternada**. Porto Alegre: Globo, 1973. 410 p.
- MOREIRA, Heloi José Fernandes. **Máquinas Elétricas**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1984. 217 p. (Coleção Shaum).
- MARTIGNONI, Alfonso. **Ensaio**s de Máquinas Elétricas. 2. ed. Rio de Janeiro: Globo, 1987. 162 p.
- **WEG EM REVISTA**. Santa Catarina: Fundação WEG, 2000- . Bimestral, janeiro-fevereiro 2001.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5410. Instalações Elétricas de Baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5280. Instalações Elétricas de Baixa tensão**. Rio de Janeiro, 2000.
- **Manual do Inversor de Frequência**. Santa Catarina: 2009. 214 p. (Série CFW-08 plus).
- **Manual da Soft-Starter**. Santa Catarina: 2009. 120 p. (Série SSW-03 plus).
- **Manual do MoviDrive: MDX60B e 61B**. São Paulo: 2008. 172 p. (Série SEW-EURODRIVE).
- PIRES, Waldiberto Lima. **Manual Técnico de Motores de Indução alimentados por Conversores de Frequência PWM**. Santa Catarina: 2009. 67 p.
- FERNANDES, J. **Manual dos Inversores de Frequência Metal**tex. São Paulo: 2008. 42 p.
- **SENAI**. Apresenta apostilas, figuras e animações sobre máquinas elétricas e seus acionamentos. Disponível em: <[www.sp.senai.br/ensino/eletroeletronica](http://www.sp.senai.br/ensino/eletroeletronica)>. Acesso em 12 fev. 2011.
- **SEW**. Apresenta material específico sobre produtos da empresa. Disponível em: <[www.sew.com.br](http://www.sew.com.br)>. Acesso em: 16 jul. 2011.
- **WEG**. Apresenta material específico sobre produtos da empresa. Disponível em: <[www.weg.com.br](http://www.weg.com.br)>. Acesso em: 12 mar. 2011.

## APÊNDICE

### QUESTIONÁRIO DE PESQUISA

OBJETIVO: Levantamento de dados sobre máquinas operatrizes e equipamentos industriais que utilizam motores de indução trifásicos para acionamento.

O questionário a seguir, visa identificar os avanços tecnológicos existentes no método de acionamento utilizado para os motores de indução presentes em praticamente todas as máquinas operatrizes, bem como seus benefícios e consequências.

1- Qual máquina operatriz a empresa possui, com sistema de partida e controle do processo automatizado (Soft-Starter ou Inversor de Frequência), que poderia ser citado como exemplo?

Resp.:

2- Se este equipamento fosse instalado apenas com métodos de acionamento convencionais (manuais ou elétricos), quais seriam as limitações na produção?

Resp.:

3- Qual o principal fator POSITIVO obtido com a inclusão do método de acionamento automatizado neste equipamento?

Resp.:

4- Qual o principal fator NEGATIVO obtido com a inclusão do método de acionamento automatizado neste equipamento?

Resp.:

5- A empresa adota alguma prática específica para este equipamento, visando redução de inconvenientes emitidos para a rede elétrica local (Harmônicos e outros)?

Resp.:

6- O uso da IHM (Interface-Homem-Máquina) traz algum ganho adicional ao equipamento em análise, quando comparado aos sistemas de acionamento convencionais?

Resp.:

7- O equipamento possui controle e/ou interligação com rede industrial (Profibus, DeviceNet, Ethernet e outras)?

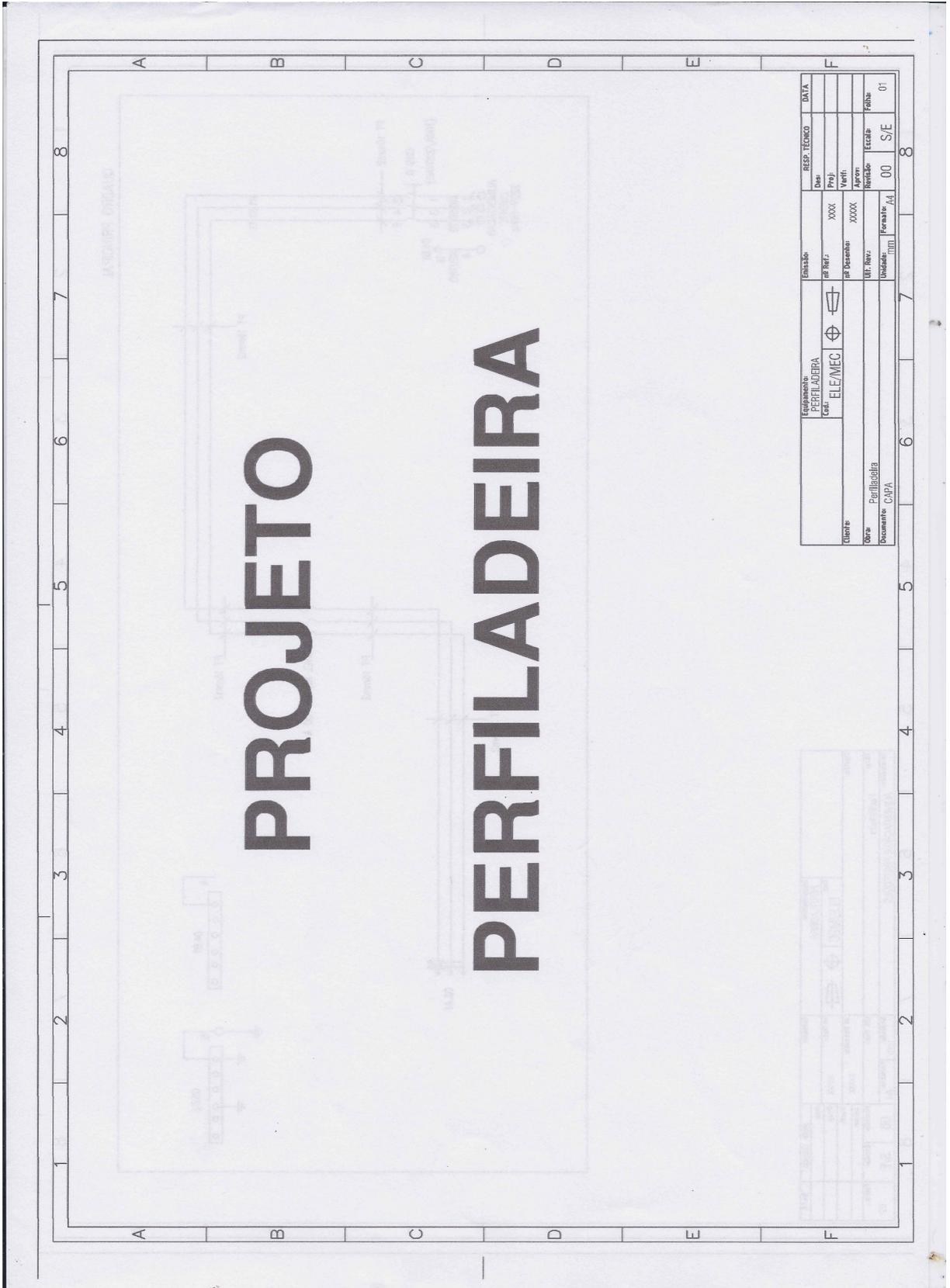
( ) SIM Qual? \_\_\_\_\_ ( ) NÃO

8- De modo geral, o uso de sistemas automatizados traz benefícios para a empresa?

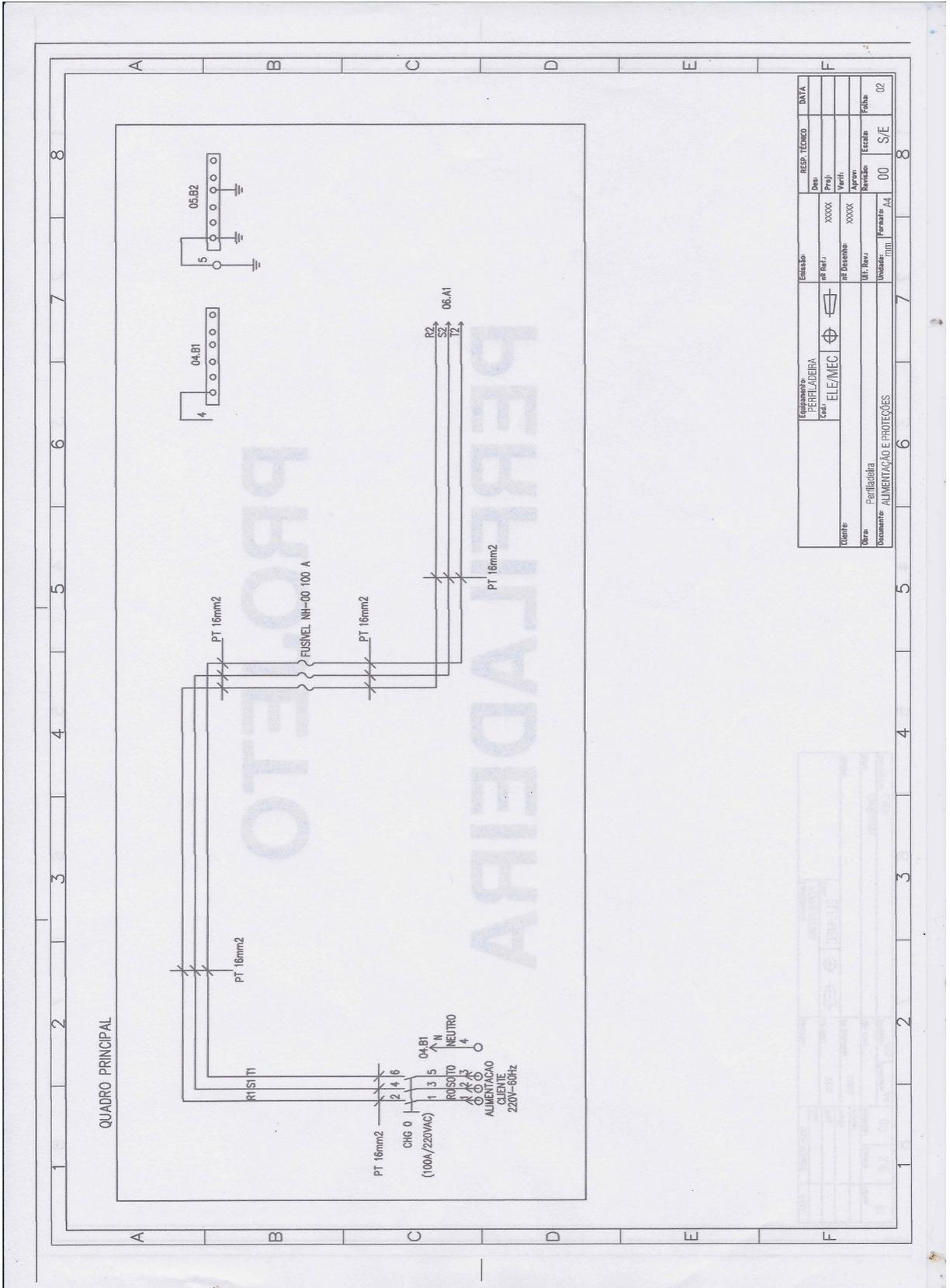
( ) SIM ( ) NÃO

## **ANEXOS**

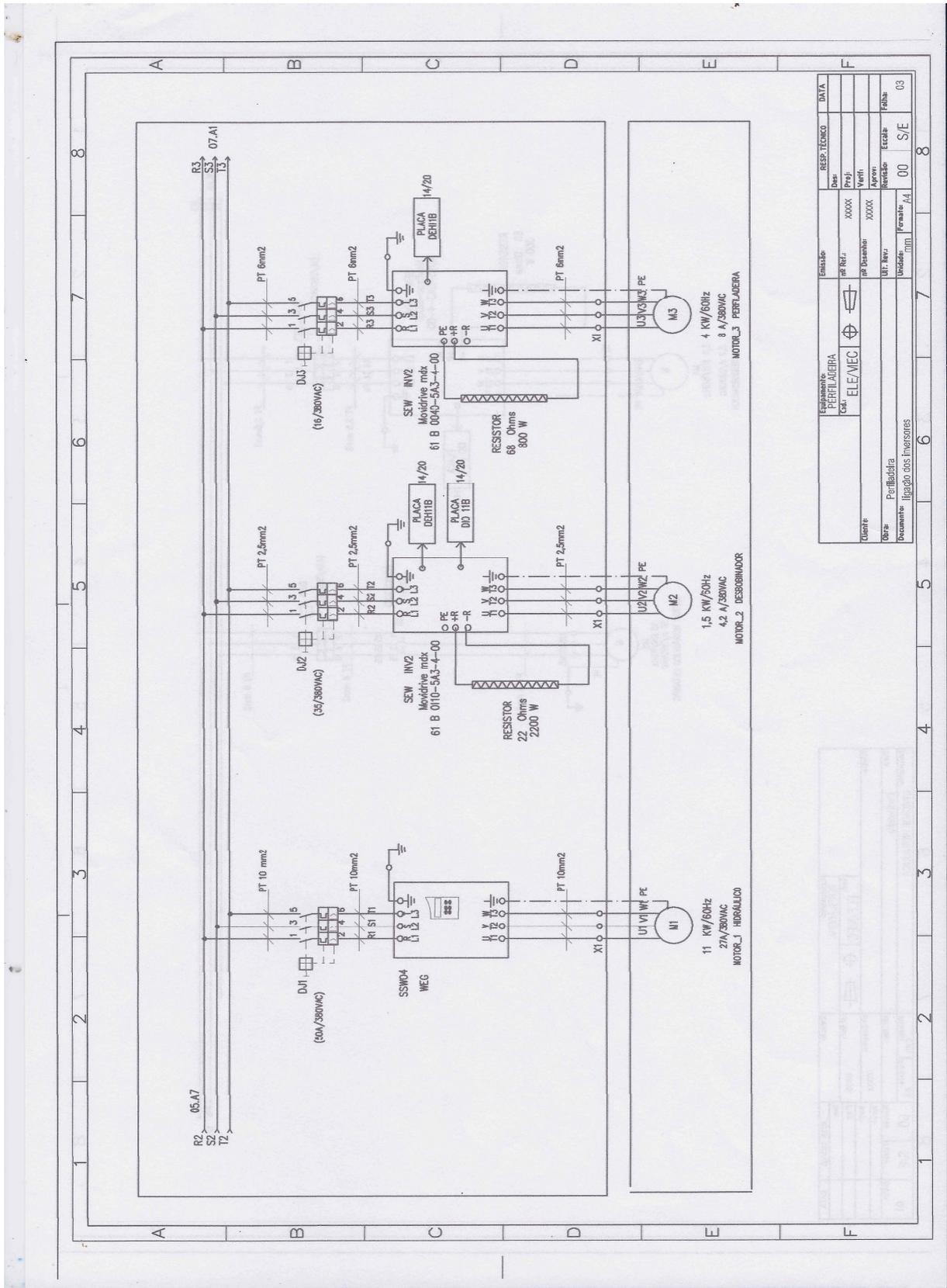
ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

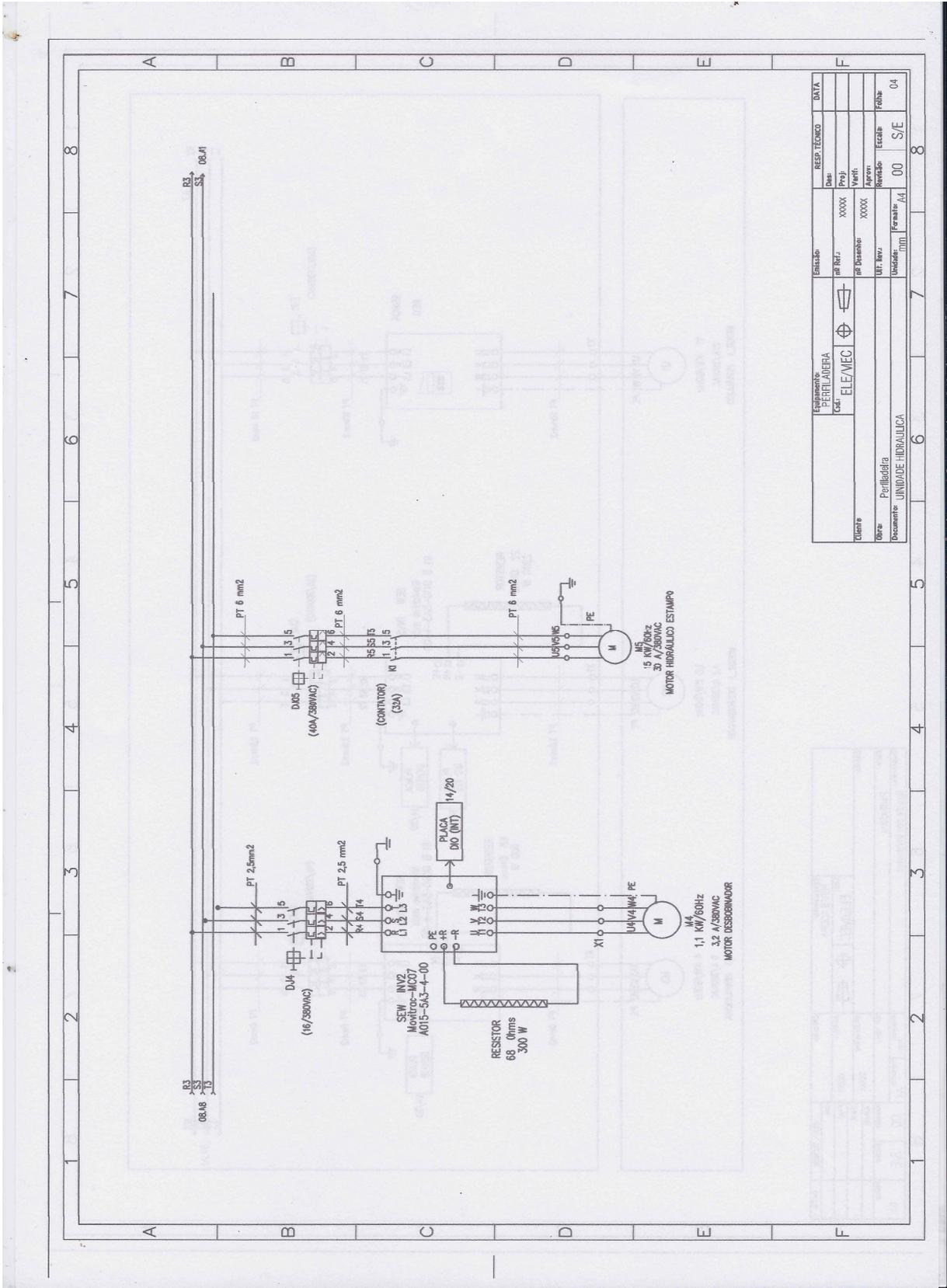


ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

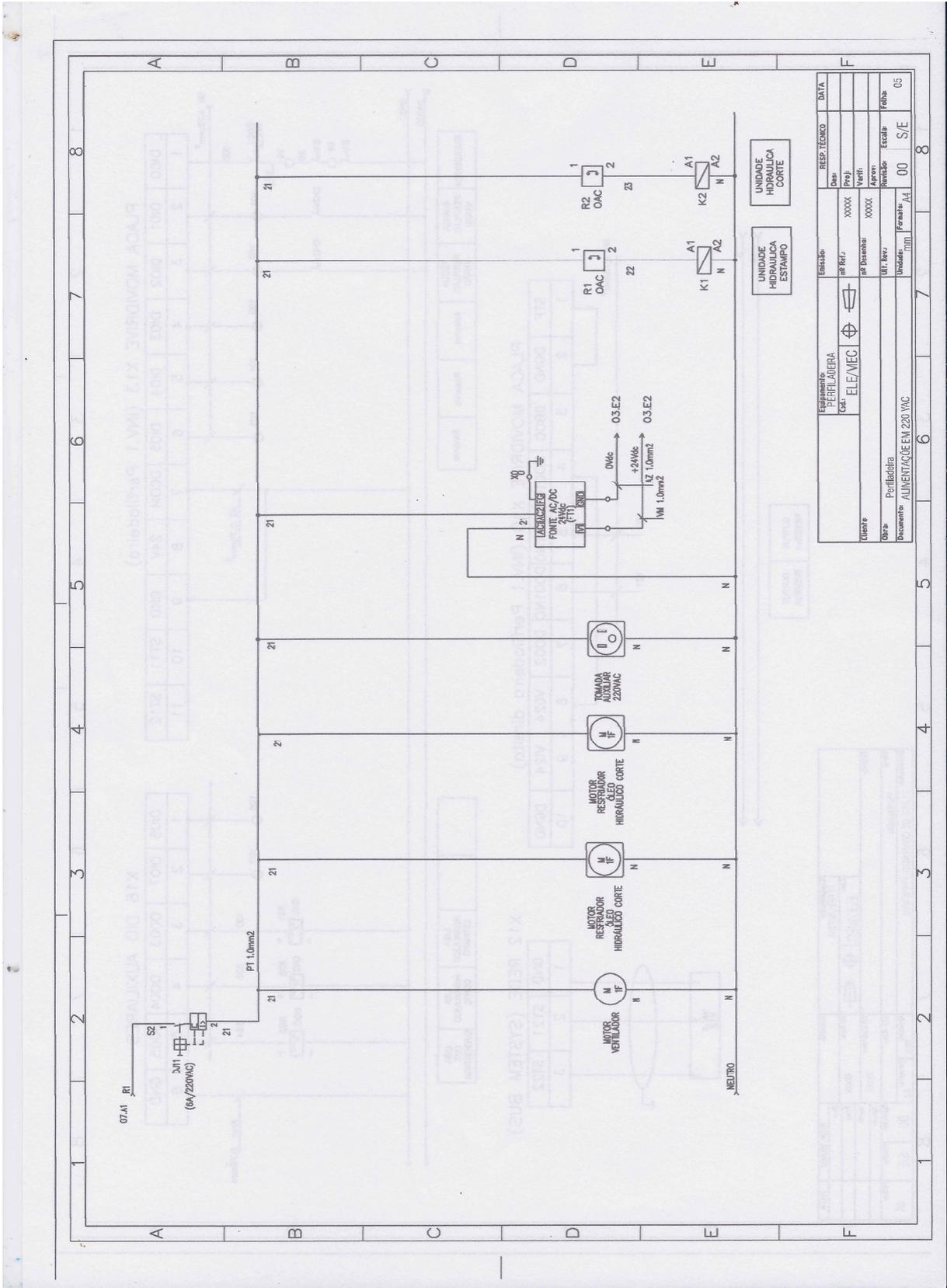


Equipamento		Emissão		RESP. TÉCNICO		DATA	
Perfiladeira	PERFILADORA	de Ref.	XXXXX	Desen.			
Proj.	ELE/MEC	de Desenho	XXXXX	Proj.			
Verif.				Verif.			
Aprov.				Aprov.			
Revisão				Revisão			
Escala				Escala			
Folha				Folha			
Unidade	mm	Formato	A4	S/E	00	S/E	03
Documento	Projeto dos Inversores						

ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

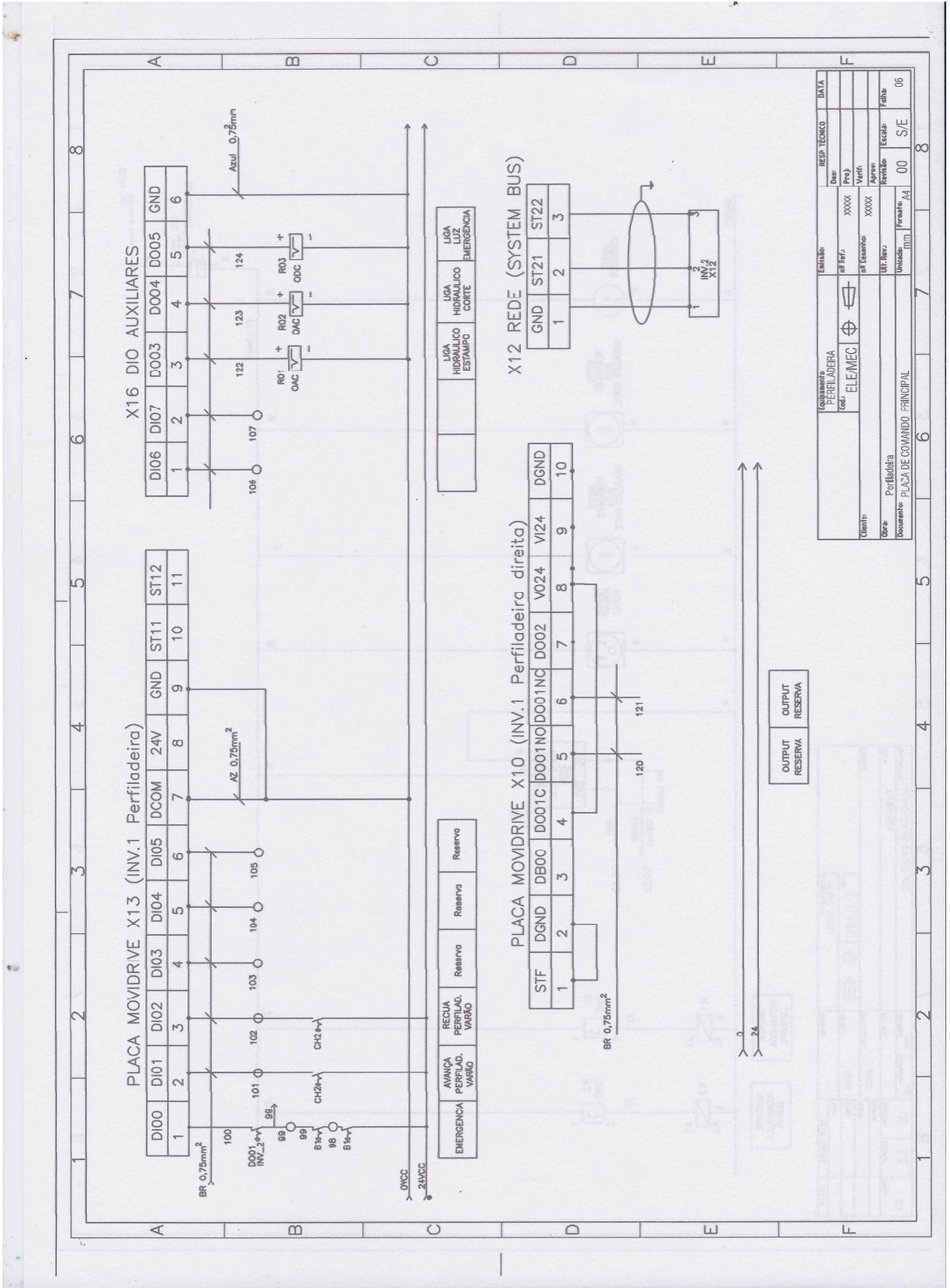


ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

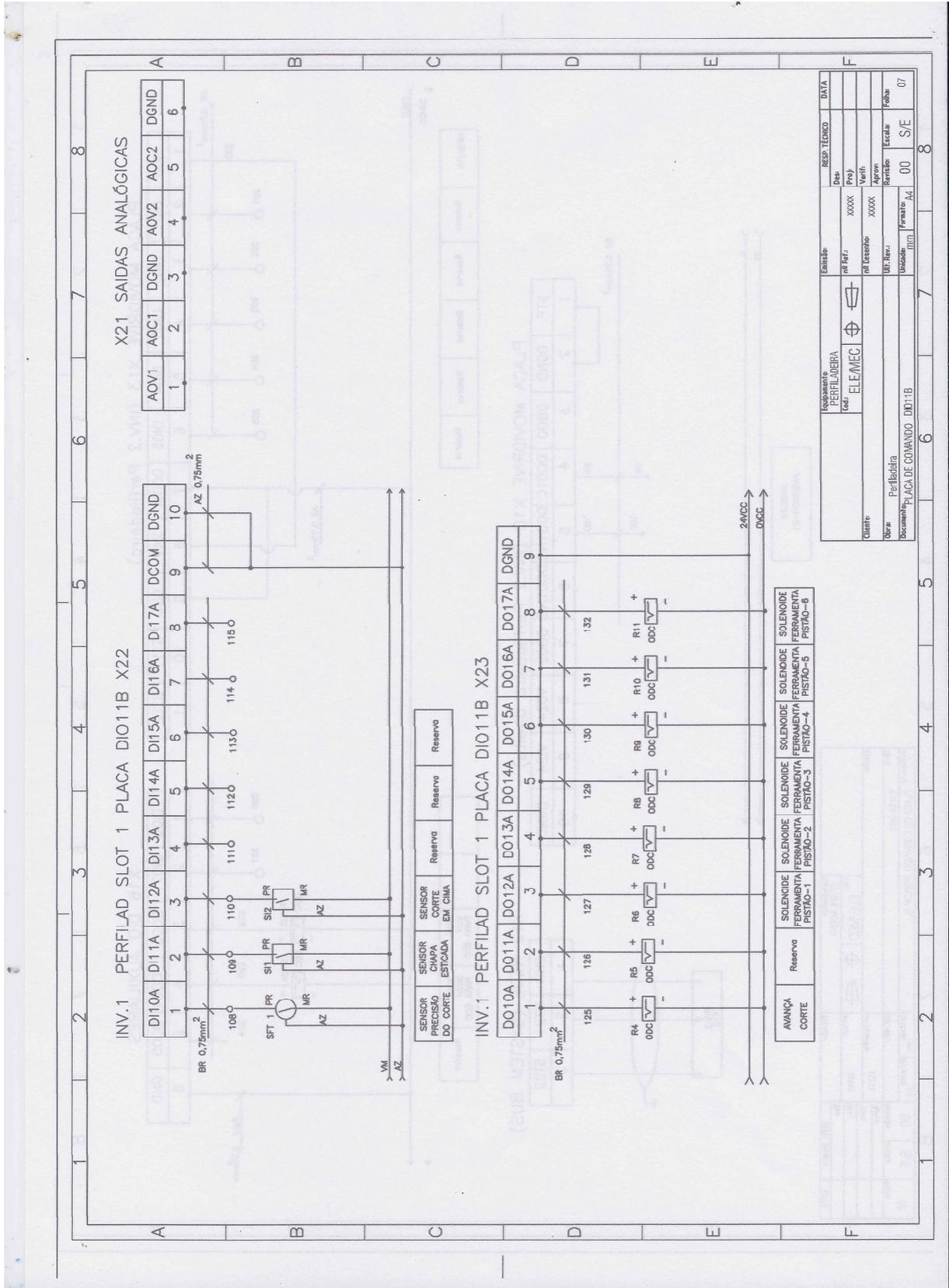


Equipamento		Emissão		RES. TECNICO		DATA	
PERFILADORA		de Ref.	XXXXX	Des:			
ELE/MEC		de Desenho	XXXXX	Proj:			
		UII. Rev.		Verif:			
		Unidade	mm	Aprov:			
		Formato	A4	Revisão			
				Escala			
					00	S/E	05

ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

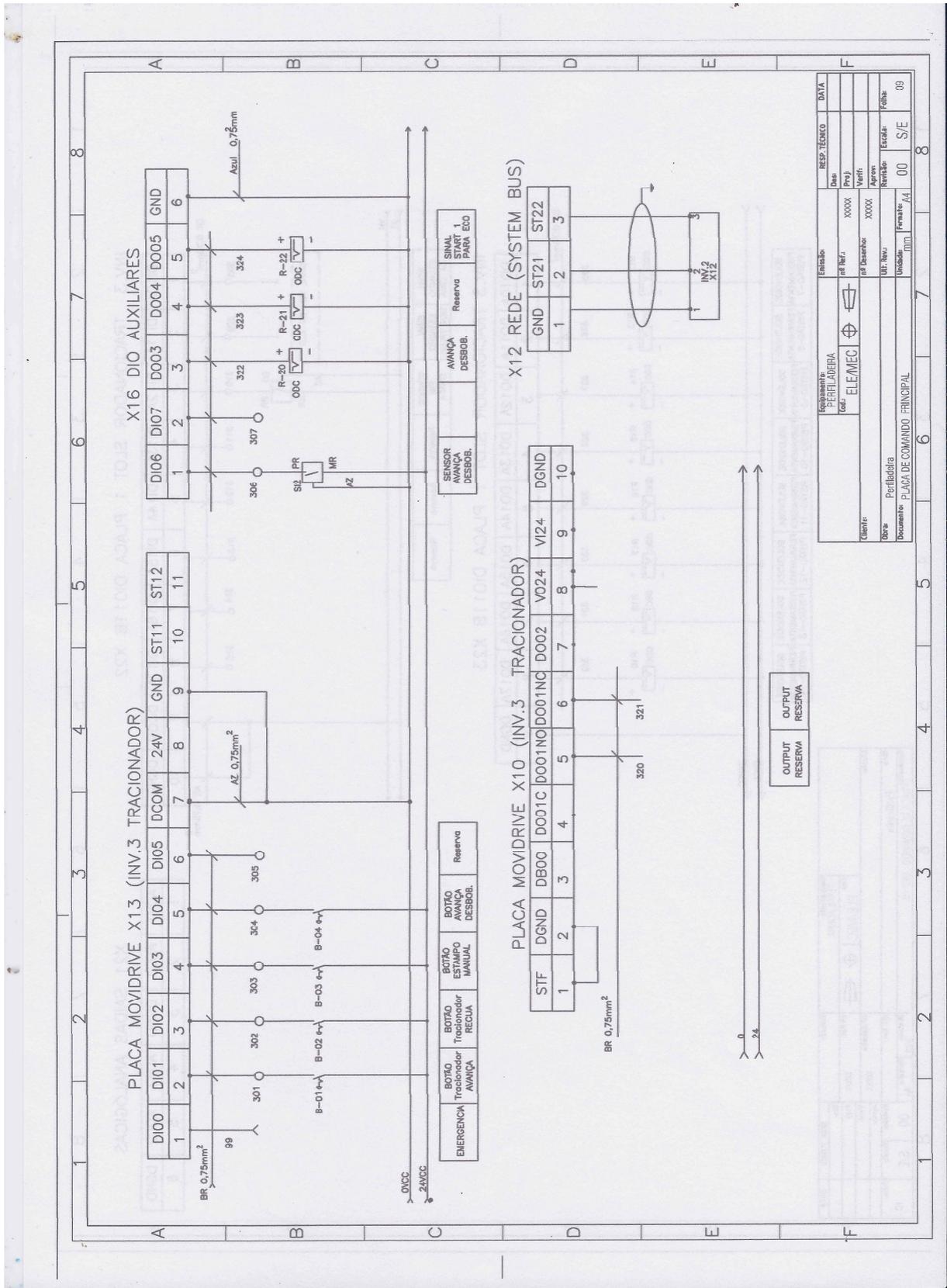


ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



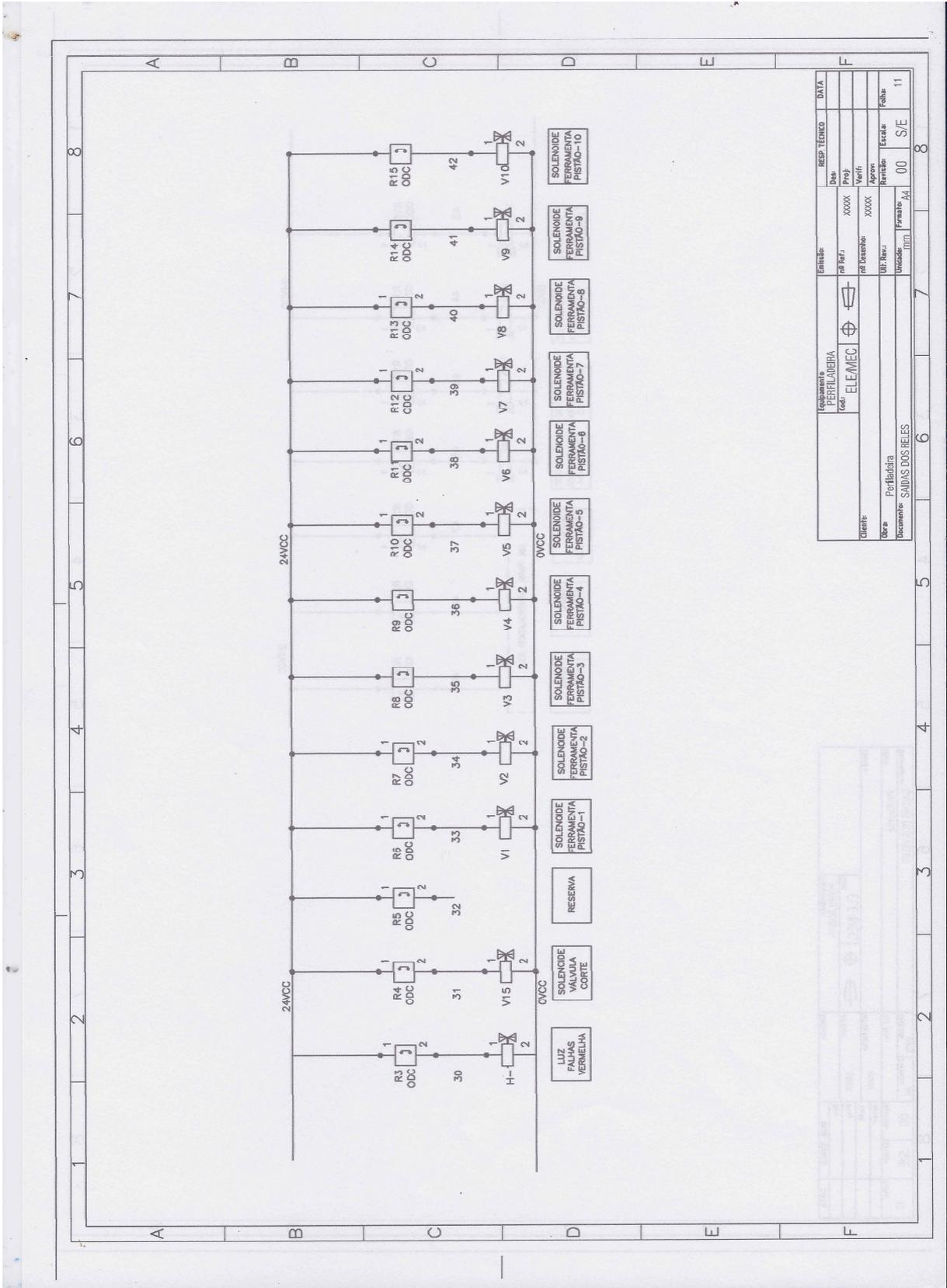


ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

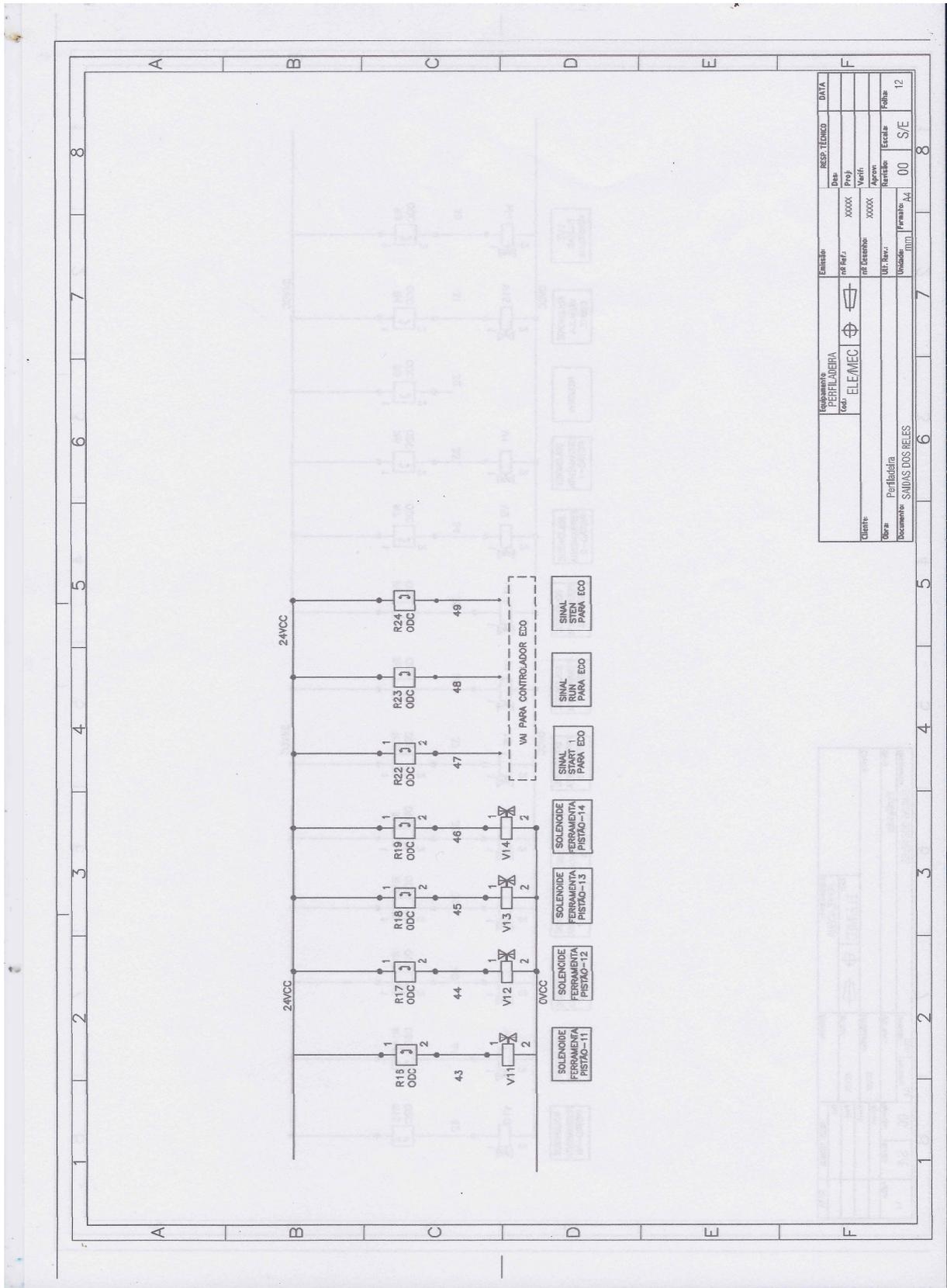




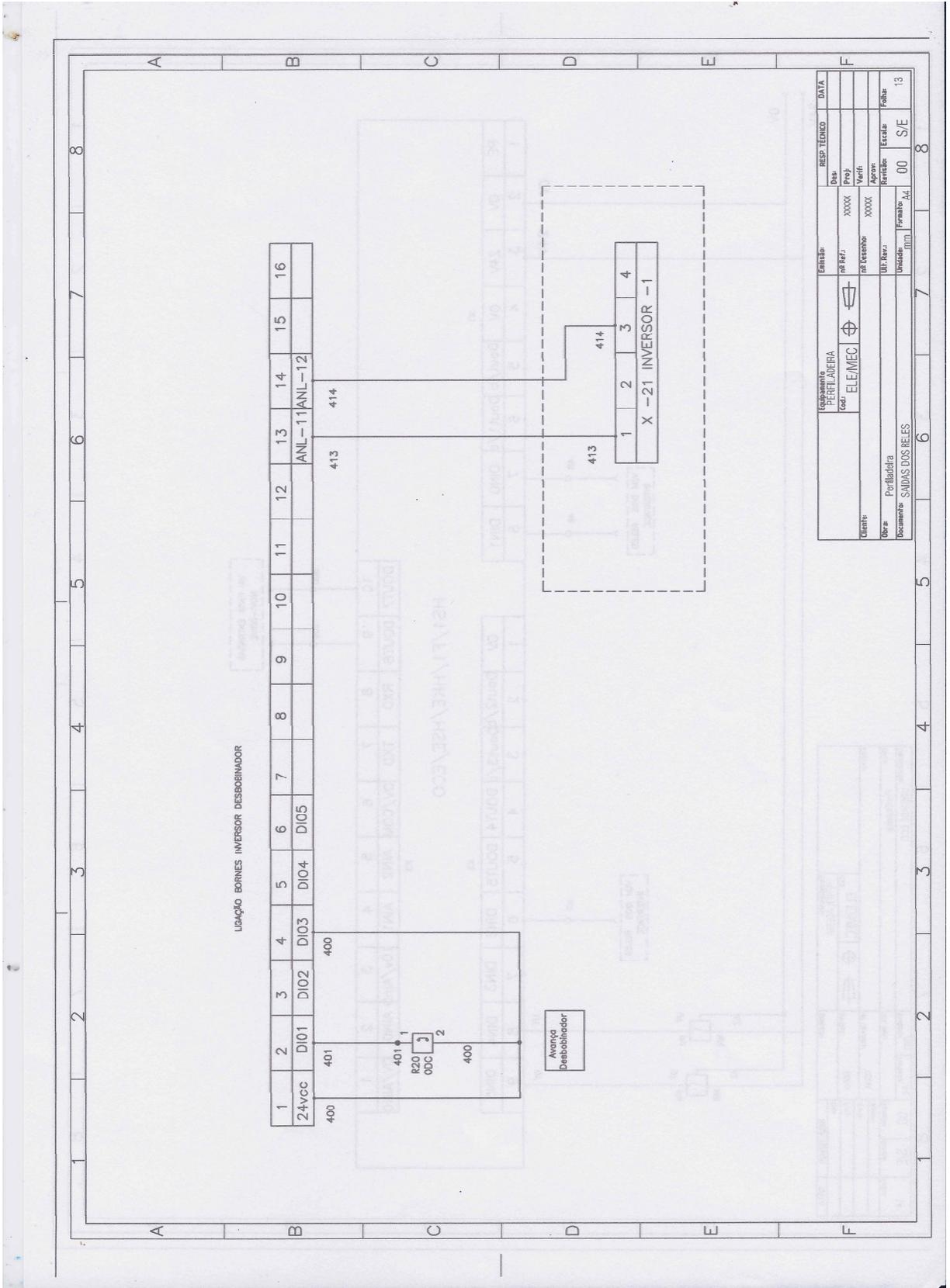
ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



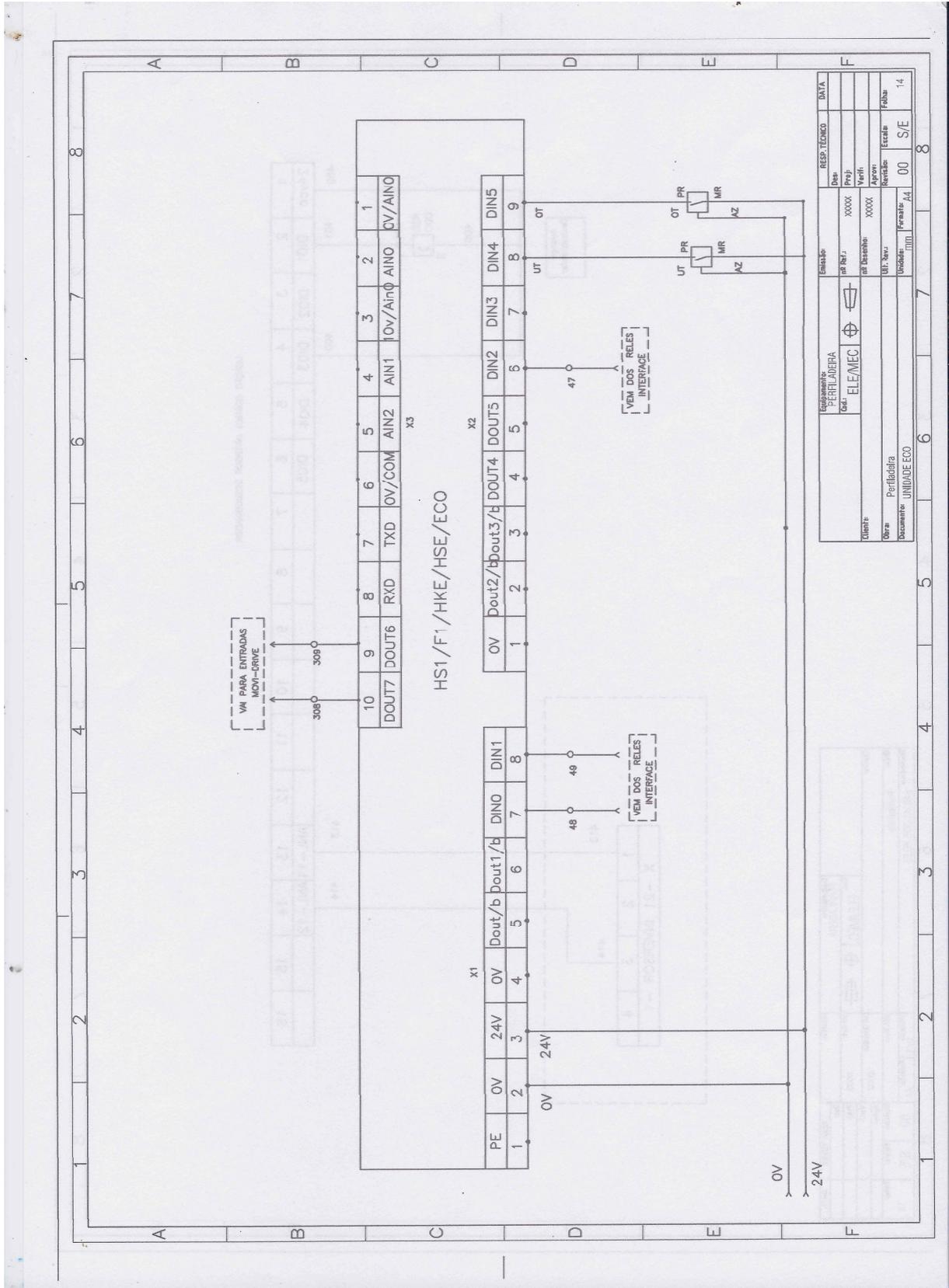
ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



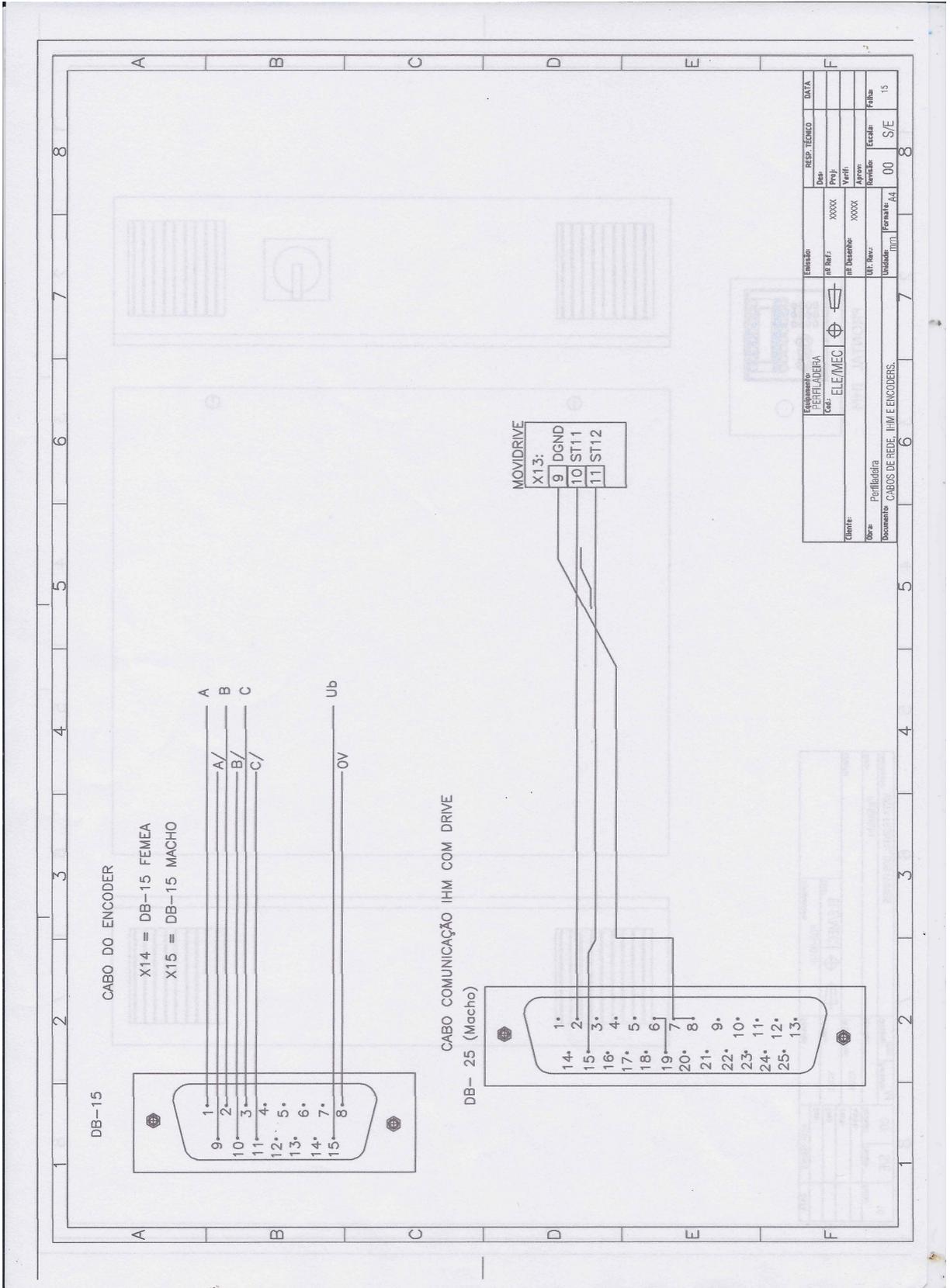
ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



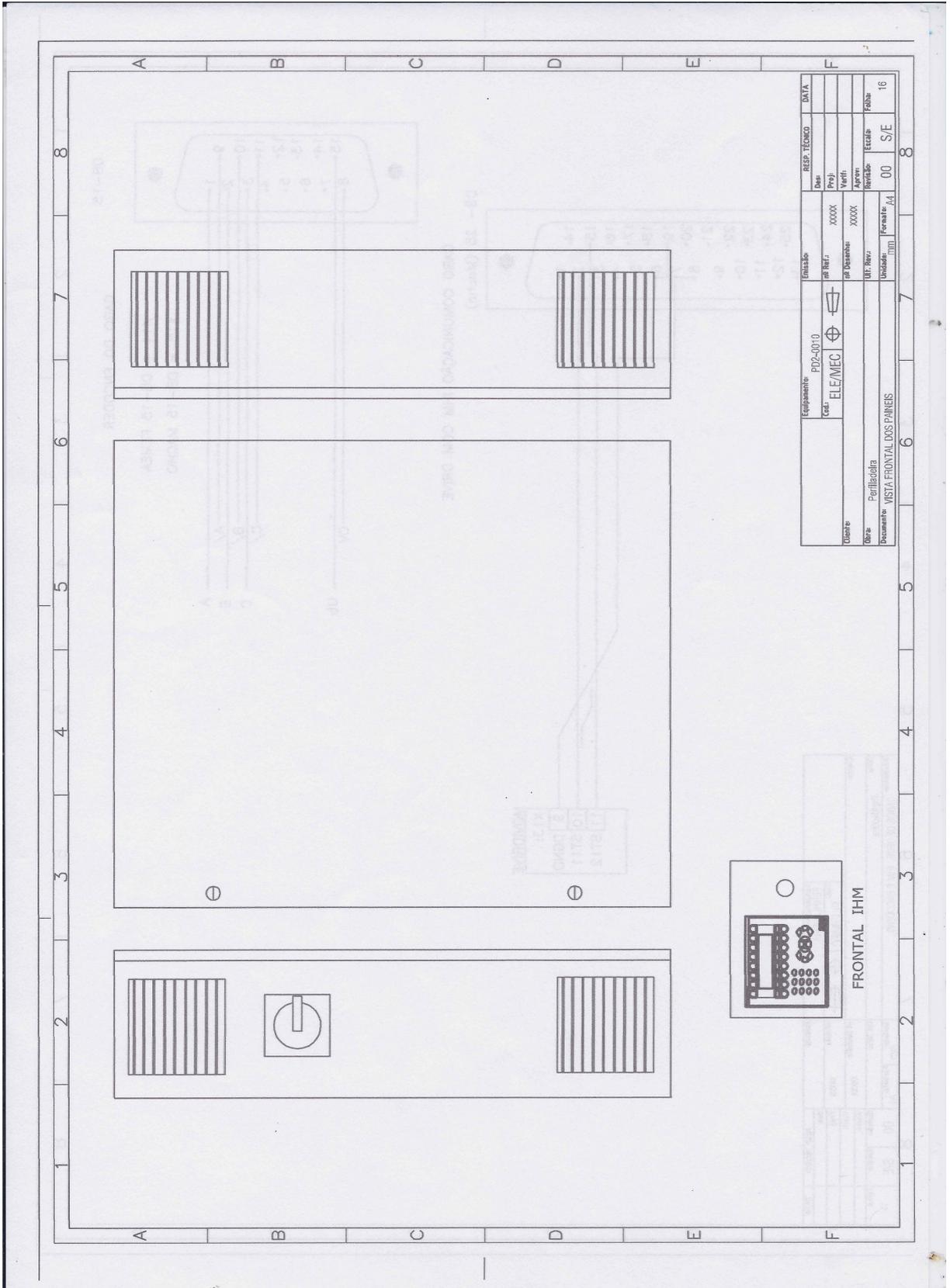
ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática



ANEXO A – Diagrama Elétrico da Perfiladeira Automática

