



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA
LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA
ESTÁGIO PROFISSIONAL

**PROPOSTA DE MELHORAMENTO DA VELOCIDADE DE
PRODUÇÃO NAS LINHAS DE PROCESSAMENTO DE METAL
LÍQUIDO DA EMPRESA MOZAL**

Autor:

Gagane, Paulo dos Santos Manjate

Supervisor:

UEM: Eng. Gerson Zango

MOZAL: Bulande Jeque

Maputo, Junho de 2025



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE ENGENHARIA

LICENCIATURA EM ENGENHARIA ELÉCTRICA

ESTÁGIO PROFISSIONAL

**PROPOSTA DE MELHORAMENTO DA VELOCIDADE DE
PRODUÇÃO NAS LINHAS DE PROCESSAMENTO DE METAL
LÍQUIDO DA EMPRESA MOZAL**

Autor:

Gagane, Paulo dos Santos Manjate

Supervisor:

UEM: Eng. Gerson Zango

MOZAL: Bulande Jeque

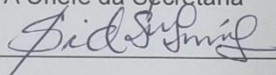
Maputo, Junho de 2025

TERMO DE ENTREGA DO RELATORIO DE ESTÁGIO PROFISSIONAL

Declaro que o estudante Paulo Santos Manjate Gagane entregou no dia 10/06/25 as 03 cópias do Relatório de Estágio Profissional com referência 2025ELEPD10 intitulado, **proposta de melhoramento da velocidade de produção nas linhas de processamento de metal líquido da empresa mozal**

Maputo, 10 de Junho de 2025 .

P/ A Chefe da Secretaria

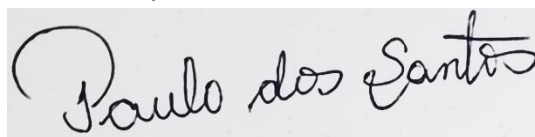


(Arlete Chiconela)

DECLARAÇÃO DE ORIGINALIDADE

Eu, Paulo dos Santos Manjate Gagane, estudante do 5º nível do curso de Engenharia Eléctrica na Faculdade de Engenharia da Universidade Eduardo Mondlane, declaro por minha honra que este trabalho é da minha autoria, sendo fruto dos conhecimentos adquiridos ao longo da minha formação, investigação pessoal e da orientação do supervisor. O conteúdo deste trabalho é original e todos os documentos consultados estão devidamente identificados na bibliografia.

Maputo, Junho de 2025

A handwritten signature in black ink, reading "Paulo dos Santos", is displayed on a light gray rectangular background. The signature is written in a cursive, flowing style.

Paulo dos Santos Manjate Gagane

DEDICATÓRIAS

Aos meus pais, Alberto Manjate Gagane e Divina Maria Vasco Chibindze, por terem-me trazido ao mundo e por sempre me apoiarem nos meus estudos.

À todos os meus irmãos, primos, amigos especialmente a Yolanda e Ângela, por terem tido um papel muito importante no meu crescimento acadêmico e sempre terem acreditado em mim.

AGRADECIMENTOS

Ao meu Senhor, Jesus Cristo, pela sua graça abundante na minha vida.

À Mozal, por receberem-me da melhor maneira e conduzido-me de forma que tivesse todas as ferramentas para que este trabalho fosse concluído, especialmente ao Veloso Nhameleque, Domingos Chirindzane e Osvaldo Zandamela.

Ao meu supervisor e coach, Bulande Jequê pela abertura e acolhimento.

Ao meu supervisor, Gerson Zango, pela abertura e sinceridade.

À minha querida amiga Carla Romão Lichive, pela maravilhosa companhia.

RESUMO

O relatório apresenta uma proposta de melhoria da eficiência dos componentes eléctricos e mecânicos das esteiras transportadoras, nomeadamente variadores de frequência, motores eléctricos, caixas de engrenagens, cilindros e outros dispositivos que compõem o sistema, de modo a alcançar a velocidade de produção desejada e, conseqüentemente, aumentar o rendimento da produção. As linhas de fundição têm atualmente uma velocidade de 16 lmg/min, sendo o valor da velocidade desejado de 20 lmg/min. No projecto da mesma fábrica, estas foram projectadas para uma velocidade de 18 lmg/min. Nestas condições, procura-se aumentar a velocidade das mesmas linhas por meio dos mecanismos existentes, tendo em consideração a idade da fábrica, factor que desempenha um papel importante, dado que todo o equipamento sofre uma degradação conseqüente de diversos factores com o tempo.

Palavras-chave: Motores, Mecanismos de transmissão, inversores de frequência, fundição de alumínio.

ABSTRACT

The report presents a proposal to improve the efficiency of the electrical and mechanical components of conveyor belts, namely frequency inverters, electric motors, gearboxes, cylinders and other devices that make up the system, in order to achieve the desired production speed and, consequently, increase production yield. The casting lines currently have a speed of 16 Ing/min, with the desired speed being 20 Ing/min. In the design of the same factory, these had been dimensioned for 18 Ing/min. Under these conditions, the aim is to increase the speed of the same lines using existing mechanisms, taking into account the age of the factory, a factor that plays an important role, given that all equipment suffers consequent degradation from various factors over time.

Keywords: Motors, Transmission mechanisms, Variable frequency drives and aluminum foundry.

ÍNDICE

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS	ii
RESUMO	iii
ÍNDICE	v
Índice de figuras	vii
1. Introdução.....	2
1.1. Formulação do problema	3
1.2. Pergunta de pesquisa	3
1.3. Delimitação	3
1.3.1. Temporal.....	3
1.3.2. Espacial	4
1.4. Justificativa	4
1.5. Objectivos	5
1.5.1. Objectivo geral.....	5
1.5.2. Objectivos específicos	5
1.6. Metodologia	5
2. CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	6
2.1. Automação industrial	7
2.2. SINAL ANALÓGICO E DIGITAL	9
2.3. VARIÁVEIS	10
2.3.1. Pressão.....	10
2.3.2. Temperatura	11
2.4. INSTRUMENTOS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL	12
2.4.1. Sensores.....	12
2.4.2. Sensor de temperatura	12
2.4.3. Sensor de pressão	12
2.4.4. Sensor capacitivo	12
2.4.5. Sensores indutivos	13
2.4.6. Transmissores	13
2.4.7. Encoder (ou codificador).....	14
2.5. Motores eléctricos.....	14
2.5.2. Características mecânicas de um motor assíncrono:	17
2.6. Mecanismos de Transmissão	20

2.6.1.	Características mecânicas dos mecanismos de produção	20
2.7.	Inversor de frequência	21
2.8.	Controlador lógico programável	23
2.8.1.	Funções do PLC.....	24
2.8.2.	Componentes de um PLC	24
2.9.	Unidade de potência hidráulica.....	27
2.9.1.	Cilindros Hidráulicos	28
2.9.2.	Cilindros Pneumáticos	28
3.1.	PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO	32
3.2.	Instalações de fundição de lingotes	34
4.	CAPÍTULO IV : Estudo de caso.....	37
4.1.	Mecanismo de leitura da velocidade	38
4.2.	Actual leitura da velocidade	39
4.3.	Estimativas de mudanças após implementação do projecto	41
4.4.	Fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1	42
4.5.	Interpretação do fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1	43
4.6.	Resultados obtidos:.....	44
4.7.	Ilustração do comportamento dos parâmetros oferecidos ao motor por meio do variador de frequência	45
4.8.	Fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 2	47
4.8.1.	Interpretação do fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1	48
4.9.	Proposta de mudança no mecanismo de transmissão	50
4.10.	Calculo da relação de transmissão	50
4.11.	Estado do motor.....	53
4.12.	Observações no Variador de frequência (VFD)	54
5.	Estimativa de custos.....	54
6.1.	Conclusões	57
6.2.	Recomendações	57
7.	Bibliografia e linkografia.....	59
8.	ANEXOS.....	1

Lista de símbolos

A/D - Analógico/digital;
DC - Tensão Contínua;
CHS – Cast-House;
PLC/CPL - Controlador lógico programável;
IA - Inteligência artificial;
TF - Tempo médio por forno;
IF - Ingots por forno;
DR - Diferença relativa;
CS - Velocidade de fundição;
MG - Ganho de metal;
FD - Fornos por dia;
Casting – Fundição;
Ton – tonelada;
Ingot – lingote;
VFD - Inversor de frequência/inversor de frequência;
Ing/min – lingotes por minuto.

Lista de figuras

FIGURA 1: LOCALIZAÇÃO GEOGRÁFICA DA CHS-MOZAL	4
FIGURA 2: SISTEMA INDUSTRIAL AUTOMATIZADO.....	7
FIGURA 3: SINAIS ANALÓGICOS E DIGITAIS	10
FIGURA 4: FORÇA EXERCIDA SOBRE UMA ÁREA (PRESSÃO).....	10
FIGURA 5: TRANSMISSOR	13
FIGURA 6: ENCODER.....	14
FIGURA 7: MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	15
FIGURA 8: CIRCUITO EQUIVALENTE POR FASE DE UM MOTOR DE INDUÇÃO	16
FIGURA 9: CARACTERÍSTICA MECÂNICA NATURAL (BINÁRIO VERSUS DESLIZAMENTO).....	19
FIGURA 10: CARACTERÍSTICA MECÂNICA NATURAL (VELOCIDADE VERSUS BINÁRIO)	19

FIGURA 11: DIAGRAMA DE CARGA E CURVA DE AQUECIMENTO	20
FIGURA 12: CARACTERÍSTICA MECÂNICA DOS MECANISMOS DE PRODUÇÃO ACOPLADOS EM MOTORES ASSÍNCRONOS.....	21
FIGURA 13: CAIXA DE ENGRENAGEM ACOPLADA A UM MOTOR DE INDUÇÃO.....	21
FIGURA 14: ESQUEMA GENÉRICO DE UM INVERSOR DE FREQUÊNCIA	22
FIGURA 15: ESTRUTURA FÍSICA DO CLP	23
FIGURA 16: PLC RACK.....	24
FIGURA 17: DIAGRAMA DE BLOCOS DE UM PLC.....	25
FIGURA 18: FONTE DE ALIMENTAÇÃO DE UM PLC.....	25
FIGURA 19: CARTAS DE ENTRADA E SAÍDA DO PLC.....	26
FIGURA 20: ARQUITETURA DE COMUNICAÇÃO INDUSTRIAL COM ETHERNET/IP	27
FIGURA 21: CILINDRO HIDRÁULICO	28
FIGURA 22: CILINDRO PNEUMÁTICO.....	28
FIGURA 23: BAUXITA (A), ALÚMINA (B).....	32
FIGURA 24: POTE DE REDUÇÃO DE ALUMÍNIO E SEUS COMPONENTES	33
FIGURA 25: ESQUEMA RESUMO DO PROCESSO DE PRODUÇÃO DE ALUMÍNIO.....	33
FIGURA 26: PAINEL DE TRANSPORTE DE ALUMÍNIO.....	34
FIGURA 27: FORNO DE MANUTENÇÃO	34
FIGURA 28: (A) RODA DE FUNDIÇÃO, (B) MOLDE PARA LINGOTES	35
FIGURA 29: ALUMÍNIO	35
FIGURA 30: RODA DENTADA DE MEDIÇÃO DA VELOCIDADE	38
FIGURA 31: GRÁFICO DA VELOCIDADE DA LINHA DE PRODUÇÃO.....	39
FIGURA 32: GRÁFICO DA VELOCIDADE DA LINHA DE PRODUÇÃO.....	39
FIGURA 33: ESTADO DO MOTOR VISTO PELO VFD	40
FIGURA 34: PROGRAMA LÓGICO.....	ERRO! INDICADOR NÃO DEFINIDO.
FIGURA 35: VELOCIDADE DE PRODUÇÃO A UMA FREQUÊNCIA DE 46Hz	44
FIGURA 36: VELOCIDADE DA LINHA DEPOIS DO AUMENTO DA FREQUÊNCIA PARA 48Hz.....	45
FIGURA 37: ESTADO DO MOTOR DEPOIS DO AUMENTO DA FREQUÊNCIA PARA 48Hz	45
FIGURA 38: GRÁFICO DA RELAÇÃO ENTRE A VELOCIDADE DE SAÍDA (N_2) E A POTÊNCIA NECESSÁRIA PARA MANTER O TORQUE CONSTANTE DE 30.000 Nm.....	52

Lista de de tabelas

TABELA 1: CONVERSÃO DE TEMPERATURA EM DIFERENTES ESCALAS	11
TABELA 2: MUDANÇAS ESPERADAS COM O AUMENTO DA VELOCIDADE	41
TABELA 3: GANHOS ESPERADOS	42

CAPÍTULO I: INTRODUÇÃO

Nesse capítulo é apresentada a formulação e delimitação do problema, inclui também os objectivos e justificativas que foram levantadas para a realização do presente trabalho

1. Introdução

A MOZAL é uma empresa subsidiária do grupo south32, grupo este que se dedica à exploração de minérios e fabrico de metal. A MOZAL dedica-se particularmente a produção de alumínio primário de alta qualidade, material este utilizado numa variedade de indústrias, como a automotiva, aeroespacial, construção e de embalagem.

A planta da MOZAL é composta por três departamentos fundamentais de produção, sendo estes: departamento de carbono (Carbon), departamento de redução (Reduction) e departamento de fundição (Cast House).

No departamento de fundição (Cast House), a produção de alumínio passa por dois estágios ou partes de operação denominadas: zona quente (hot-side) e zona fria (cold-side), a passagem do metal para o estado sólido é feita por meio de uma correia transportadora composta por moldes a uma temperatura de pelo menos 690°C, o metal introduzido em cada molde após tomar a forma sólida denomina-se lingote (ingot), que em seguida passa por um túnel de arrefecimento composto pela segunda correia transportadora que recebe os lingotes a uma temperatura de 500°C e na saída do túnel encontram-se a uma temperatura de 55 °C, passando pela terceira correia transportadora e nesta inicia o processo de empacotamento em bandos de 1ton, que por último estágio o metal é levado ao porto de Maputo, destinando-se aos diversos fins mencionados.

As linhas de processamento de metal do departamento da Cast House foram projectadas de tal maneira que processem lingotes a uma velocidade de 18 ling/min, entretanto, actualmente as linhas de produção processam na velocidade de 16 ling/min, este facto deve-se a diferentes factores, tais como: o envelhecimento da própria instalação e equipamentos, a falta de artigos ou componentes com as mesmas características dos equipamentos iniciais. Atendendo todos estes factores negativos, que se opõem as demandas do mercado assim como na competitividade, a empresa pretende aumentar a velocidade de produção do metal para 20 ling/min.

Este projecto visa apresentar uma proposta de melhoramento da eficiência dos componentes eléctricos e mecânicos das esteiras transportadoras tais como, variadores de frequência, motores eléctricos, caixas de engrenagens, cilindros e outros dispositivos que

compõem o sistema, com vista a alcançar uma velocidade de produção desejada e consequentemente o rendimento da produção aumente.

1.1. **Formulação do problema**

De que maneira é possível aplicar soluções da Engenharia Eléctrica, especialmente nas áreas de automação e controle, para melhorar a velocidade de produção nas linhas de processamento de metal líquido, sem comprometer a qualidade do produto e a segurança na unidade fabril?

1.2. **Pergunta de pesquisa**

Este projecto visa explorar todas possibilidades de melhoramento da curva de carga em relação a velocidade dos motores eléctricos, garantindo assim um aumento no seu rendimento eléctrico, mecânico e comercial, garantindo deste modo mais continuidade e confiabilidade, permitindo assim o cumprimento das metas de produção.

1.3. **Delimitação**

1.3.1. **Temporal**

O presente projecto decorre no departamento de CAST HOUSE na empresa Mozal num período de Março a Junho de 2025.

1.3.2. Espacial



Figura 1: Localização geográfica da CHS-MOZAL

FONTE: Google Maps, 2025

1.4. Justificativa

O projecto visa explorar todas as possibilidades de melhoramento da curva de carga em relação a velocidade dos motores eléctricos, garantindo assim um aumento no seu rendimento eléctrico, mecânico e comercial, garantindo deste modo mais continuidade e confiabilidade, permitindo assim o aumento da produção.

1.5. Objectivos

1.5.1. *Objectivo geral*

- Apresentar uma proposta de melhoramento da velocidade de produção nas linhas de processamento de metal líquido.

1.5.2. *Objectivos específicos*

- Expor o actual cenário da velocidade das linhas de produção em relação ao torque dos motores;
- Apresentar o sequenciamento das velocidades dos motores eléctricos e seus respectivos torques;
- Fazer a simulação da energia consumida antes e depois da proposta aumento da velocidade.
- Apresentar o possível aumento do rendimento da produção depois do aumento da produção;
- Fazer a estimativa de custos.

1.6. *Metodologia*

Para alcançar os objectivos propostos do projecto, proceder-se-á dos seguintes meios:

Pesquisa bibliográfica: Consistirá em pesquisa e leituras de manuais na sua maioria electrónicos dos quais estarão citados nas referências bibliográficas ou outra bibliografia consultada;

A pesquisa do campo: Consistirá num estudo concreto numa das unidades fabris Mozal, observando a configuração do sistema em estudo, recolha de dados como sua configuração e as devidas especificações técnicas;

Laboratório virtual: Será usado um conjunto de simuladores que possibilitam projectar os circuitos de comando e controlo dos sistemas eléctricos industriais:

- *Studio 5000;*
- *Control logic;*
- *Wonderware in touch;*
- *Drive executive.*

2. *CAPÍTULO II: FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA*

Este capítulo está estruturado com os fundamentos teóricos e científicos sobre a proposta de melhoramento da velocidade de produção assim como uma breve introdução aos equipamentos de automação, controlo e instrumentação presentes numa linha de fundição de alumínio

2.1. Automação industrial

A automação pode ser definida como “a tecnologia pela qual um processo ou procedimento é realizado sem assistência humana” (Groover, 2019b). Embora os seres humanos possam observar ou supervisionar, o trabalho em si é executado de forma autônoma, sem intervenção humana direta (Nof, 2009).

Estimativas do Fórum Económico Mundial indicavam que, até 2025, a distribuição das tarefas entre humanos e máquinas será equivalente (Schwab & Zahidi, 2020).

A automação industrial é normalmente dividida em 3 níveis:

- Nível de campo: constituído por motores, cilindros pneumáticos, válvulas, atuadores e sensores;
- Nível de controle: é nível em que se encontram os elementos que vão controlar o processo;
- Nível de supervisão: é composto pelos programas de interface homem-máquina e aquisição de dados (este nível não deve interferir directamente no funcionamento do processo).



Figura 2: Sistema industrial automatizado

Fonte: https://pt.wikipedia.org/wiki/Automação_industrial

Vantagens

Segundo Devway Studio 2024, pode-se destacar as seguintes vantagens nos processos de automação industrial:

Aumento da Produtividade

A automação permite operações contínuas, sem pausas, aumentando a produção e atendendo melhor à demanda.

Redução de Custos Operacionais

Automatizar processos reduz a necessidade de mão de obra, erros humanos e desperdícios, resultando em economia significativa.

Eficiência e Tomada de Decisão Baseada em Dados

Sistemas automatizados coletam e analisam dados em tempo real, proporcionando intuições valiosos para decisões informadas.

Desvantagens

Segundo JOE. 2023, em contrapartida, das vantagens que a automação industrial pode trazer, enumeram-se as seguintes desvantagens:

1. Investimento inicial elevado

A implementação de sistemas automatizados exige investimentos significativos em tecnologia e treinamento.

2. Desemprego tecnológico

A substituição de trabalhadores humanos por máquinas pode levar ao desemprego e exige requalificação profissional.

3. Dependência de tecnologia

Falhas técnicas podem interromper os processos, tornando as operações vulneráveis a problemas tecnológicos.

4. Resistência à mudança

Funcionários podem resistir à automação por medo de perder empregos ou desconforto com novas tecnologias.

5. Complexidade de integração

Integrar sistemas automatizados com tecnologias existentes pode ser complexo e exigir tempo e recursos significativos.

2.2. Sinal analógico e digital

A base dos sistemas de automação está na lógica digital, que funciona com dois estados possíveis: activo ou inativo. Em termos práticos, isto significa que um componente pode estar funcionando (1) ou parado (0). Essa lógica binária é suficiente para representar muitos elementos em um processo automatizado, como sensores, botões, lâmpadas sinalizadoras, motores ou até mesmo o funcionamento global de uma máquina. (Bulande. B 2022)

Porém, nem todos os equipamentos operam com apenas dois estados definidos. Um motor, por exemplo, não está apenas ligado ou desligado — ele pode variar de velocidade, o que exige uma forma de medição mais detalhada. Nessas situações, é necessário usar sinais analógicos, que permitem representar grandezas variáveis com precisão, como temperatura, pressão, ou rotação. Esse tipo de sinal traduz essas variações contínuas em valores numéricos que o sistema pode interpretar e controlar.

A principal diferença entre sinais digitais e analógicos está exatamente na forma como a informação é representada e emitida. O sinal digital trabalha com valores discretos — ou seja, fixos, como o 0 e o 1, o que o torna ideal para comandos simples e confiáveis, menos suscetíveis a ruídos. Já o sinal analógico apresenta uma variação contínua, o que o torna indispensável quando é necessário monitorar ou controlar grandezas que mudam gradualmente ao longo do tempo.

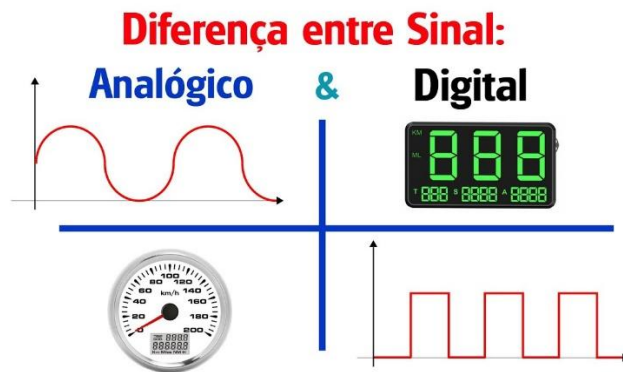


Figura 3: Sinais Analógicos E Digitais

Fonte: LIBRAIN

2.3. Variáveis

As variáveis usadas em processos industriais em sistemas de controlo em industriais de produção tem sido as seguintes: temperatura, pressão, massa, densidade e outras, a medição destas permite controlar o processo assim como fazer intervenções manuais de correção ou optimização.

2.3.1. Pressão

Pressão é a força aplicada perpendicularmente à superfície de um objecto por unidade de área sobre a qual essa força é distribuída. (KNIGHT, 2007)

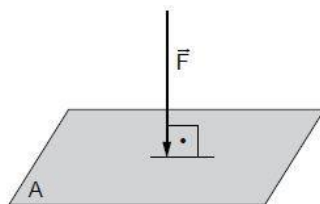


Figura 4: Força exercida sobre uma área (pressão)

FONTE: O autor.

Matematicamente pode ser definida por:

$$p = \frac{F}{A}$$

(Eq. 1)

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

Onde: p -pressão; F-força; A-área.

A unidade de pressão no sistema internacional é Pascal.

Outras unidades de pressão são: **psi, kg/cm², bar, atmosphere, torr.**

2.3.2. Temperatura

Temperatura é uma grandeza física escalar que expressa o grau de agitação térmica das partículas de um corpo. Ela está relacionada ao estado de energia térmica de um sistema e determina a direção do fluxo de calor entre corpos: o calor sempre flui do corpo de maior temperatura para o de menor temperatura. (Halliday 2016)

Temperatura é a propriedade física que determina a direção do fluxo de calor entre dois corpos colocados em contacto térmico.”

Existem vários fenómenos influenciados pela temperatura sendo usados para medi-la:

- Variações no volume ou estado dos corpos (sólidos, líquidos ou gases);
- Variação da resistência de um condutor (sondas de resistência);
- Variação da resistência de um semicondutor (termístores);
- A f.e.m. criada pela união de dois metais diferentes (termopares);
- Intensidade da radiação total emitida pelo corpo (pirómetros de radiação);
- Outros fenómenos usados em laboratório (velocidade do som em um gás, frequência de ressonância de um cristal, etc.).

Tabela 1: Conversão de temperatura em diferentes escalas

	Celsius (°)	Fahrenheit (°)	Kelvin (Abs)
Celsius (°)	1	33.8	274.15
Fahrenheit (°)	-17.222	1	255.928
Kelvin (Abs)	-272.15	-457.87	1

Fonte: Autoria própria

2.4. INSTRUMENTOS DE AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

2.4.1. Sensores

Sensores são dispositivos eletromecânicos capazes de detectar grandezas físicas, como temperatura, pressão ou luminosidade, e convertê-las em sinais eléctricos mensuráveis. O processo ocorre em etapas: primeiro, o fenómeno físico é captado pelo sensor e transformado num sinal eléctrico proporcional. Em seguida, esse sinal passa por um sistema de condicionamento, onde é amplificado ou filtrado, resultando numa tensão contínua. Por fim, essa tensão é enviada a um conversor analógico-digital (A/D), que transforma o sinal contínuo em dados digitais. Esses dados podem então ser interpretados por um computador ou controlador lógico programável (CLP), possibilitando a automação e o controle eficiente de processos industriais. (FUENTE, 2011)

Os tipos de sensores comumente utilizados na automação industrial são:

2.4.2. Sensor de temperatura

É um dispositivo que transforma mudanças de temperatura em sinais eléctricos processados por equipamentos eléctricos ou electrónicos.

Na indústria, os sensores de temperatura mais usados são os termopares, devido à sua robustez, baixo custo e ampla faixa de medição. Ele funciona com base no efeito Seebeck, onde dois metais diferentes unidos numa extremidade geram uma tensão eléctrica proporcional à diferença de temperatura entre essa junção (junção quente) e a outra extremidade (junção fria).

2.4.3. Sensor de pressão

É um sensor que percebe o valor da pressão ou a sua variação e o transforma precisamente num sinal eléctrico;

2.4.4. Sensor capacitivo

Um sensor capacitivo é caracterizado por detectar materiais sólidos ou líquidos com base em alterações na capacitância entre dois eléctrodos. Ele é amplamente usado para o controle de nível, presença ou posição de objetos, mesmo quando não metálicos.

2.4.5. Sensores indutivos

Os sensores indutivos são dispositivos projetados para detectar objetos metálicos sem contato físico. Eles operam com base na indução eletromagnética, sendo altamente confiáveis em ambientes industriais agressivos.

2.4.6. Transmissores

Os transmissores captam a variável do processo através do elemento primário e a transmitem a distâncias como um sinal pneumático, electrónico ou digital. O sinal electrónico padrão é de 4 a 20 mA de corrente contínua. (CREUS, 2009).

Na automação industrial moderna, os dois tipos de sinais analógicos mais comuns são 4–20 mA e 0–10 V. O sinal de 4–20 mA é frequentemente preferido devido às seguintes vantagens:

- **Maior imunidade a interferências eléctricas:** A transmissão por corrente é menos suscetível a ruídos electromagnéticos, garantindo maior confiabilidade em ambientes industriais com alta interferência eléctrica.
- **Transmissão eficiente em longas distâncias:** O sinal de corrente pode ser transmitido por longas distâncias sem perdas significativas, mantendo a integridade dos dados.
- **Detecção de falhas:** A faixa operacional iniciando em 4 mA (zero vivo) permite a identificação de falhas no sistema, como cabos rompidos, pois uma corrente de 0 mA indica uma condição de erro. (ENSYCAL, 2025)



Figura 5: Transmissor

Fonte: [Smar – LD290 Transmissor de Pressão](#)

2.4.7. **Encoder** (ou codificador)

É um dispositivo electromecânico que converte movimento mecânico como posição angular, velocidade ou direção em sinais eléctricos. Esses sinais são utilizados por sistemas de controle e automação para monitorar e ajustar o comportamento de máquinas e motores com precisão.



Figura 6: Encoder

Fonte: [Industrial Supplies, Encoder, Npn Open Collector Output Type Practical For Height And Weight Scale Steel Cut Length Control – Walmart.ca](#)

Encoders Incrementais: Produzem pulsos proporcionais ao movimento do eixo, permitindo o cálculo de deslocamento relativo. São simples e económicos, mas requerem uma referência inicial para determinar a posição absoluta. Usam geralmente duas saídas (A e B) com deslocamento de fase para detectar direção.

Encoders Absolutos: Geram um código único (como binário ou Gray) para cada posição, garantindo precisão absoluta mesmo após interrupções de energia. São mais complexos e caros, sendo ideais para aplicações críticas como máquinas CNC ou robôs industriais. (Gray, F. 1953).

2.5. **Motores eléctricos**

As máquinas eléctricas são dispositivos electromecânicos fundamentais na conversão de energia eléctrica em energia mecânica e vice-versa. Elas são amplamente utilizadas em sistemas industriais, transporte, geração e distribuição de energia. No contexto

industrial, os motores eléctricos desempenham um papel essencial, pois fornecem o movimento necessário para o funcionamento de linhas de produção, transportadores, bombas, ventiladores, entre outros.

Os motores eléctricos podem ser classificados em várias categorias, sendo os motores de corrente alternada (CA), particularmente os motores de indução trifásicos, os mais utilizados nas indústrias devido à sua robustez, baixo custo, facilidade de manutenção e boa eficiência. (Fitzgerald, 2003)



Figura 7: Motor de indução trifásico

Fonte: www.indiamart.com

2.5.1. Motor de Indução trifásico

O motor de indução trifásico, também conhecido como motor assíncrono, é formado por duas partes principais:

Estator: Parte fixa que contém os enrolamentos trifásicos responsáveis por gerar um campo magnético girante ao serem alimentados por uma fonte de corrente alternada.

Rotor: Parte móvel que gira devido à indução eletromagnética causada pelo campo magnético do estator.

O funcionamento baseia-se no princípio da indução de Faraday: o campo girante do estator induz uma corrente no rotor, que por sua vez cria um campo magnético oposto, produzindo torque e movimento rotacional.

Número de polos e velocidade:

A velocidade de rotação de um motor de indução está diretamente relacionada ao número de polos do estator e à frequência da rede elétrica, conforme a fórmula:

$$n_s = \frac{120 \times f}{P}$$

(Eq. 2)

Onde:

n_s = velocidade síncrona (em RPM);

f = frequência da rede (em Hz);

P = número de polos do motor.

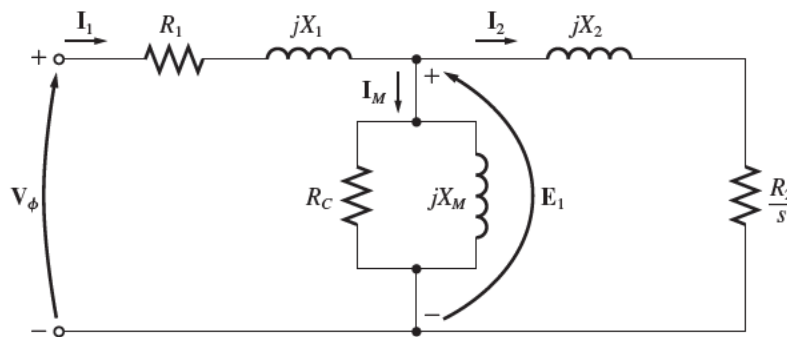


Figura 8: Circuito equivalente por fase de um motor de indução

Fonte: Chapman, S. J. (2011)

Onde:

R_1 e X_1 = são os parâmetros do motor vistos no estator;

R_2 e X_2 : são parâmetros do motor vistos a partir do rotor;

I_e : a corrente no circuito de magnetização;

R_c e X_m : parâmetros no circuito de magnetização.

Nestas condições, podemos encontrar parâmetros básicos sendo expressos da seguinte maneira:

Para a corrente eléctrica:

$$I_2 = \frac{V_{TH}}{V_{TH} + V_2} \quad \text{ou} \quad I_2 = \frac{V_{TH}}{\sqrt{(R_{th} + R_2/s)^2 + (X_{th} + X_2)^2}}$$

(Eq. 3)

Desprezando a corrente no circuito de magnetização, pode considerar que a tensão V_{th} seja igual a tensão da fonte V .

Para a potência mecânica fornecida:

$$P_{mec} = 3(I_2)^2 \times R_2 \times \frac{1 - S}{S} \quad (\text{Eq. 4})$$

Onde:

P_{mec} - é a potência mecânica;

I_2 - Corrente no rotor;

S - Escorregamento;

R_2 - Resistência do rotor.

Nestas condições teremos o torque induzido dado por:

$$M = \frac{3U^2 \times R'_2}{\omega s [(R_{th} + R_2/s)^2 + (X_{th} + X_2)^2]} \quad \text{uma vez que: } M = \frac{3I^2 \times R'_2}{\omega s} \quad (\text{Eq. 5})$$

Onde:

M – é o binário ou torque induzido em Nm.

Segundo (Khoussainov, 1987), chama-se característica mecânica de um motor a curva da sua velocidade de em função do binário, isto é, $\omega = f(m)$. As características mecânicas dos vários motores têm diferente rigidez

2.5.2. Características mecânicas de um motor assíncrono:

Este tipo de motor eléctrico é o mais aplicado na indústria porque é o mais barato e seguro. Simultaneamente, os motores assíncronos possuem certas desvantagens: a sua sensibilidade elevada à tensão da rede e as dificuldades em relação ao controle da velocidade. Um motor assíncrono tem dois enrolamentos: o enrolamento do estator e do rotor, sendo ambos de corrente alternada. O enrolamento trifásico estatórico liga-se em triângulo ou em estrela. No que se refere ao enrolamento rotórico, há dois tipos de motores. Um deles, chamado motor de rotor bobinado, tem no seu rotor três anéis de contacto, aos quais está ligado o enrolamento bobinado, conectado habitualmente em

estrela. Graças aos anéis, é possível a introdução, no circuito do rotor, de resistências externas. O segundo tipo não tem anéis e o seu enrolamento rotórico está em curto-circuito. Esta chama-se motor assíncrono em gaiola de esquilo ou de rotor curto-circuitado. (Khoussainov, 1987)

Em busca da característica mecânica dos motores, não é conveniente usar a última equação, uma vez que os parâmetros da impedância vista no rotor e no estator não costumam ser dadas pelo fabricante, convém usar os dados do deslizamento crítico e do torque máximo para achar a característica mecânica, onde resulta na fórmula de Kloss:

$$M = \frac{2M_{\max}}{\frac{S}{S_c} + \frac{S_c}{S}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo o escorregamento crítico dado por:

$$S_c = \frac{R'_2}{\sqrt{(R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2)}} \quad (\text{Eq. 7})$$

Uma vez que $\frac{S}{S_c}$ é desprezível, podemos dizer:

$$M = \frac{2M_{\max}}{S_c} \times S \quad (\text{Eq. 8})$$

Onde:

S_c – é o escorregamento crítico.

$M_{\max}$ – é o binário máximo.

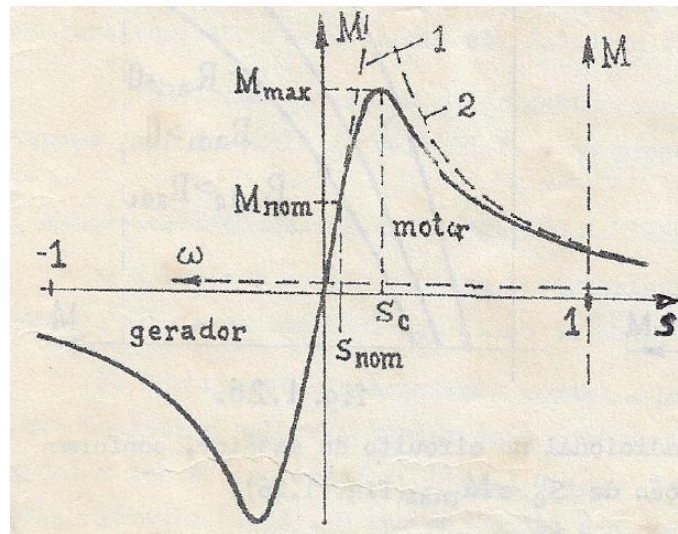


Figura 9: Característica mecânica natural (binário versus deslizamento)

Fonte: Khoussainov, accionamentos eléctricos

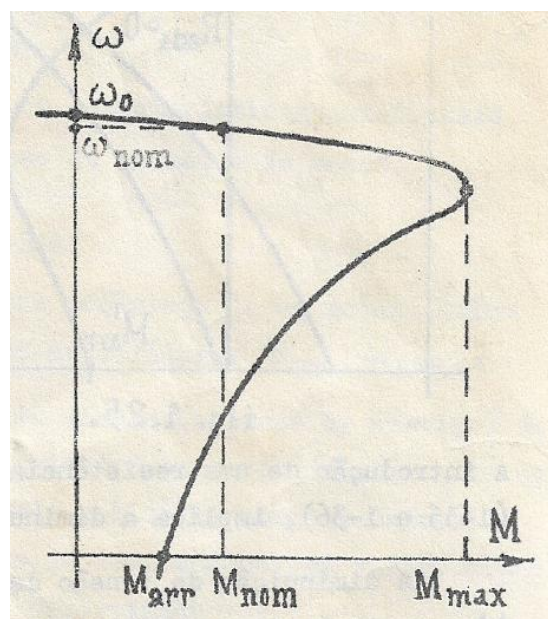


Figura 10: Característica mecânica natural (velocidade versus binário)

Fonte: Khoussainov, accionamentos eléctricos

2.5.3. Classificação dos motores das transportadoras quanto ao regime de funcionamento

Os motores das transportadoras (conveyors) são classificadas como sendo de regime permanente uma vez que a MOZAL é uma indústria de produção contínua.

Serviço permanente

Este é o regime de funcionamento com carga nominal e constante. A duração de trabalho é tão longa que se alcança o acréscimo estacionário da temperatura. A fig. 10 mostra o respectivo diagrama de carga e a curva de aquecimento. (Khoussainov, 1987)

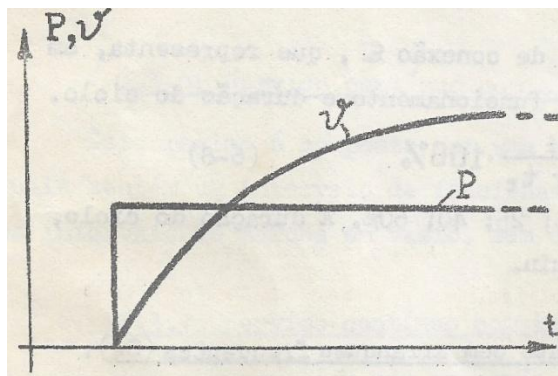


Figura 11: Diagrama de carga e curva de aquecimento

Fonte: Khoussainov, 1987

2.6. Mecanismos de Transmissão

Os mecanismos de transmissão são elementos mecânicos responsáveis por transferir movimento e força de uma parte de uma máquina para outra. Eles permitem ajustar características como velocidade, torque, direção e tipo de movimento (rotativo ou linear), garantindo que a energia gerada (por exemplo, por um motor) seja utilizada de forma eficaz no sistema. (Hamrock, 2005)

2.6.1. Características mecânicas dos mecanismos de produção

Chama-se característica mecânica de um mecanismo de produção à curva da sua velocidade, reduzida ao eixo do motor, em função do binário resistente, também reduzido. (Khoussainov, 1987)

Na aplicação de motores em indústrias, uma vez que na sua maioria são usados motores assíncronos, a característica mecânica dos mecanismos de transmissão pode ser vista na imagem abaixo:

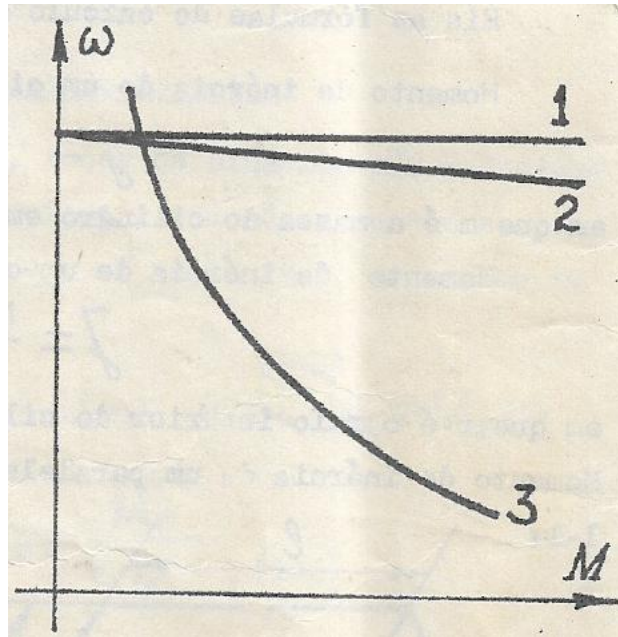


Figura 12: Característica mecânica dos mecanismos de produção acoplados em motores assíncronos

Fonte: Khoussainov, 1987



Figura 13: Caixa de engrenagem acoplada a um motor de indução

Fonte: <https://www.betech.co.uk/motovario/inline-helical-gearboxes/gearbox>

2.7. Inversor de frequência

Inversor de frequência é um dispositivo electrónico que controla a velocidade de motores de corrente alternada (AC) variando a frequência e a tensão da alimentação eléctrica.

Esses inversores utilizam componentes de estado sólido para ajustar a frequência da corrente fornecida ao motor, permitindo um controle preciso da velocidade e do torque. (CAMPBELL, 1987)

Os inversores de frequência são essenciais para aplicações que exigem variação de velocidade, como em sistemas de ventilação, bombas e compressores, proporcionando eficiência energética e desempenho otimizado.

O seu princípio de controle baseia-se na equação 2, onde temos a velocidade variada por meio da variação da frequência do motor.

$$n_s = \frac{120 \times f}{P}$$

(Eq. 8)

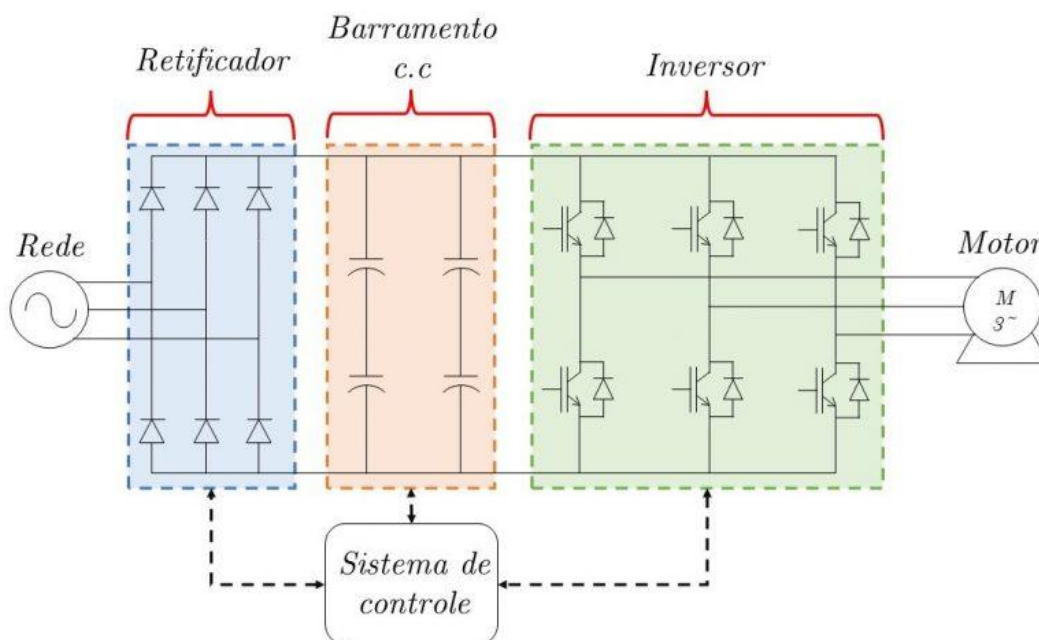


Figura 14: Esquema genérico de um inversor de frequência

Fonte: [Como funciona um inversor de frequência? – TermoBlog](#)

Na figura podemos ver:

Rede: composto por uma fonte de tensão alternada trifásica;

Rectificador: Composto por díodos rectificadores;

Barramento c.c.: Composto por um banco de capacitores;

Inversor: Composto por transístores bipolares de porta isolada.

2.8. Controlador lógico programável

Um controlador lógico programável (PLC) é um computador digital industrial que gerencia uma memória programável para o armazenamento interno de instruções direcionadas ao controlo de um processo, para estabelecer soluções específicas como funções lógicas, sequenciais, temporizações, contagens e funções aritméticas, de forma a intervir através de entradas e saídas, digitais e analógicas, vários tipos de máquinas ou processos de fabricação, como linhas de montagem, dispositivos robóticos ou qualquer actividade que requeira alta confiabilidade, facilidade de programação e processo diagnóstico de erro. (Bulande, 2022 apud WAYAND, 2019).

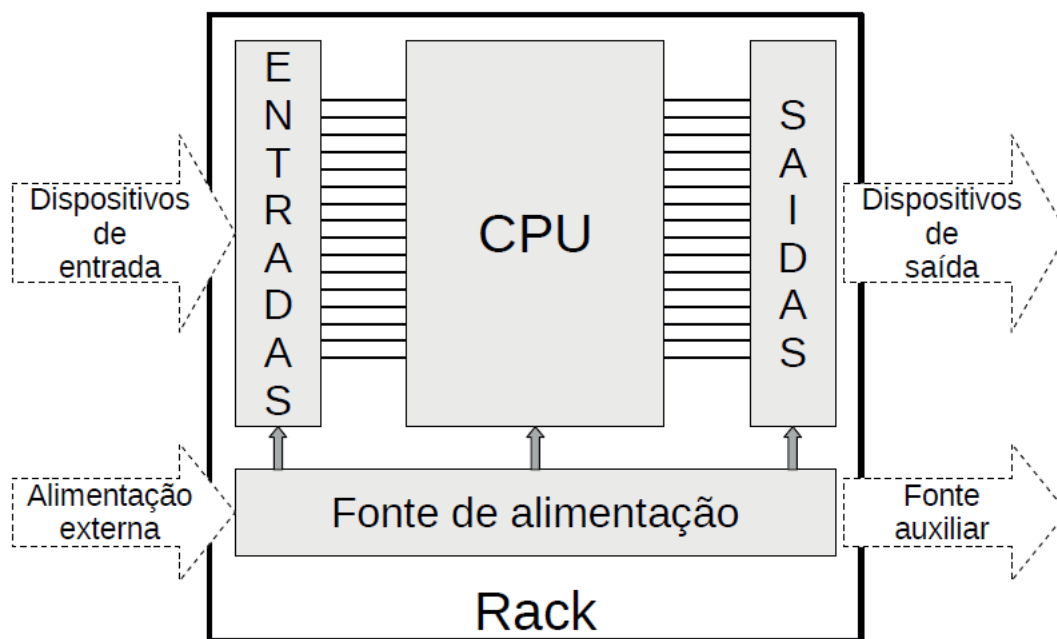


Figura 15: Estrutura física do CLP

Fonte: Mendes, 2021



Figura 16: PLC rack

Fonte: [Allen Bradley Plc Rslogix 5000](#)

2.8.1. Funções do PLC

Um PLC desempenha, entre outras, as seguintes funções:

- Colectar dados de fontes de entrada por meio de fontes digitais e analógicas;
- Tomar decisões com base em critérios reprogramados;
- Armazenar dados na memória;
- Gerar ciclos de tempo;
- Realizar cálculos matemáticos;
- Actuar em dispositivos externos por meio de saídas analógicas e digitais;
- Comunicar-se com outros sistemas externos.

2.8.2. Componentes de um PLC

CPU – A unidade central de processamento é o cérebro do PLC, tem a função de ler os valores lógicos presentes nas entradas, executar as instruções que constituem o programa e transferir para as saídas as ordens provenientes dessas instruções.

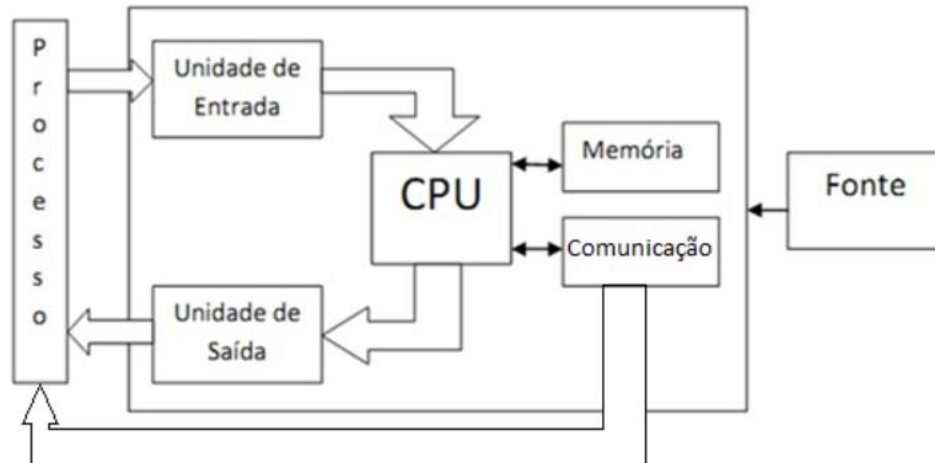


Figura 17: Diagrama de blocos de um PLC

Fonte: [Arquitetura do CLP | Professor Rafael Rodrigues da Silva](#)

Fonte de Alimentação

A fonte de alimentação é responsável pelo fornecimento de energia eléctrica ao CLP. Fornece todos os níveis de tensão exigidos para operações internas do CLP. Como os CLP são modulares, algumas vezes é necessário pensar numa segunda fonte para suportar o aumento de periféricos.



Figura 18: Fonte de alimentação de um PLC

Fonte: [Just a moment...](#)

Unidades ou cartas de Entrada e Saída

As entradas e saídas de um CLP são necessárias para monitorar e controlar um processo. Tanto

as entradas quanto as saídas podem ser categorizadas em dois tipos básicos: lógico ou contínuo. (MENDES, 2021)

As cartas de entrada e de saída também são conhecidas como unidade de entradas e de saída. São nestas unidades em que são conectados dispositivos tais como:

- Válvulas solenoides – saídas lógicas que podem alternar um fluxo hidráulico ou pneumático.
- Luzes – saídas lógicas que geralmente podem ser alimentadas diretamente das placas de saída do CLP.
- Partidas de motor – os motores frequentemente consomem uma grande quantidade de corrente quando dão partida, portanto, exigem partidas de motor, que são basicamente relés grandes.
- Servos motores – uma saída contínua do CLP pode comandar uma velocidade ou posição variável.



Figura 19: Cartas de entrada e saída do PLC

Fonte: [1756-OB16E | Allen Bradley | ControlLogix DC Output Modules](#)

EtherNet/IP

EtherNet/IP (Ethernet Industrial Protocol) é um protocolo de rede amplamente utilizado em automação industrial para comunicação entre dispositivos, como CLPs (Controladores Lógicos Programáveis), sensores, atuadores e sistemas de supervisão (SCADA). Baseia-se nos padrões Ethernet e utiliza o conjunto de protocolos TCP/IP e UDP/IP para transportar dados. (ODVA. 2023)

EtherNet/IP é rede corporativa da Rockwell que usa protocolos Ethernet e TCP/IP padrão.

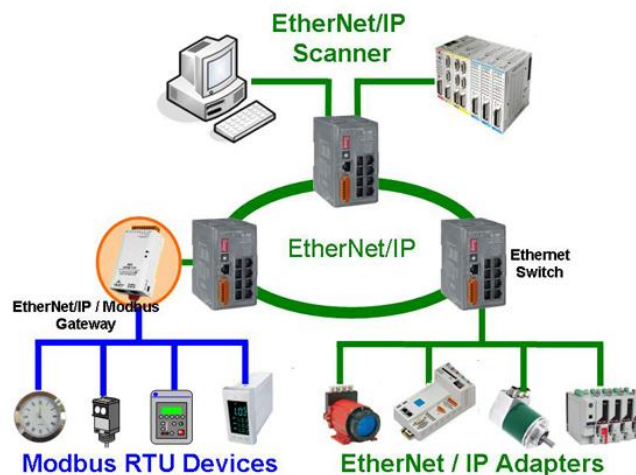


Figura 20: Arquitetura de Comunicação Industrial com EtherNet/IP

Fonte: http://www.icpdas.com/products/Remote_IO/can_bus/EtherNet_IP_series.htm

2.9. Unidade de potência hidráulica

É um sistema independente que fornece energia hidráulica a máquinas e equipamentos. Ele converte energia mecânica em energia hidráulica por meio de uma bomba acionada por motor (elétrico ou a combustão), permitindo o movimento e o controle de atuadores hidráulicos, como cilindros e motores. (Dixon, J. 2014)

As unidades de potência hidráulica são importantes para o accionamento de cilindros e actuadores que actuam de acordo com os sinais enviados pelos comandos sendo estes de botoeiras assim como pelo PLC.

2.9.1. Cilindros Hidráulicos

Os cilindros hidráulicos são atuadores lineares utilizados em sistemas hidráulicos para converter a energia hidráulica (pressão do fluido) em movimento mecânico linear. São amplamente empregados em máquinas industriais, equipamentos móveis (como escavadeiras), prensas e sistemas automatizados que exigem grande força e precisão.

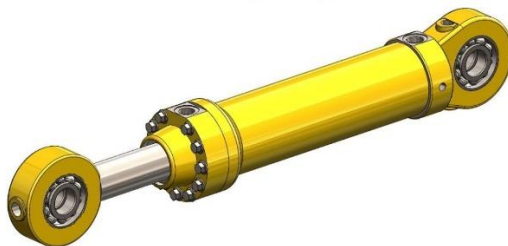


Figura 21: Cilindro hidráulico

Fonte: [Cilindros Especiales – HydraSystem Plus. Cilindros a medida](#)

2.9.2. Cilindros Pneumáticos

Os cilindros pneumáticos são atuadores lineares que convertem a energia do ar comprimido em movimento mecânico linear. Eles são componentes fundamentais em sistemas pneumáticos, utilizados amplamente na automação industrial, montagem de peças, sistemas de transporte e em equipamentos que não exigem forças extremamente elevadas. (Festo Didactic 2018)



Figura 22: Cilindro pneumático

Fonte: [Como funcionam os cilindros pneumáticos? | Global Hidráulica e Pneumática](#)

3. *CAPÍTULO III: PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO*

O presente capítulo visa demonstrar como funciona o processo de fundição de alumínio em indústrias de produção de alumínio, em todos os estágios.

3.1. PROCESSO DE PRODUÇÃO DO ALUMÍNIO

O alumínio é um dos metais mais utilizados na indústria moderna, devido às suas propriedades como leveza, resistência à corrosão, condutividade eléctrica e facilidade de conformação. A produção deste metal envolve um processo industrial dividido em três grandes etapas: extração da bauxita, refino da alumina e redução eletrolítica para obtenção do alumínio metálico.

A matéria-prima básica para a produção do alumínio é a bauxita, um minério rico em óxidos de alumínio, extraído principalmente em regiões tropicais. Após a extração, a bauxita é submetida ao processo Bayer, onde é transformada em alumina (Al_2O_3) por meio de reações químicas com soda cáustica e posterior calcinação.



Figura 23: Bauxita (a), Alumina (b)

Fonte: [Bauxita](#), [Alumina](#) | [apa](#)

Na fase final, a alumina é convertida em alumínio metálico por meio do processo Hall-Héroult, que consiste na eletrólise da alumina dissolvida em criolita fundida. Esse processo ocorre em cubas eletrolíticas e é altamente intensivo em consumo de energia eléctrica, fator determinante para a localização estratégica de indústrias de alumínio próximas a fontes de energia acessível, como no caso da MOZAL, em Moçambique.

Esse conjunto de processos industriais representa uma das cadeias produtivas mais importantes da metalurgia moderna, sendo essencial para diversos sectores como construção civil, transporte, embalagens e energia.

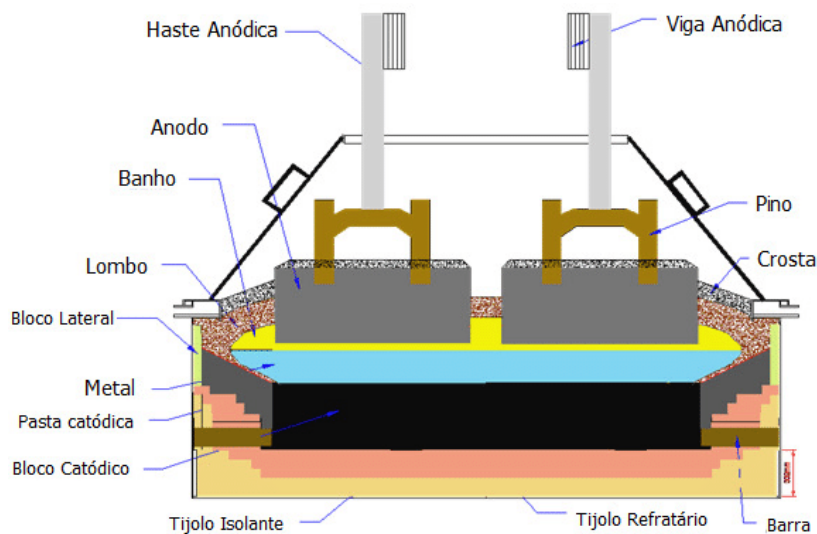


Figura 24: Pote de redução de alumínio e seus componentes

Fonte: [reducao de alumina – Search](#)

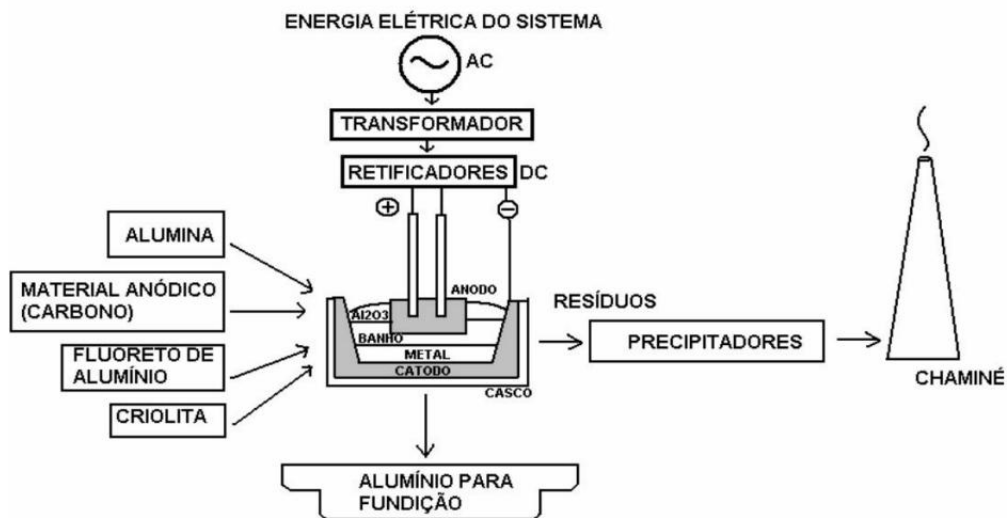


Figura 25: Esquema resumo do processo de produção de alumínio

Fonte: Guambe, (2023)

Após a obtenção do alumínio, este é levado para as Instalações de fundição de lingotes a uma temperatura de 950°C por meio de painéis metálicas com revestimento interno a base de material refractário.



Figura 26: Painel de transporte de alumínio

Fonte: Guambe, (2023)

3.2. Instalações de fundição de lingotes

O alumínio fundido é fornecido a partir das salas de fusão e armazenado antes da fundição em fornos de reserva. Estão disponíveis dois fornos, eléctricos e a óleo para a instalação da máquina de lingotes. O forno é inclinável e tem uma capacidade acima de 40 toneladas de alumínio fundido. (ELLIOTT, 1993)



Figura 27: Forno de manutenção

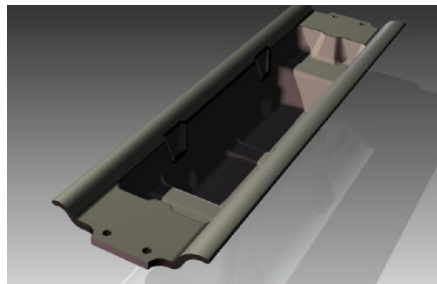
Fonte: (Guambe, 2023)

Após ser depositado em fornos, o processo de lingotamento é feito por meio da introdução do metal líquido a uma temperatura de pelo menos 730°C em moldes, por meio de uma conduta que entorna o metal líquido em moldes preaquecidos e efeitos à base de ferro.

O processo de lingotamento acontece por meio de uma esteira transportadora que contém moldes.



(a)



(b)

Figura 28: (a) Roda de fundição, (b) Molde para lingotes

Fonte: [ICS / Coulée et empilage des lingots | STAS](#)

Estes moldes são movimentados pela correia, logo após a solidificação, os lingotes passam para a segunda esteira transportadora onde o processo de arrefecimento inicia quando os lingotes se encontram a uma temperatura de 500°C e termina a uma temperatura de 55°C.

Após o arrefecimento os lingotes passam para a esteira transportadora em que são organizados por meio de um robô, formando bandos de aproximadamente uma tonelada, conforme pode ver-se na figura 29.



Figura 29: Alumínio

Fonte: [Ingots Casting Machine at ₹ 950000/piece | Ingots Casting Machine in Ahmedabad | ID: 2849391373388](#)

4. *CAPÍTULO IV : ESTUDO DE CASO*

O presente capítulo tem por objectivo descrever passo a passo a resolução do problema em causa, que é de se atingir a velocidade de produção de 20 ing/min no departamento de Cast House na mozal.

3.2. Mecanismo de leitura da velocidade

A velocidade de produção é feita por meio de um sensor que capta a passagem do sinal adquirido à medida que uma roda dentada acoplada ao mecanismo de transmissão gira, este por sua vez envia o sinal ao PLC, posteriormente estes sinais são manipulados de forma com que possa se verificar se a velocidade dos lingotes, uma vez que a cada momento que o sensor envia um sinal, um lingote é formado.

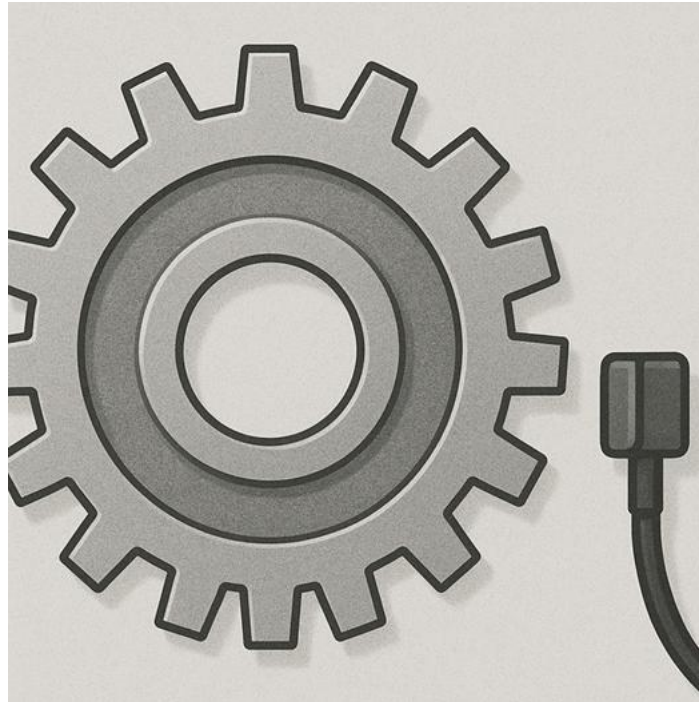


Figura 30: Roda dentada de medição da velocidade
Fonte: Autoria própria (Gerada por inteligência artificial)

3.3. Actual leitura da velocidade

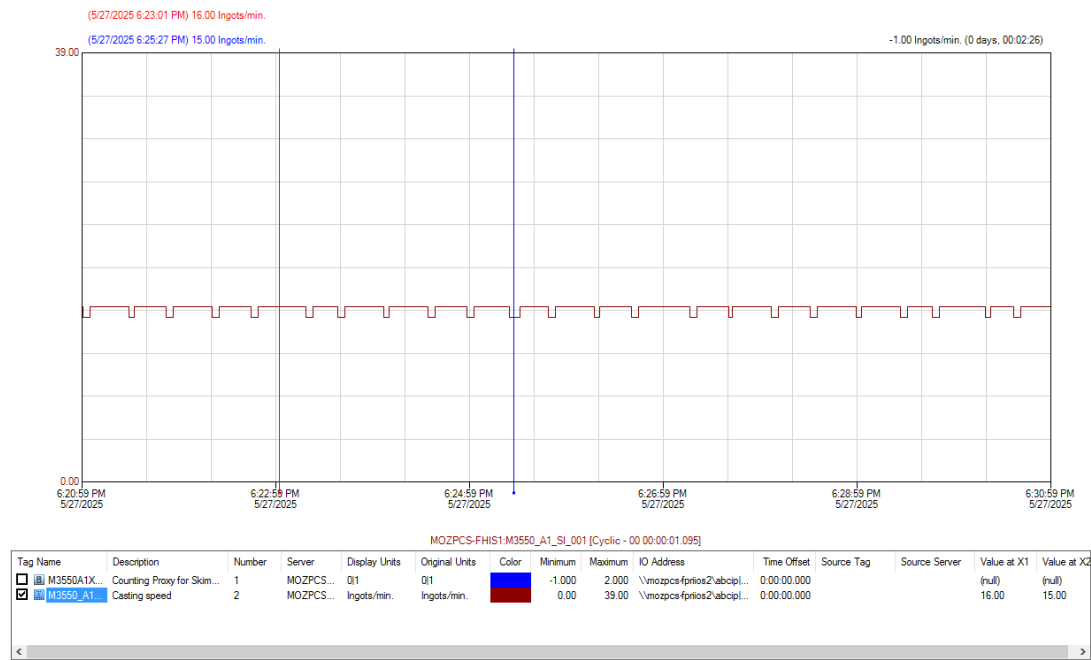


Figura 31: Gráfico da velocidade da linha de produção

Fonte: Autoria própria (TREND)

Conforme pode se observar no presente gráfico, a velocidade de casting num momento varia de 15 Ing/min para 16 Ing/min tendo a moda em 16 Ing/min.

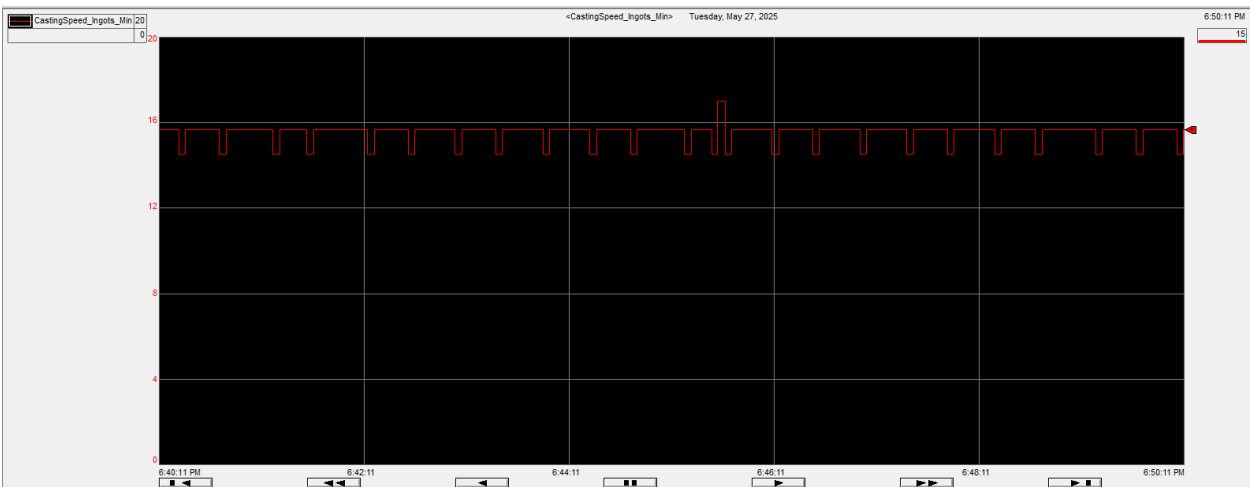


Figura 32: Gráfico da velocidade da linha de produção

Fonte: Autoria própria (STUDIO 5000 PLC)

A obtenção de diferentes leituras é necessária pelo facto desta permitir que se possa estabelecer uma relação mais verídica daquilo que é a velocidade durante o casting (Fundição).

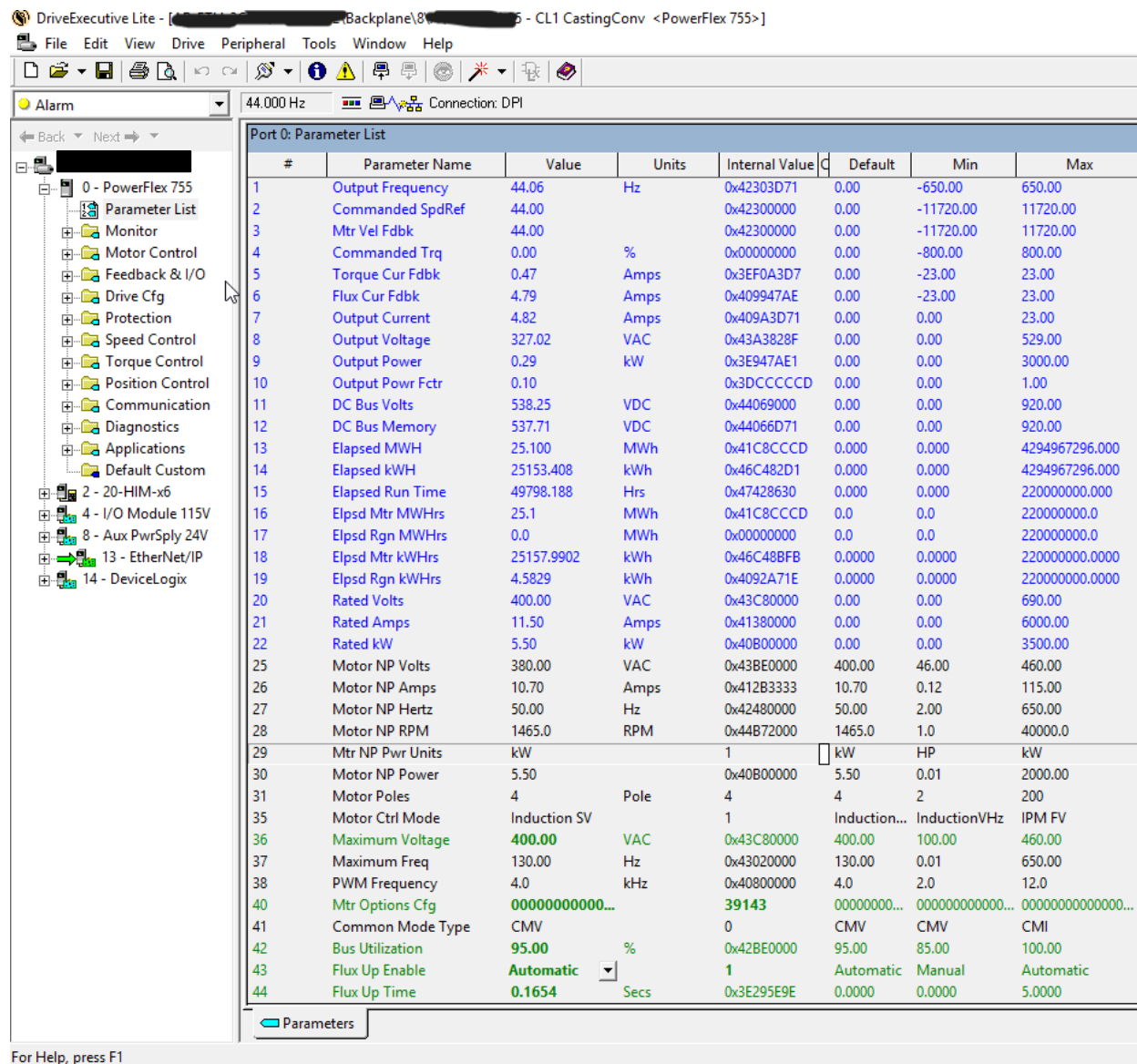


Figura 33: Estado do motor visto pelo VFD

Fonte: Drive executive

3.4. Estimativa de mudanças após implementação do projecto

Dados da produção

Capacidade do forno: 70 ton

Velocidade actual: 15-16 lng/min

Ingots por bando (Bandle): 44

Massa de cada lingote: 24Kg

$$IF = \frac{CF}{ML} = \frac{70ton}{0.024ton} = 2917ing$$

$$TF = \frac{2917}{16} = 182 \text{ min} \approx 3.04h$$

Sendo assim, com a actual velocidade pode-se observar que o forno inicia e termina em aproximadamente 3h de tempo.

Sendo que a velocidade desejada é de 20 lng/min, importa saber das mudanças que o aumento da velocidade trará para cada linha.

Tabela 2: Mudanças esperadas com o aumento da velocidade

CS	TF		DR	MG		FD
16 lng/min	3 h	180 min	0	0	0	7
17 lng/min	2.86 h	172 min	8 min	136 lng	3.2 ton	7.7
18 lng/min	2.7 h	160 min	20 min	360 lng	8.5 ton	8.15
19 lng/min	2.55 h	153 min	27 min	513 lng	12 ton	8.63
20 lng/min	2.4 h	146 min	34 min	680 lng	16 ton	9.17

Fonte: Autoria própria

Conforme pode se observar, com o aumento da velocidade também aumenta a capacidade de produção. Sendo assim, atendendo que a fábrica tem 5 linhas, importa saber qual seria o ganho para toda a fábrica, se houver um aumento da velocidade numa

unidade e gradualmente até aos 20 lng/min. Este cálculo foi feito usando como base a informação contida no anexo 3, referente ao mercado de alumínio.

Tabela 3: Ganhos esperados

CS	Ganho nas 5 linhas	Ganhos diários	Ganho em valores
16 lng/min	0	0	0
17 lng/min	16 ton	132 ton	304,000,00 USD
18 lng/min	42.5 ton	346.4 ton	796.720,00 USD
19 lng/min	60 ton	518 ton	1.191.400,00 USD
20 lng/min	80 ton	734 ton	1.688.200,00 USD

Fonte: Autoria própria

Para a resolução do presente problema, importa separar as metas em duas fases, que são:

1.ª fase – Alcance da velocidade estipulada durante o firmamento da MOZAL que é a de 18 lng/min;

2.ª fase – Alcance dos 18 lng/min, importa analisar as possíveis melhorias a serem feitas de forma que se possa alcançar a velocidade de 20 lng/min.

1.ª Fase

A resolução de problemas complexos exige uma abordagem clara e estruturada, que facilite a identificação das etapas envolvidas e a tomada de decisões. Para este fim, o fluxograma apresenta-se como uma ferramenta eficaz, permitindo representar graficamente o processo de resolução do problema de forma sequencial e lógica.

Neste contexto, será utilizado um fluxograma para representar visualmente os passos necessários para chegar à velocidade de 18 lng/min. Com ele, torna-se mais fácil compreender o fluxo das ações, identificar pontos críticos e propor melhorias no processo.

3.5. Fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1

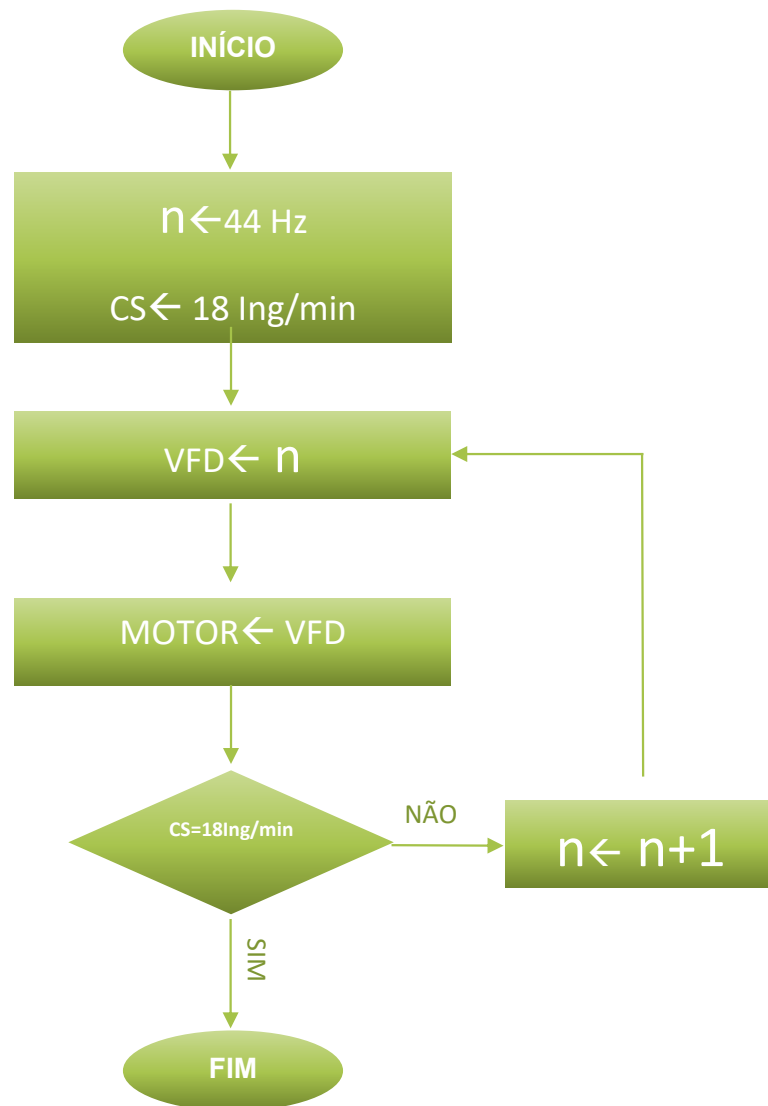


Figura 35: Fluxograma da fase 1

Fonte: Autoria própria

3.6. Interpretação do fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1

- No início, uma variável n recebe uma frequência de 44Hz, e a variável CS recebe 16 Ing/min, que corresponde a velocidade de produção;
- A seguir o variador de frequência recebe n e este entrega esta frequência ao motor;

- A variável CS é analisada de forma que se saiba se o funcionamento do motor oferece uma velocidade igual a 16 lmg/min, caso não, a variável **n** recebe um incremento unitário até que a condição seja satisfeita;

Nestas condições, observa-se que para a resolução do problema na primeira fase, consistiria em aumentar a frequência da tensão aplicada aos motores da primeira e o da segunda esteira transportadora.

3.7. Resultados obtidos

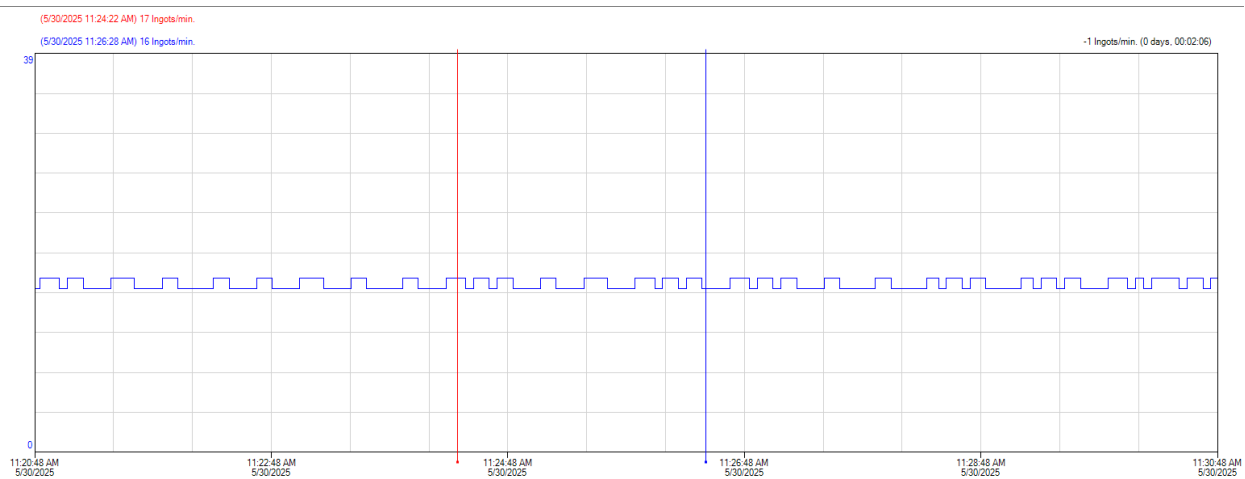


Figura 36: Velocidade de produção a uma frequência de 46Hz

Fonte: TREND APP



Figura 37: Velocidade da linha depois do aumento da frequência para 48Hz

Fonte: TREND APP

3.8. Ilustração do comportamento dos parâmetros oferecidos ao motor por meio do variador de frequência

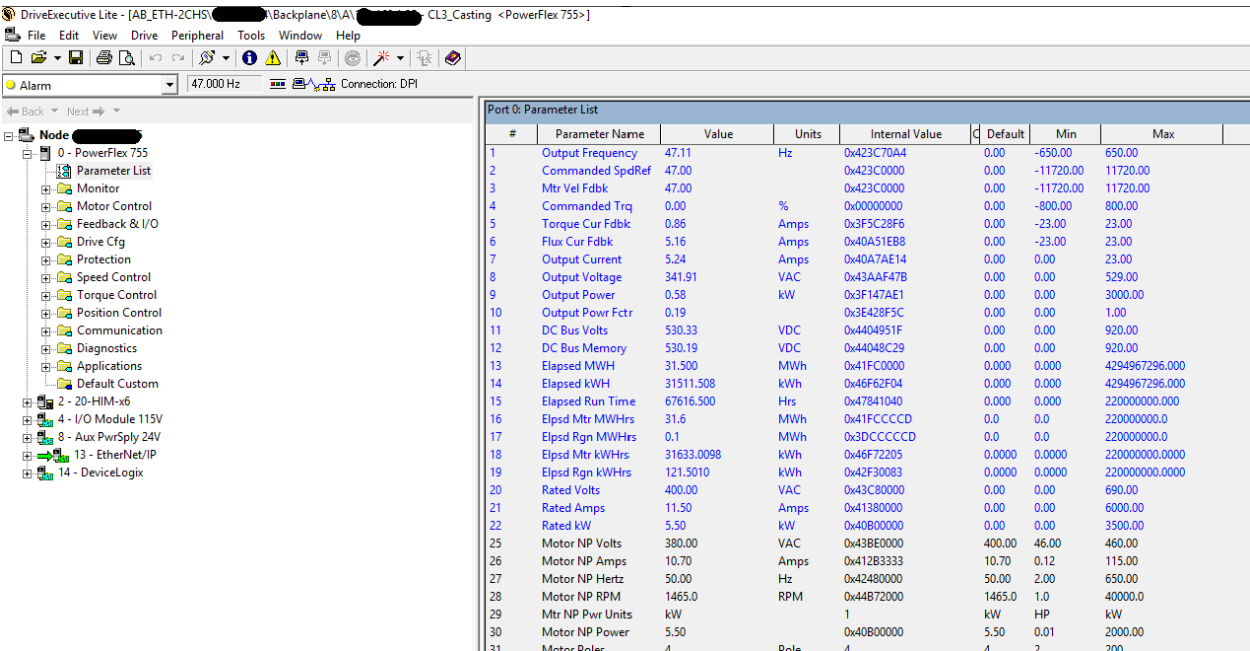


Figura 38: Estado do motor depois do aumento da frequência para 48Hz

Fonte: Drive executive

Pode se observar que a velocidade de 18 lmg/min, equivalente a um movimento de translação de 0.068m/s e atingida quando a frequência for de 48Hz.

Contudo, durante um estudo contínuo, concluiu-se que a velocidade da linha devia ser diminuída para o estado anterior, devido ao elevado número de avarias que eram verificadas, avarias estas que eram causadas pelos seguintes factores:

- Falta de sincronismo entre a área de desmolde e a primeira esteira transportadora.
- Redução do tempo de processamento da esteira transportadora número 3, causando assim embates e congestionamento, que resulta em paragens frequentes da linha.
- Erro na sequência de empacotamento no robô.

2ª fase

Alcance dos 18 lmg/min, importa analisar as possíveis melhorias a serem feitas de forma que se possa alcançar a velocidade de 20 lmg/min.

Elementos a serem analisados:

Velocidade inicial de processamento 18 lmg/min

Velocidade final de processamento 20 lmg/min

3.9. Fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 2

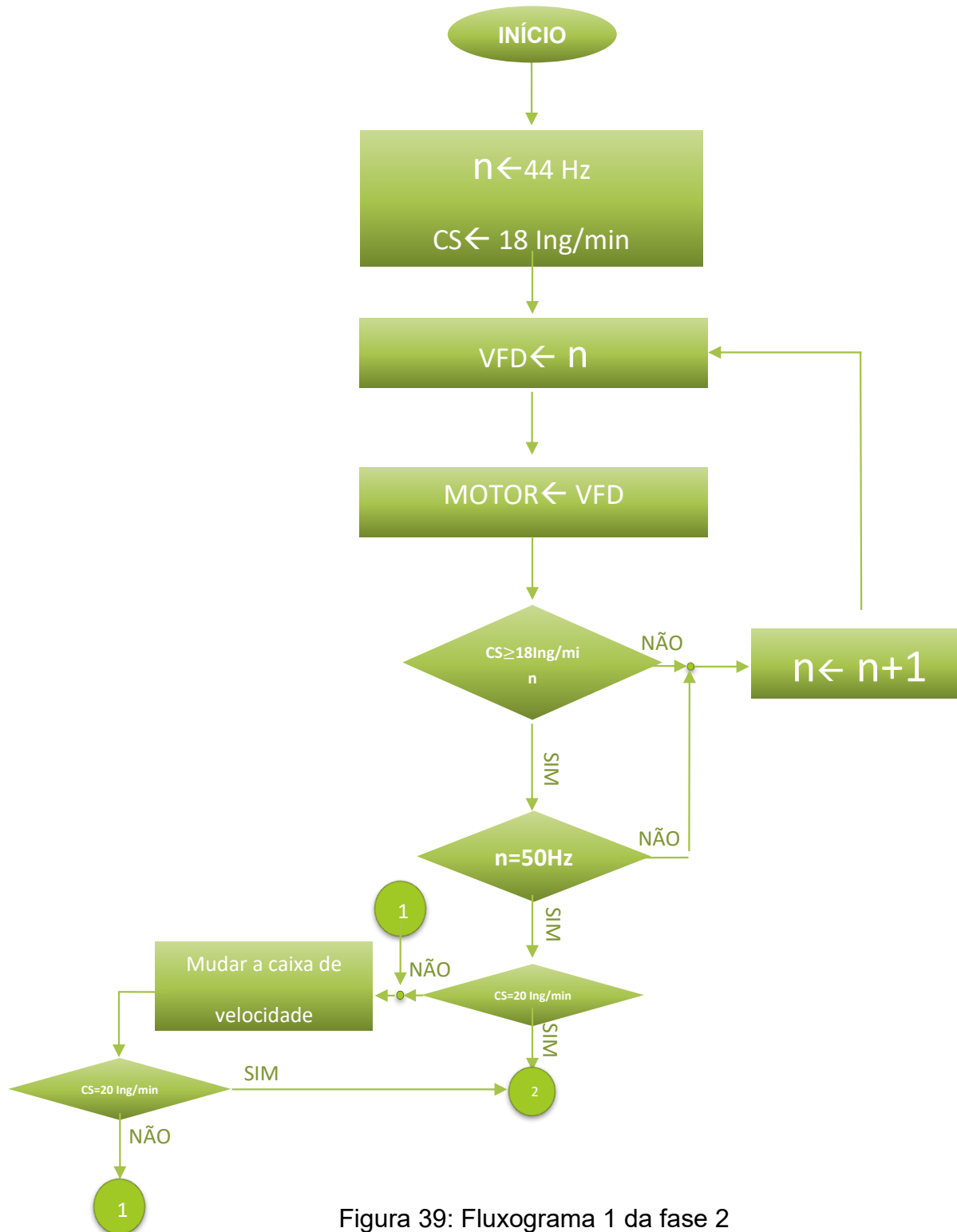


Figura 39: Fluxograma 1 da fase 2

Fonte: Autoria própria

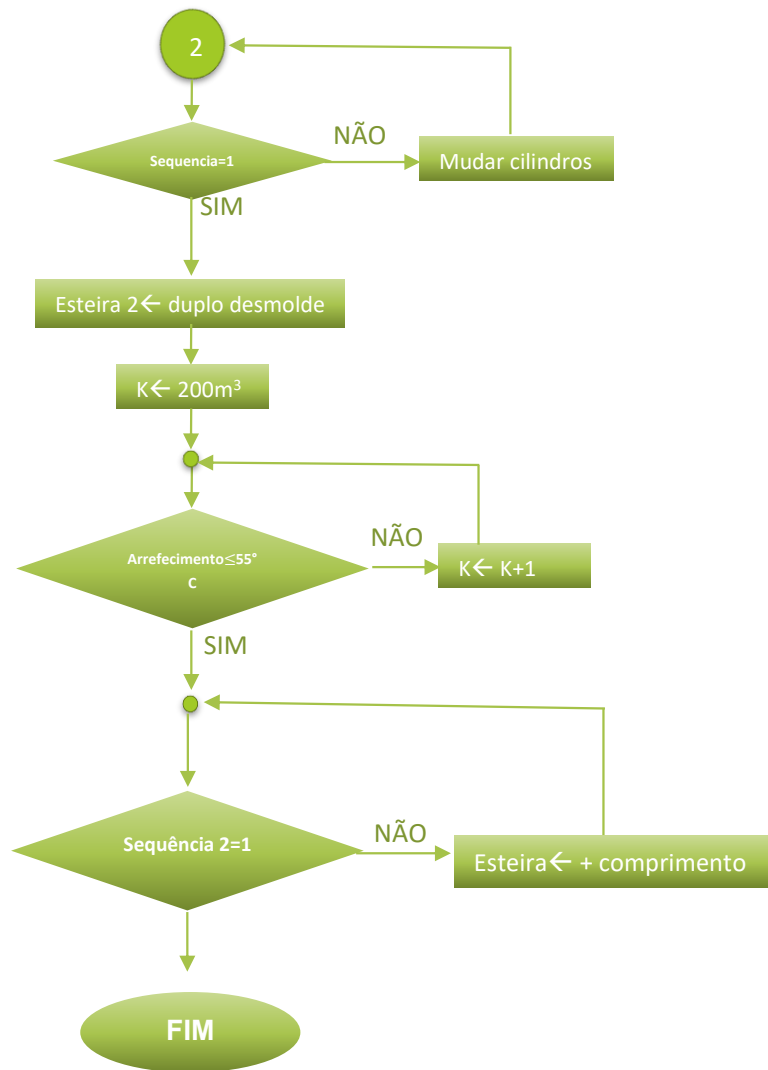


Figura 40: Fluxograma 2 da fase 2

Fonte: Autoria própria

3.9.1. Interpretação do fluxograma de proposta de melhoramento da velocidade para a fase 1

1. No início, uma variável n recebe uma frequência de 44Hz, e a variável CS recebe 16 lmg/min, que corresponde a velocidade de produção;
2. Em seguida o variador de frequência recebe n , e este entrega esta frequência ao motor;

3. A variável CS é analisada de forma que se saiba se o funcionamento do motor oferece uma velocidade igual a 16 lmg/min, caso não, a variável n recebe um incremento unitário até que a condição seja satisfeita;
4. Uma vez que se alcança a velocidade de 18 lmg/min, para se alcançar a velocidade de 20 lmg/min, importa saber se o limite de frequência já foi alcançado, sendo assim, outra decisão é feita, questionando primeiro se a variável n terá alcançado o seu limite de 50 Hz, correspondente a frequência máxima do motor, caso não tenha alcançado o seu limite, esta volta para a incrementação até que este limite seja alcançado;
5. Uma vez alcançado o limite a variável n, uma nova decisão é feita com base na comparação da velocidade anterior e a velocidade desejada, de 20 lmg/min, caso não tenha sido alcançada, o motor presente na esteira 1, recebe uma nova caixa de velocidade (GEAR BOX), com um raio menor para obter um aumento da velocidade na saída da caixa de velocidade;
6. A seguir, uma nova decisão é feita, que é a sequência 1, que representa o sincronismo no desmolde, caso não haja sincronismo, uma busca de melhoria é feita, procurando melhorar o sistema de desmolde, que seria mudar o tipo de cilindros presentes na área de desmolde, sendo estes hidráulicos, passariam a ser pneumáticos;
7. Tendo passado pela decisão da sequência 1, uma outra melhoria seria feita, que é o duplo desmolde;
8. Havendo resolvido todos possíveis cenários no desmolde, uma variável K recebe 200, correspondente a quantidade de água necessária para arrefecer o metal na área de arrefecimento, a seguir uma nova comparação é feita para se saber se o metal que sai da zona de arrefecimento está abaixo dos 55 °C, caso não seja igual, a variável K incrementa de modo a obter um fluxo de água que possa permitir que a temperatura do metal na saída seja igual ou inferior a 55 °C.
9. Por fim uma nova comparação é feita para saber se a sequência do metal na esteira 3 permite que haja o empilhamento de forma organizada, caso não, a esteira deve ser aumentada num comprimento de um metro, e desta forma termina a resolução do problema.

3.10. Proposta de mudança no mecanismo de transmissão

A caixa de engrenagem presente, apresenta as seguintes características:

Velocidade 1: $n_1=500$ rpm para 2000 rpm

Velocidade 2: $n_2=0,48$ rpm para 1,9 rpm

Torque de saída= 30000 Nm

Este tipo de mecanismo de transmissão é usado em situações em que claramente se busca um modo de alta redução, usado quando se precisa de muito torque e precisão, como:

- Movimentar cargas pesadas lentamente.
- Aplicações em guindastes, moinhos, mesas giratórias industriais.

Este tipo de engrenagem costuma denominar-se engrenagem planetária com redução extrema.

Sendo assim, para que se possa atingir a velocidade de 20 lmg/min, é necessário que além das outras condições sejam satisfeitas, em primeiro lugar se mude a caixa de engrenagens, de forma que se possa obter uma velocidade ainda maior, uma vez que matematicamente temos os resultados abaixo

3.11. Cálculo da relação de transmissão

Relação de transmissão

$$\alpha = \frac{n_1'}{n_2'} = \frac{500}{0,48} = 1041,7$$

(Eq.9)

Onde: n_1 – corresponde a velocidade mínima de entrada do mecanismo de transmissão

n_2 – corresponde a velocidade mínima de entrada do mecanismo de transmissão

Potência de entrada requerida

$$P = \frac{T \times n}{9550}$$

(Eq.10)

Onde:

n – corresponde a velocidade mínima de entrada do mecanismo de transmissão [rpm];

T – Corresponde ao torque na saída do mecanismo de transmissão [Nm];

Para $n_2=0,48$ rpm

$$P = \frac{30000 \times 0,48}{9550} = 1,507 \text{ kW}$$

Para $n_2=1,9$ rpm

$$P = \frac{30000 \times 1,9}{9550} = 5,97 \text{ kW}$$

Essa caixa de engrenagens serve para aplicações que exigem:

- Altíssimo torque;
- Baixíssima velocidade de saída;
- Funcionamento sob carga constante.

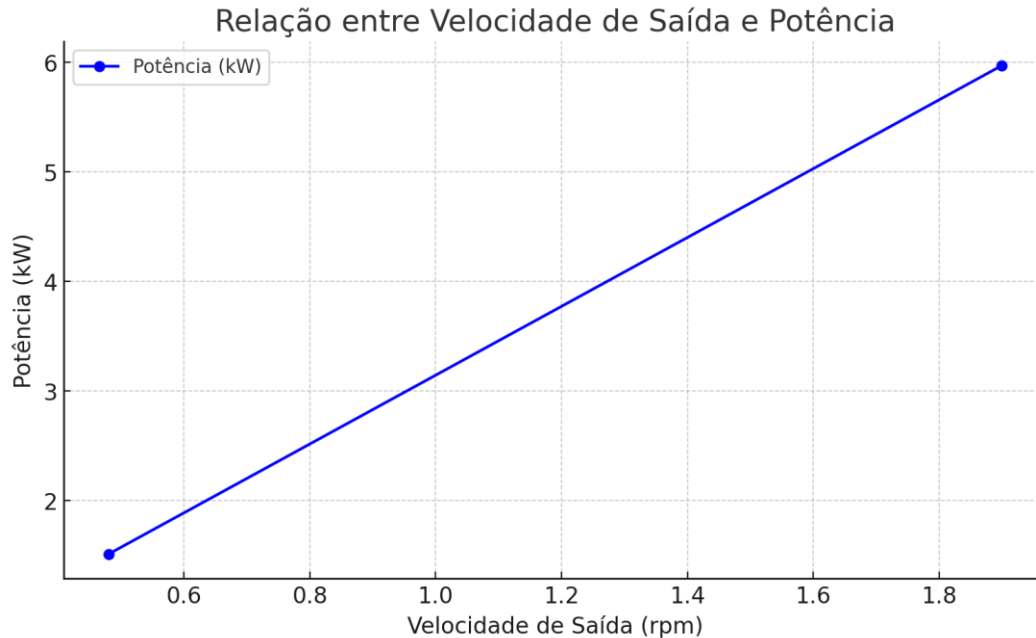


Figura 34: Gráfico da relação entre a velocidade de saída (n_2) e a potência necessária para manter o torque constante de 30.000 Nm

Fonte: Matplotlib (Autoria própria)

Conforme pode se verificar, a potência de entrada requerida está dentro dos valores admissíveis para a capacidade do motor, uma vez que o motor tem uma capacidade de 5,5kW. Nestas condições, resta determinar que mudanças pode se fazer de forma que se um novo mecanismo de transmissão com uma relação de transformação correspondente.

Determinação do raio do mecanismo de transmissão

Para projectos conservadores, a tensão admissível de cisalhamento para AISI 4140 (Cromo-molibdênio) costuma ser de 50 Mpa.

$$T = \frac{\pi}{16} \cdot \tau_{adm} \cdot d^3$$

(Eq. 11)

Onde:

T – Torque (Nm)

T_{adm} – tensão admissível de cisalhamento (N/mm²); **d** – diâmetro do eixo (mm)

$$d = \sqrt[3]{\frac{T \times 16}{\tau \pi}}$$

(Eq. 12)

Com torque admissível de 50 Mpa, o diâmetro mínimo seria de 145,11mm, contudo, levando em consideração outros factores tais como, factor de serviço, factor de segurança ≥ 1.5 , o valor mínimo do diâmetro passará a ser o de 170mm.

Nestas condições, a solução ideia seria de usar um novo mecanismo de transmissão com pelo menos 170mm de diâmetro e que não seja superior ao actual, tendo em conta os seguintes factores:

- Ambiente;
- Factor de serviço;
- Temperatura;
- Tipo de lubrificação.

Um exemplo deste mecanismo de transmissão pode ser visto no anexo 2.

3.12. Estado do motor

Com as observações feitas, mostram que não existe necessidade de fazer mudanças no mecanismo gerador de energia mecânica, uma vez que o mesmo é de 4 polos e com potência de 5.5kW, sabe-se que um motor de 6 polos seria ainda melhor, contudo, os cálculos das potências de entrada no mecanismo de transmissão para as diferentes velocidades, fazem concluir que não haja necessidade de alterar-se o motor para um de maior potência, ou para um de maior velocidade. O motor em causa pode ser visto no

anexo 1 juntamente com todas as características mediante o seu acionamento com o VFD.

3.13. Observações no Variador de frequência (VFD)

Uma vez que não existiu necessidade de aplicar modificações no motor, assim também não foi necessário aplicar nenhuma mudança no variador de frequência do motor, pelo que o funcionamento do mesmo em nada influenciará, no anexo 1 pode se observar que o motor a ser usado encontra-se dentro dos parâmetros admissíveis, em temperatura, o seu comportamento quando operado por meio de um inversor de frequência.

Os presentes variadores de frequência comandando o motor eléctrico pode ser visto no anexo 4.

4. Estimativa de custos

Atentando para o fluxograma de resolução do problema na fase 2, os custos a serem levados em consideração são dos seguintes equipamentos:

- Mecanismo de transmissão da velocidade e acessórios para as esteiras 1 e 2, sendo o preço de cada um de 97.000,00 USD;
- Cilindros pneumáticos e acessórios, sendo o preço de cada um estimado em 500,00 USD;

Sendo assim, estima-se que o valor mínimo a ser usado para aumentar a velocidade em todas as linhas, seja de 975.000,00 USD, para o câmbio de 2 de junho em meticais seriam necessários cerca de 61.688.250,00 meticais como valor mínimo necessário.

5. CAPÍTULO V: CONCLUSÕES & RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo contém as conclusões alcançadas na investigação e que deram origem às recomendações a serem levadas em consideração para a execução da proposta.

5.1. Conclusões

O objetivo deste trabalho foi propor melhorias significativas na velocidade de produção das linhas de processamento de metal líquido na empresa Mozal, com um enfoque urgente na modernização dos seus componentes eléctricos e mecânicos. A análise concluiu que as linhas não estão a funcionar a 18 lingotes por minuto, como previsto, mas abaixo desse valor. Isto compromete a eficiência global da produção.

Identificaram-se as causas da desaceleração: envelhecimento dos equipamentos, dificuldade na substituição de componentes específicos e limitações no controlo de velocidade dos motores. O estudo propõe claramente o uso de variadores de frequência, a atualização de caixas de engrenagens e a reavaliação dos cilindros actualmente usados e migrar para os cilindros pneumáticos. Estas são as alternativas viáveis para otimizar o processo produtivo.

A implementação das melhorias sugeridas vai permitir à Mozal atingir a meta de 20 lingotes por minuto. Isto vai promover ganhos significativos em produtividade e eficiência energética, sem comprometer a segurança nem a integridade do processo. É essencial realizar testes em escala real e acompanhar os indicadores de desempenho de forma contínua para garantir a sustentabilidade dos resultados.

Sendo assim, todos os objectivos específicos foram alcançados.

5.2. Recomendações

Como recomendações ficam as seguintes instruções:

- **Realizar testes piloto em uma das linhas**, para validar os ganhos esperados com as melhorias propostas, antes da expansão para toda a planta;
- **Estabelecer indicadores de desempenho (KPIs)** específicos para as linhas reformadas, como velocidade real, consumo específico de energia e disponibilidade operacional, para garantir o acompanhamento dos resultados obtidos após a implementação;

6. Bibliografia e linkografia

1. GUPTA, A., ARORA, S., & WESTCOTT, J. R. (2016). *Industrial Automation and Robotics: An Introduction*. Boston: Mercury Learning & Information.
2. Groover, M. P. (2019). *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing* (4th ed.). Pearson.
3. Nof, S. Y. (2009). *Springer handbook of automation*. Springer.
4. Schwab, K., & Zahidi, S. (2020). *The future of jobs report 2020*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/reports/the-future-of-jobs-report-2020> 14 de Abril de 2025.
5. Librain. (2024). Sinais Analógicos E Digitais [JPG] <https://pim.cpcompany.com/dedu/sinais-analogicos-e-digitais.html> acessado aos 14 de Abril de 2025.
6. Transmissor 2025. [PNG] [Smar – LD290 Transmissor de Pressão](#)
7. Instrumentação. Encoder [PNG], disponível em: [Industrial Supplies, Encoder, Npn Open Collector Output Type Practical For Height And Weight Scale Steel Cut Length Control – Walmart.ca](#) Acesso 14 de Abril de 2025
8. Motor de indução trifásico, [PNG] www.indiamart.com Acesso: 14 de Abril de 2025
9. Chapman, S. J. (2011). Circuito equivalente por fase de um motor de indução [PNG]
10. CREUS, A. (2009). *Instrumentación Industrial* (8 ed.). Mexico: ALFAOMEGA MARCOMBO
11. Redjaen, (2011) Matéria prima para a produção do alumínio [PNG] [Bauxita](#) acessado em 13 de maio
12. Esquema genérico de um inversor de frequência, [PNG] [Como funciona um inversor de frequência? – TermoBlog](#), Acesso: 14 de Abril de 2025
13. PLC rack, [Allen Bradley Plc Rslogix 5000](#) [PNG] Acesso: 07 de Maio de 2025
14. Diagrama de blocos de um PLC, [PNG] [Arquitetura do CLP | Professor Rafael Rodrigues da Silva](#)
15. Cartas de entrada e saída do PLC, [PNG] [1756-OB16E | Allen Bradley | ControlLogix DC Output Modules](#)

16. Arquitetura de Comunicação Industrial com EtherNet/IP, [PNG]
http://www.icpdas.com/products/Remote_IO/can_bus/EtherNet_IP_series.htm
Acesso: 14 de Abril de 2025
17. Halliday, Resnick e Walker (Fundamentos da Física, Volume 2, 10ª ed., 2016);
18. REUS, António. *Instrumentação Industrial e Automação de Processos*. 7ª ed. São Paulo: LTC, 2009.
19. Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Máquinas Elétricas*. McGraw-Hill.
20. Chapman, S. J. (2011). *Electric Machinery Fundamentals* (5th ed.). McGraw-Hill Education.
21. Gray, F. (1953). "Pulse Code Communication." U.S. Patent 2,632,058
22. Khoussainov, I. (1987). *Accionamentos electricos*, Maputo.
23. Hamrock, B. J., Schmid, S. R., & Jacobson, B. O. (2005). *Fundamentals of Machine Elements* (2nd ed.). McGraw-Hill.
24. Bulande B. (2022), implementação de uma bancada laboratorial para o controlo automático da temperatura e pressão da água monitorada através de uma interface homem-máquina (IHM), Maputo.
25. MENDES, Rafael Manfrin. *Programação de CLPs: métodos e técnicas*. 1ª ed. Sao Paulo: Editora Scienza, 2021. Disponível em:
https://editorascienza.com.br/ebook/rafael_manfrin_v_1.pdf . Acesso em: 19 de Maio de 2025.
26. Guambe J. (2023), *Uso alternativo da criolita residual dos fornos de manutenção de alumínio na produção de betão. Caso mozal*
27. Esposito, A. (2009). *Fluid Power with Applications* (7th ed.). Pearson.
28. Festo Didactic (2018). *Tecnologia da Pneumática – Manual Básico*. Festo Brasil.
29. PAUL A. ELLIOTT (1993). *25 kg ingot height control system*
30. Flender GmbH (2023). *Technical Manual BA 5010 – Gear Units*. Siemens AG.
31. Maitra, G. M. (2001). *Handbook of Gear Design*. Tata McGraw-Hill Publishing.
32. Flender GmbH (2023). *Technical Manual BA 5010 – Gear Units*. Siemens AG.

ANEXOS

Estão presentes nas paginapáginass seguintes, os anexos que serviram de apoio para a realização do presente relatório de estágio.

Anexo 1: Dados do motor eléctrico

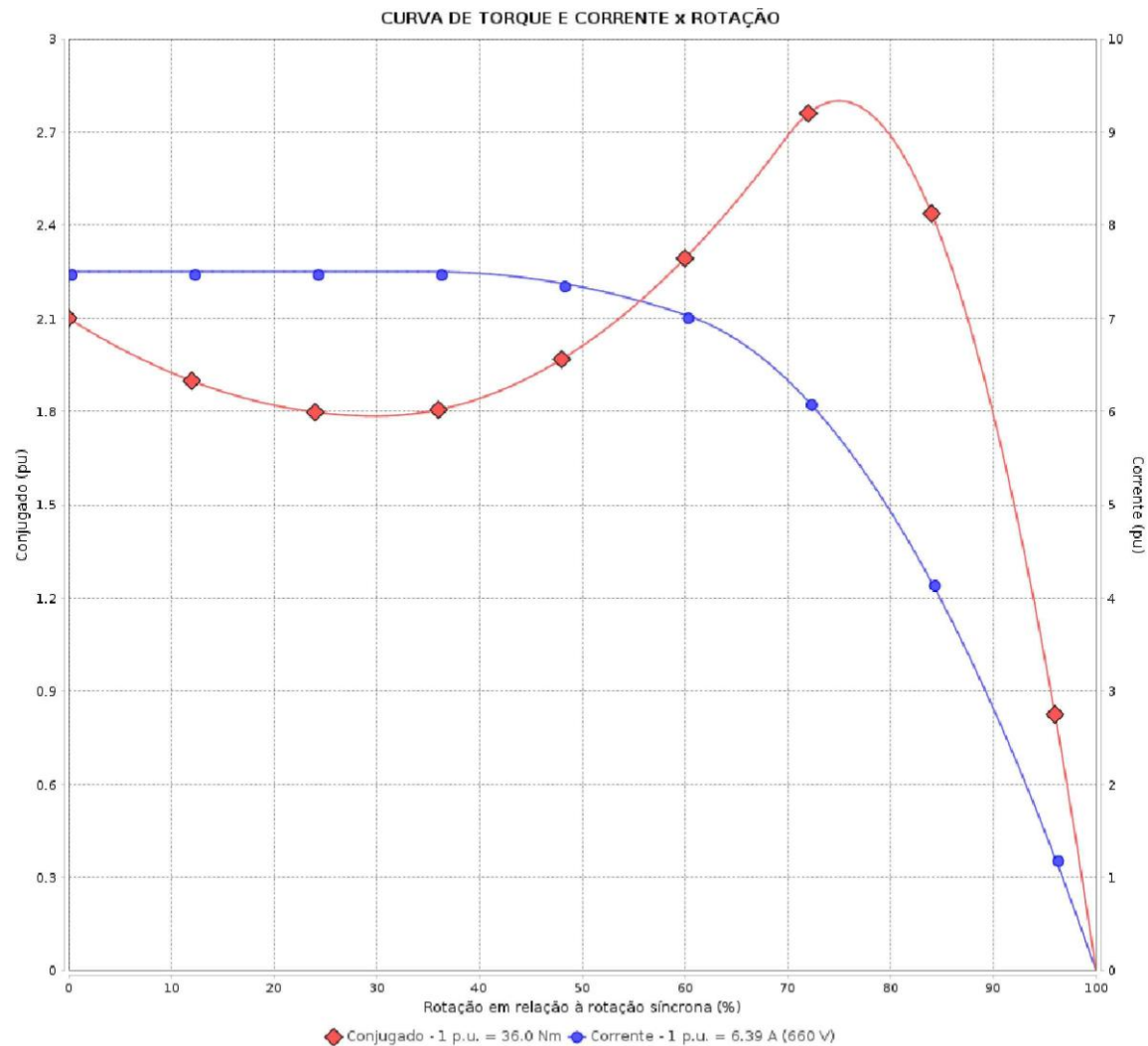
TABELA A 1-1: Características técnicas do motor eléctrico

Linha do produto		: W22 IE3 Trifásico		Código do produto : 12868213	
Carcaça	:	132S	Método de refrigeração	:	IC411 - TEFC
Classe de isolamento	:	F	Forma construtiva	:	B5T
Regime de serviço	:	S1	Sentido de rotação ¹	:	Ambos
Temperatura ambiente	:	-20°C a +40°C	Método de partida	:	Partida direta
Altitude	:	1000 m	Massa aproximada ³	:	68.8 kg
Grau de proteção	:	IP55	Momento de inércia (J)	:	0.0491 kgm²
Categoria	:	N			
Potência [kW]		5.5			5.5
Número de polos		4			4
Frequência [Hz]		50			50
Tensão nominal [V]		380/660			415
Corrente nominal [A]		11.1/6.39			10.7
Corrente de partida [A]		83.2/47.9			93.7
I _p /I _n [A]		7.5			8.8
Corrente a vazio [A]		4.50/2.59			5.20
Rotação nominal [RPM]		1460			1465
Escorregamento [%]		2.67			2.33
Conjugado nominal [Nm]		36.0			35.9
Conjugado de partida [%]		210			250
Conjugado máximo [%]		280			340
Fator de serviço		1.00			1.00
Elevação de temperatura		80 K			80 K
Tempo de rotor bloqueado		21s (frio) 12s (quente)			18s (frio) 10s (quente)
Nível de ruído ²		56.0 dB(A)			56.0 dB(A)
Rendimento (%)	25%	0.000			0.000
	50%	89.0			88.5
	75%	89.6			89.6
	100%	89.6			89.8
Cos Φ	25%	0.00			0.00
	50%	0.70			0.61
	75%	0.81			0.70
	100%	0.84			0.80
Perdas nos pontos de operação normativos (rotação;conjugado), em relação a potência nominal					
Perdas (%)		P1 (0,9;1,0)	11.3		11.1
		P2 (0,5;1,0)	9.7		9.5
		P3 (0,25;1,0)	9.3		9.1
		P4 (0,9;0,5)	5.6		5.5
		P5 (0,5;0,5)	4.0		3.9
		P6 (0,5;0,25)	2.7		2.7
		P7 (0,25;0,25)	1.9		1.9
Tipo de mancal	:	Dianteiro 6308 ZZ	Traseiro 6207 ZZ	Esforços na fundação	
Vedação	:	Retentor com mola	Retentor	Tração máxima	: 1696 N
				Compressão máxima	: 2372 N
Intervalo de lubrificação	:	-	-		
Quantidade de lubrificante	:	-	-		
Tipo de lubrificante	:	Mobil Polyrex EM			

Fonte: industry.siemens.com/dl/files/640/109757640

Anexo 1: Dados do motor eléctrico

Motor Trifásico de Indução - Rotor de Gaiola



Desempenho : 380/660 V 50 Hz 4P			
Corrente nominal	: 11.1/6.39 A	Momento de inércia (J)	: 0.0491 kgm²
Ip/In	: 7.5	Regime de serviço	: S1
Conjugado nominal	: 36.0 Nm	Classe de isolamento	: F
Conjugado de partida	: 210 %	Fator de serviço	: 1.00
Conjugado máximo	: 280 %	Elevação de temperatura	: 80 K
Rotação nominal	: 1460 rpm	Categoria	: N
Tempo de rotor bloqueado : 21s (frio) 12s (quente)			

Figura A 1-2: Curva de toque Corrente versus rotação

Fonte: industry.siemens.com/dl/files/640/109757640

Anexo 1: Dados do motor eléctrico

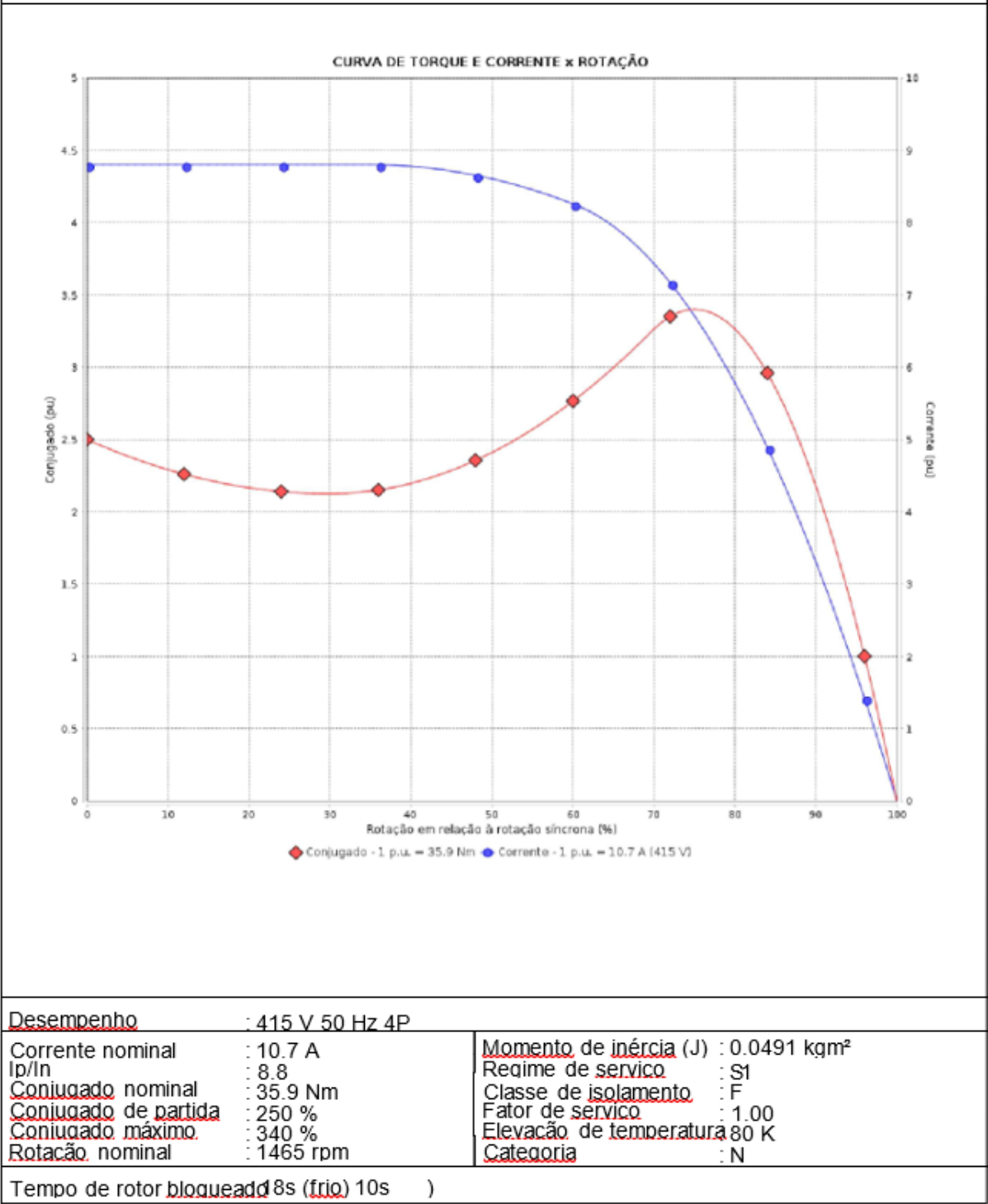


Figura A 1-3: Curva rotação em relação a rotação síncrona

Fonte: industry.siemens.com/dl/files/640/109757640

Anexo 1: Dados do motor eléctrico

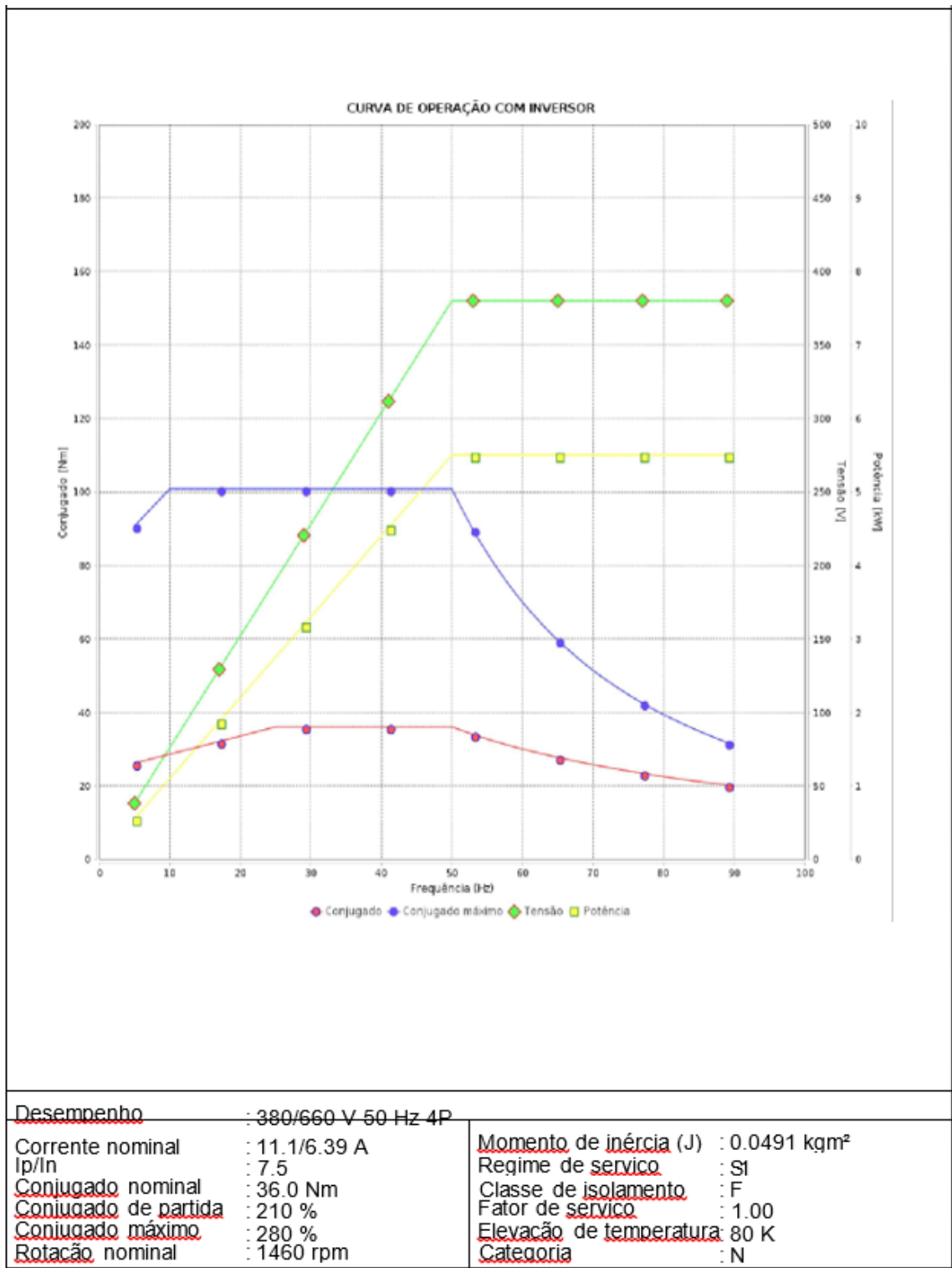


Figura A 1-4: Curva de operação do motor com inversor
Fonte: industry.siemens.com/dl/files/640/109757640

Anexo 2: Mecanismos de transmissão em diferentes vistas

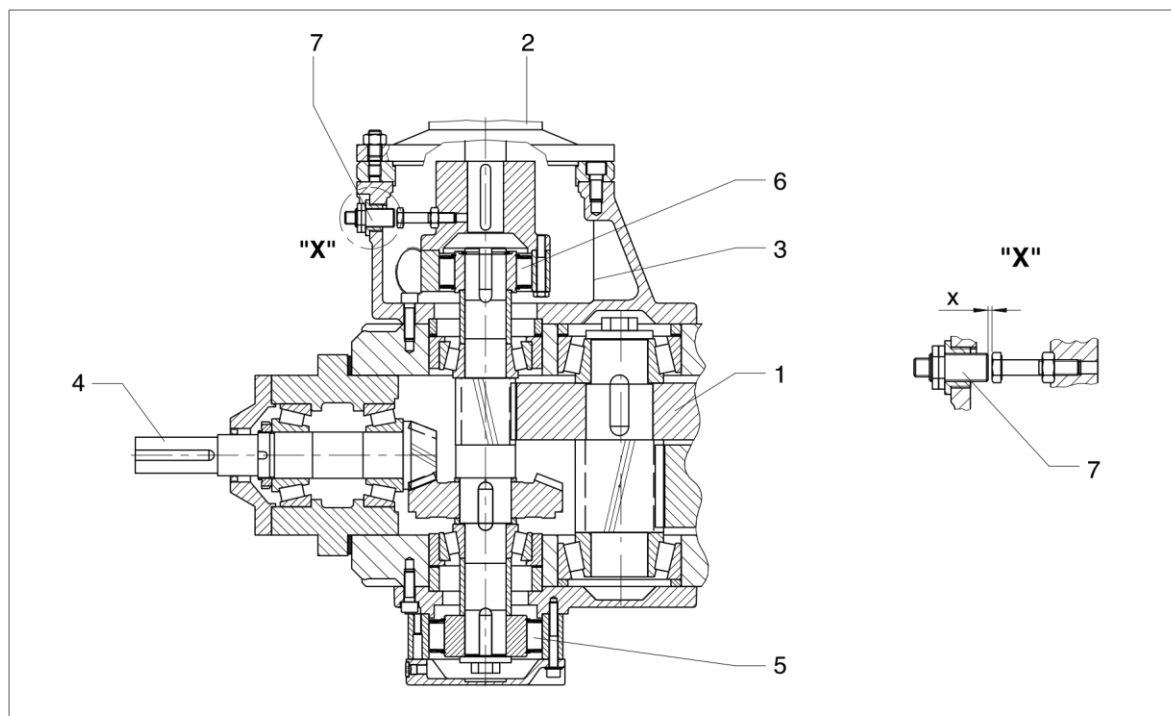


Figura A 2-5: Corte longitudinal de um mecanismo de transmissão
Fonte: Flender GmbH (2023)

Anexo 2: Mecanismos de transmissão em diferentes vistas

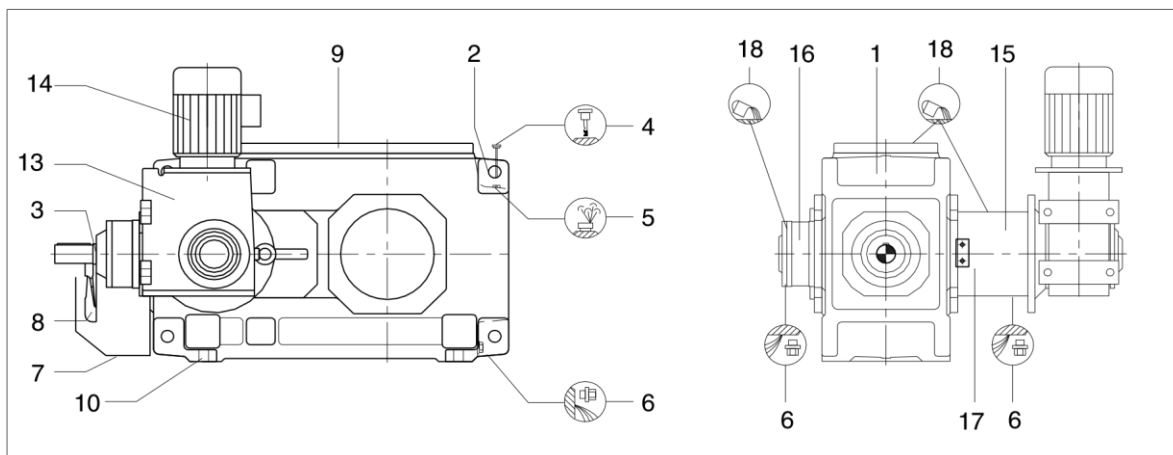


Figura A 2.1-6: Vista lateral esquerda de um mecanismo de transmissão

Fonte: Flender GmbH (2023)

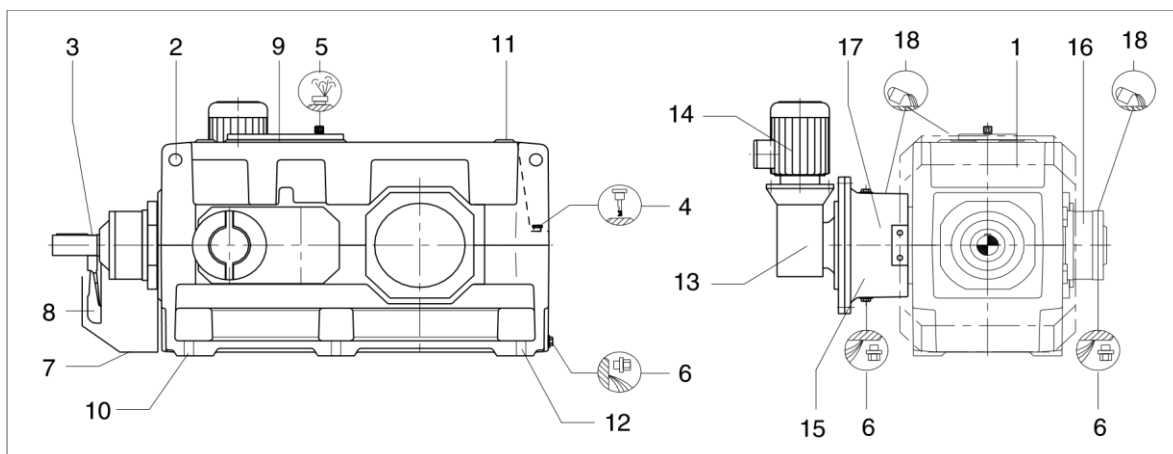


Figura A 2.2-6: Vista de lateral direita de um mecanismo de transmissão

Fonte: Flender GmbH (2023)

Anexo 2: Mecanismos de transmissão em diferentes vistas

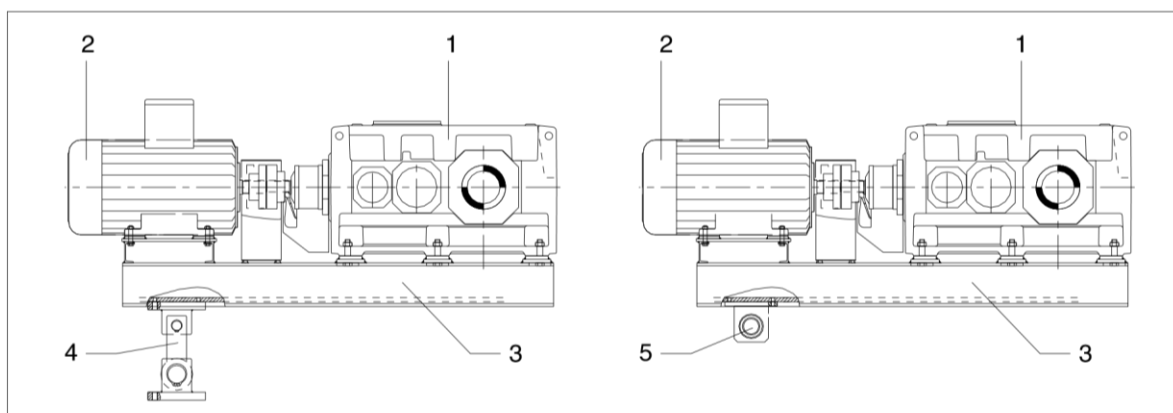


Figura A 2-7: Vista frontal de um mecanismo de transmissão

Fonte: Flender GmbH (2023)

Anexo 3: Mercado do alumínio

Preço do Alumínio Hoje (em Dólares)

Data do relatório: 10/06/2025

Confira abaixo os preços atualizados do alumínio em dólar por tonelada métrica conforme diferentes fontes:

Tabela 3-8: Preço do alumínio em diferentes mercados

Fonte	Valor (USD/ton)	Data
TradingEconomics	US\$ 2.465,80	10 de junho de 2025
Investing.com	US\$ 2.485,10	10 de junho de 2025
SMM (China, ingot)	US\$ 2.477,53	10 de junho de 2025

Fonte: TradingEconomics.com

Anexo 4: Controle de velocidade pelo software

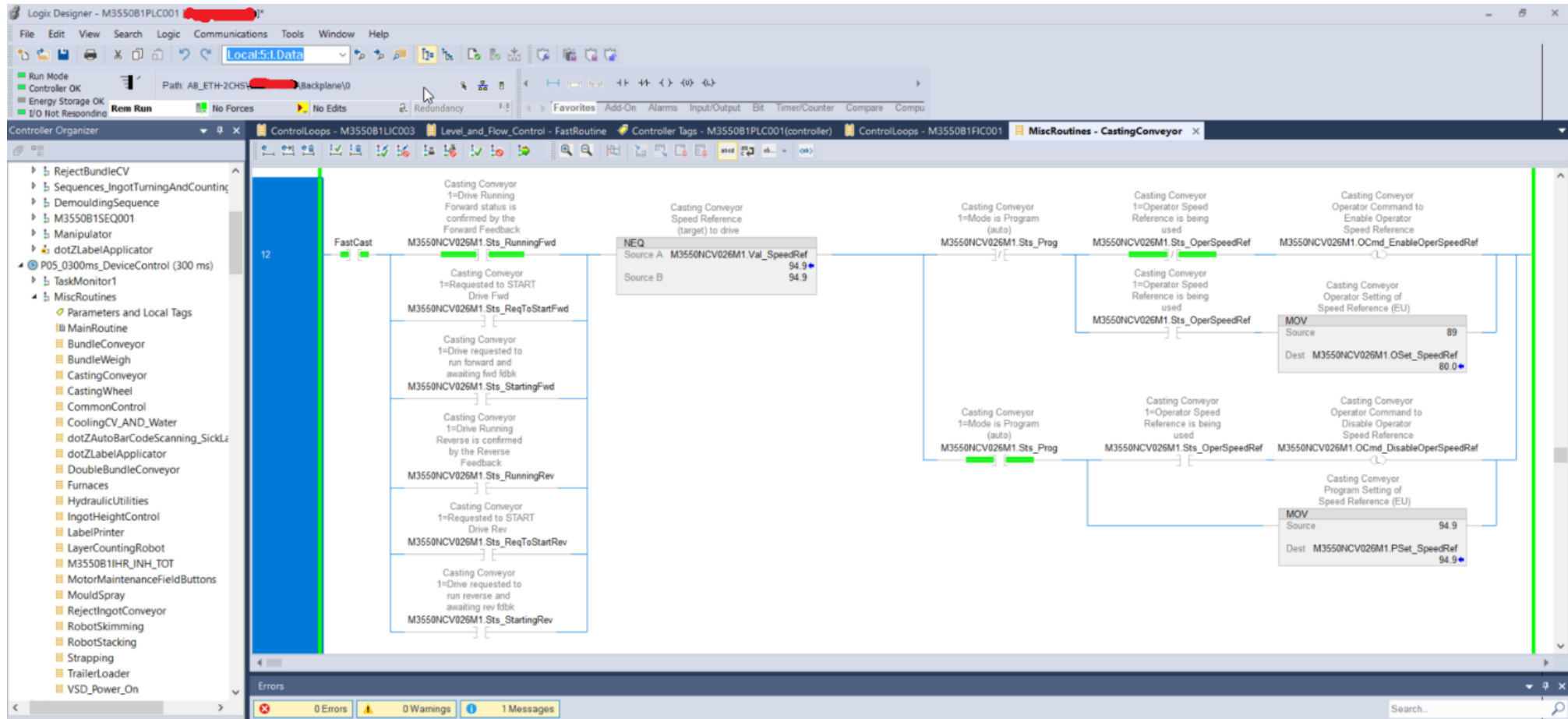


Figura 35-1: Programa lógico do controle de velocidade

Fonte: STUDIO 5000

Anexo 5: Esquema de ligação de um variador de frequência a um motor eléctrico

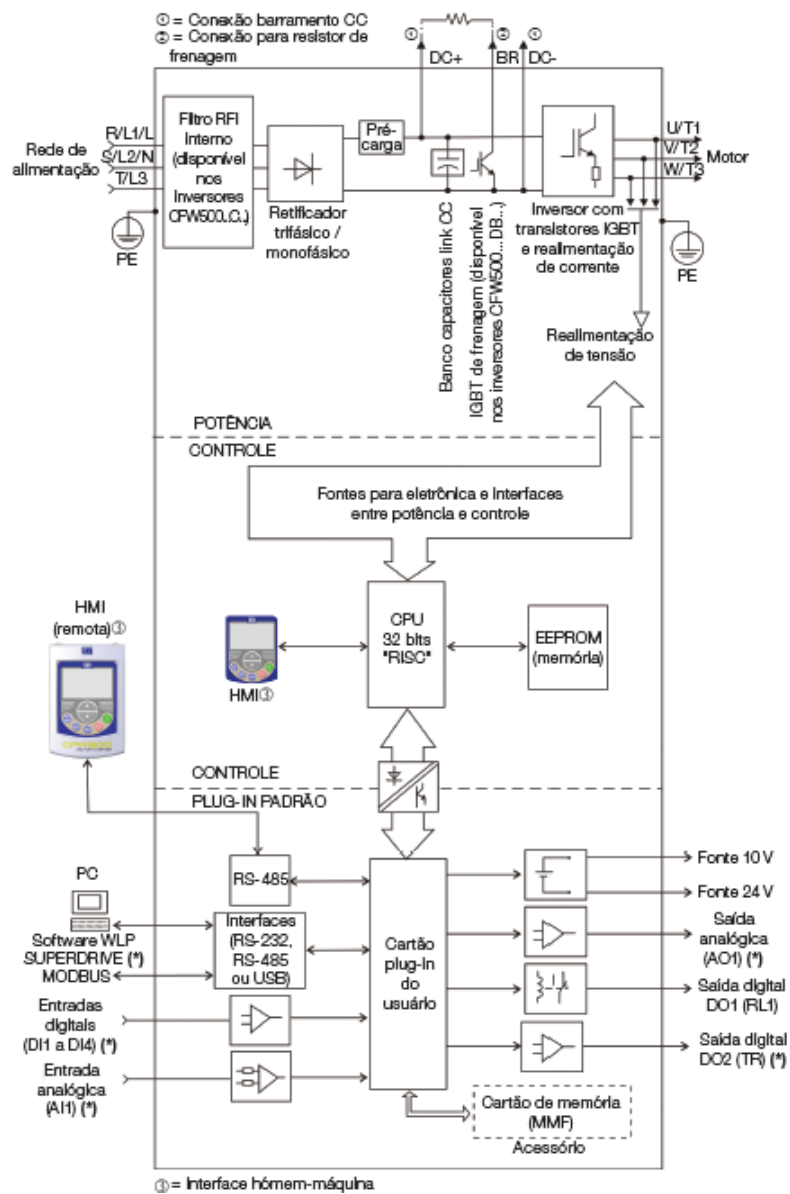


Figura 5.1-10: Circuito geral de um variador de frequência

Fonte: (AUTOR)

