

MEC - SETEC
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *campus* FORMIGA
BACHARELADO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

**ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE BRITAGEM E
MOAGEM DE CALCÁRIO**

Nome: Thaís Rodrigues Gomes

Orientador: Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva

FORMIGA - MG

2026

Thaís Rodrigues Gomes

**ESTUDO DE CASO: IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE BRITAGEM E
MOAGEM DE CALCÁRIO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de Bacharelado em Engenharia Elétrica do Instituto Federal de Minas Gerais - campus Formiga como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva

FORMIGA - MG

Julho de 2026

G633e Gomes, Thais Rodrigues
Estudo de caso: implantação de uma linha de britagem e moagem calcário. /
Gomes, Thais Rodrigues – Formiga : IFMG, 2026.
54 p. :il. color.

Orientador: Prof. Marcos Vinícius de Paiva

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) –
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus*
Formiga.

1. Automação. 2. Britagem. 3. Moagem. 4. Produção. I. Paiva, Marcos
Vinícius de. II. Título.

CDD 622.7

THAÍS RODRIGUES GOMES

ESTUDO DE CASO – IMPLANTAÇÃO DE UMA LINHA DE MOAGEM E
BRITAGEM DE CALCÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Engenharia
Elétrica do Instituto Federal de Minas
Gerais como requisito para obtenção do
Título de Bacharel em Engenharia
Elétrica.

Avaliado em: 25 de junho de 2026.

Nota: 85

BANCA EXAMINADORA



Prof. Me. Marcus Vinícius de Paiva (Orientador)



Eng. Heberte Sebastião Leandro



Prof. Me. Marco Antônio Silva Pereira

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, Simone e Francisco, e ao meu irmão, Caio, pelo amor, apoio, incentivo e confiança que me acompanharam em cada etapa desta jornada.

A vocês, minha eterna gratidão por tornarem possível a realização deste sonho.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, por ter guiado os meus passos ao longo de toda esta jornada, concedendo-me força, sabedoria e perseverança para superar os desafios encontrados no caminho. Como está escrito em Salmos 37:5: "Entrega o teu caminho ao Senhor; confia nele, e ele tudo fará." Sou grata por todas as bênçãos, por todas as pessoas que conheci durante esse período, aprendizados e oportunidades que tornaram possível a realização deste sonho.

Agradeço ao meu professor orientador, Marcus Vinicius, pela orientação, dedicação, paciência e pelos conhecimentos compartilhados ao longo do desenvolvimento deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para a concretização desta etapa da minha formação acadêmica.

Aos professores e funcionários da faculdade, agradeço pelo apoio, pela dedicação e por todo o auxílio prestado durante minha trajetória acadêmica, contribuindo de forma significativa para minha formação pessoal e profissional.

À minha avó materna, Elda, que auxiliou na minha criação e na minha formação como pessoa, por meio de sua força, garra e persistência em correr atrás de todos os seus objetivos.

Aos meus pais, Simone e Francisco, agradeço por todo o suporte e apoio que me deram ao longo da minha vida e por serem o meu porto seguro em todos os momentos. Sempre me apoiaram, incentivaram, orientaram e aconselharam nas escolhas que fiz durante minha trajetória.

Ao meu irmão, Caio, agradeço por ser o meu primeiro melhor amigo, pela parceria, companheirismo e por sempre estar ao meu lado me defendendo e apoiando.

Ao meu namorado, Bruno, que conheci na faculdade, agradeço por todo o apoio nos diversos momentos que compartilhamos. Hoje vejo o quanto crescemos e amadurecemos juntos ao longo dessa jornada. Meu eterno companheiro de vida.

Às minhas amigas de faculdade e da vida, Bruna e Stefany, com quem construí uma amizade linda, repleta de risadas, choros, desesperos com provas e prazos de entrega de trabalhos, desafios do dia a dia e, acima de tudo, muito companheirismo.

Por fim, agradeço aos meus sogros, Simone e Sidnei, e à minha cunhada, Yasmin, que se tornaram minha segunda família. Eles me acolheram e foram sinônimo de lar, amor e apoio em todos os momentos em que precisei.

Obrigada a todos por tudo. Sem o apoio, o carinho e a presença de cada um de vocês, nada disso seria possível.

EPÍGRAFE

“Se você pode sonhar, você pode realizar.”

Walt Disney

RESUMO

Este trabalho tem o objetivo de apresentar um estudo de caso do desenvolvimento de um projeto de automação para uma planta de britagem e moagem de calcário. Serão apresentadas ao longo do desenvolvimento as etapas que são compreendidas, desde a fase de projeto, até o *startup*. Inicialmente, com o auxílio do *software* AutoCAD, foi desenvolvido um *layout* da planta, com um fluxograma da disposição ideal sugerida para os equipamentos. Em seguida foi elaborada uma relação detalhada de entradas e saídas de todos os equipamentos e instrumentações previstas, acompanhada de uma lista de sensores e atuadores necessários ao projeto. Também foi desenvolvida uma arquitetura digital que especifica os cartões digitais e analógicos destinados à comunicação entre os dispositivos de campo, bem como com o Controlador Lógico Programável (CLP). Foram confeccionados os diagramas de interligação que apresentam, de forma detalhada, as conexões de comunicação, alimentação elétrica dos motores, inversores, *soft-starters* e demais equipamentos, assegurando a integração completa do sistema e a funcionalidade da planta industrial. Por fim, foi realizado o comissionamento e entrada em operação da planta desenvolvida. Serão apresentados ainda, os desafios enfrentados ao longo do projeto e os ganhos operacionais obtidos após a sua conclusão.

Palavras-chave: Automação. Controlador Lógico Programável. Comissionamento.

ABSTRACT

This work aims to present a case study of the development of an automation project for a limestone crushing and grinding plant. The development process will present the stages involved, from the design phase to startup. Initially, using AutoCAD software, a plant layout was developed, with a suggested ideal equipment arrangement flowchart. Next, a detailed list of inputs and outputs for all planned equipment and instrumentation was created, along with a list of sensors and actuators necessary for the project. A digital architecture was also developed, specifying the digital and analog cards for communication between field devices, as well as the Programmable Logic Controller (PLC). Interconnection diagrams were created, detailing communication connections, power supply for motors, inverters, soft-starters, and other equipment, ensuring complete system integration and the functionality of the industrial plant. Finally, the commissioning and start-up of the developed plant were carried out. The challenges faced throughout the project and the operational gains achieved after its completion will also be presented.

Keywords: Automation. Project. Commissioning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 – Partida Direta.....	17
Figura 02 – Descritivo do funcionamento da Partida Direta.....	18
Figura 03 – Partida Estrela-Triângulo.....	19
Figura 04 – Descritivo do funcionamento da Partida Estrela-Triângulo.....	20
Figura 05 – Partida Compensadora com Autotransformador.....	22
Figura 06 – Descritivo do funcionamento da Partida Compensadora com Autotransfomador..	23
Figura 07 – Partida de Motores com Rotor Bobinado.....	24
Figura 08 – Funcionamento do Inversor de Frequência.....	25
Figura 09 – Esquema Geral do Inversor de Frequência.....	26
Figura 10 – Interface Homem-Máquina (IHM) do Inversor de Frequência.....	27
Figura 11 – Esboço da Linha de Produção.....	33
Figura 12 - Quadro resumo das cargas e métodos de partida utilizados.....	34
Figura 13 – CLP utilizado na implantação do projeto.....	35
Figura 14 – Exemplo de Lógica <i>Ladder</i>	36
Figura 15 – Gráfico de desempenho do Sinal Digital.....	37
Figura 16 – Gráfico de desempenho do Sinal Analógico.....	39
Figura 17 – Diagrama simplificado de interligação do sistema de automação.....	42
Figura 18 – Sistema Supervisório desenvolvido.....	44
Figura 19 – Montagem dos cartões de entrada e saída.....	45
Figura 20 – Instalação das réguas de borne nos painéis.....	45
Figura 21 – Testes de integração.....	46
Figura 22 – Linha de produção operando.....	48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A/D - Analógico Digital
CA - Corrente Alternada
CC - Correntes Contínua
CLP - Controlador Lógico Programável
CPU - Unidade Central de Processamento
CV - Cavalo Vapor
D/A - Digital Analógico
D1 - Contato e Temporizador
EMC - Compatibilidade Eletromagnética
E/S - Entrada e Saída
IEC - International Electrotechnical Commission
IGBT - *Insulated Gate Bipolar Transistor*
IHM - Interface Homem-Máquina
I/O - *Input/Output*
K1 - Contato e Bobina 1
K2 - Contato e Bobina 2
K3 - Contato e Bobina 3
LD - *Ladder Diagram*
mA - Miliampere
mm² - Milímetro Quadrado
NA - Contato normalmente aberto
NBR - Norma Brasileira Regulamentadora
NF - Contato normalmente fechado
PWM - *Pulse Width Modulation*
RFI - *Radio Frequency Interference Filter*
RTD - *Resistance Temperature Detector*
SCRs - *Silicon Controlled Rectifiers*
TAG - Nomenclatura dos equipamentos
V - Volts
V/f - Relação entre velocidade e frequência
VCA - Tensão em Corrente Alternada
VCC - Tensão em Corrente Contínua

VFDs - *Variable Frequency Drives*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Justificativa.....	14
1.2 Objetivos.....	14
1.2.1 Objetivo Geral.....	14
1.2.2 Objetivo Específico.....	15
1.3 Estrutura do trabalho.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1 Considerações Gerais.....	16
2.2 Tipos de Partida.....	16
2.2.1 Partida Direta.....	16
2.2.1.1 Vantagens.....	18
2.2.1.2 Desvantagens.....	18
2.2.2 Partida Estrela Triângulo.....	19
2.2.2.1 Vantagens.....	20
2.2.2.2 Desvantagens.....	20
2.2.3 Partida Compensadora com Autotransformador.....	21
2.2.3.1 Vantagens.....	23
2.2.3.2 Desvantagens.....	23
2.2.4 Partida Compensadora (com Resistores no Estator) e Partida de Motores com Rotor Bobinado.....	23
2.2.5 Partida com Inversor.....	25
2.2.6 Partida <i>Soft-Starter</i>.....	28
2.3 Processo de Britagem e Moagem.....	29
2.3.1 Processo de Britagem.....	29
2.3.2 Processo de Moagem.....	29
2.3.3 Integração entre os Processos e a Importância da Automação.....	30

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO.....	31
3.1 Sinal Digital e Analógico.....	35
3.1.1 Sinal Digital.....	37
3.1.2 Sinal Analógico.....	38
3.2 Tipos de cartões I/O.....	39
3.3 Diagramas de Interligação.....	42
3.4 Desenvolvimento e Configuração do sistema.....	43
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	46
4.1 Testes de Comunicação e Integração.....	46
4.2 Testes Operacionais da Planta.....	47
4.3 Startup e Comissionamento.....	47
4.4 Não Conformidades e Lições Aprendidas.....	48
4.5 Ganhos Operacionais Obtidos.....	50
5. CONCLUSÃO.....	51
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS.....	52

1. INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

Com o avanço da Indústria 4.0, os processos industriais passaram a exigir sistemas cada vez mais automatizados, integrados e eficientes. Nesse contexto, a automação industrial tornou-se essencial para garantir maior produtividade, segurança operacional, redução de falhas e otimização do consumo energético em plantas industriais. Em processos de britagem e moagem, amplamente utilizados nos setores de mineração, construção civil e agricultura, a aplicação de tecnologias de automação contribui diretamente para o controle eficiente da produção e para a confiabilidade operacional dos equipamentos.

Apesar da crescente utilização dessas tecnologias, ainda existem desafios relacionados à integração entre equipamentos, comunicação em rede, parametrização de sistemas e adequação às normas técnicas e de segurança. Dessa forma, torna-se importante o desenvolvimento de estudos que demonstrem, na prática, a aplicação de sistemas automatizados em plantas industriais de grande porte, evidenciando os benefícios obtidos durante sua implantação e operação.

A motivação para a realização deste trabalho surgiu a partir da participação ativa no desenvolvimento e implantação de um projeto real de automação industrial em uma planta de britagem e moagem de calcário. Durante esse processo, foi possível acompanhar etapas como elaboração de documentações técnicas, desenvolvimento de painéis elétricos, programação dos sistemas supervisórios e realização do *startup* da planta automatizada, proporcionando uma visão prática e completa da implementação do sistema.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como finalidade apresentar um estudo de caso relacionado à implantação de um sistema de automação industrial em uma planta de britagem e moagem de calcário, abordando as etapas de desenvolvimento, implementação e os principais benefícios obtidos após a automatização do processo produtivo.

1.2.1 Objetivo Geral

Apresentar as etapas da implantação de um sistema de automação industrial em uma planta de britagem e moagem de calcário, destacando as etapas de desenvolvimento do projeto, implementação do sistema e os ganhos operacionais obtidos com a automatização do processo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Descrever as etapas para o desenvolvimento de um projeto de automação industrial;
- Apresentar a documentação técnica utilizada no sistema de automação desenvolvido;
- Explicar o funcionamento dos sinais digitais e analógicos aplicados ao CLP;
- Descrever os cartões de entradas e saídas utilizados no projeto;
- Demonstrar a aplicação da linguagem *Ladder* na lógica de controle;
- Apresentar a configuração do sistema supervisório e da rede *Ethernet/IP*;
- Descrever as etapas de testes, comissionamento e *startup* da planta;
- Analisar os ganhos operacionais obtidos com a automação industrial.

1.3 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está estruturado em capítulos organizados de forma a apresentar, inicialmente, os conceitos teóricos relacionados à Indústria 4.0, automação industrial e processos de britagem e moagem. O capítulo 1 apresentou uma introdução à proposta do trabalho, justificativas e objetivos. Em seguida, no capítulo 2, são apresentados os principais fundamentos e tecnologias aplicadas no desenvolvimento do projeto de automação da planta industrial. Posteriormente, no capítulo 3, é descrita a metodologia utilizada neste estudo de caso, abordando as etapas de planejamento, desenvolvimento, implantação e *startup* do sistema automatizado, bem como os principais equipamentos e soluções utilizados durante o projeto. No capítulo 4, são apresentados os resultados obtidos com a implantação da automação industrial, destacando os ganhos operacionais, a melhoria da eficiência produtiva e, por fim, o capítulo 5 apresenta as conclusões finais deste Trabalho de Conclusão de Curso.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Considerações Gerais

Para a confecção de todo o projeto foi indispensável a realização de um estudo aprofundado de como seriam realizadas as partidas de cada um dos motores que seriam utilizados. Com o objetivo de entender e aprender o funcionamento dos equipamentos de forma individual e da linha de produção como um todo, além da alimentação de todo o sistema, os diferentes tipos de partida foram considerados e analisados.

Diante disto foi feito um levantamento dos principais tipos de partidas de motores elétricos existentes, suas principais características, limitações e equipamentos necessários.

É importante ressaltar que todos os equipamentos devem operar de forma harmônica entre si, independente do método utilizado para a partida dos motores elétricos do processo.

2.2 Tipos de Partida

Os métodos de partida de motores elétricos são fundamentais para garantir o desempenho adequado do sistema elétrico e mecânico, influenciando diretamente na corrente de partida, no torque desenvolvido e na vida útil dos equipamentos. A escolha do método mais adequado depende de fatores como potência do motor, tipo de carga acionada, limitações da rede elétrica e custo de implementação (FRANCHI, 2008; MAMEDE FILHO, 2010).

De modo geral, métodos que reduzem a corrente de partida tendem a também reduzir o torque, sendo necessário um equilíbrio entre desempenho e impacto na rede elétrica. Dessa forma, a seleção correta do tipo de partida é essencial para garantir eficiência energética, confiabilidade operacional e segurança do sistema.

A seguir, serão descritos os principais métodos de partida de motores elétricos utilizados nas mais diversas aplicações industriais.

2.2.1 Partida Direta

A partida direta é a forma mais simples de colocar os motores em funcionamento atendendo principalmente motores de pequena potência, onde não há problemas relevantes de queda de tensão ou picos de corrente. É ainda hoje a partida mais comum em aplicações residenciais e pequenas indústrias, como pequenas bombas, compressores, ventiladores e máquinas em baixa tensão.(FRANCHI, 2008; KOSOW, 2008).

Neste tipo de partida o motor elétrico é diretamente conectado à rede elétrica em sua tensão nominal, sem a presença de qualquer dispositivo intermediário que reduza a tensão ou a corrente de partida, esta que pode chegar a valores entre 6 a 8 vezes maior do que a corrente nominal (MAMEDE FILHO, 2010). Além disso, o conjugado inicial também é elevado, garantindo aceleração rápida. E, por isso, existe uma limitação em relação à potência máxima do motor acionado, sob risco de sobrecarga na rede ou a necessidade de custos elevados para compatibilizar a rede de alimentação com a corrente de partida do motor.

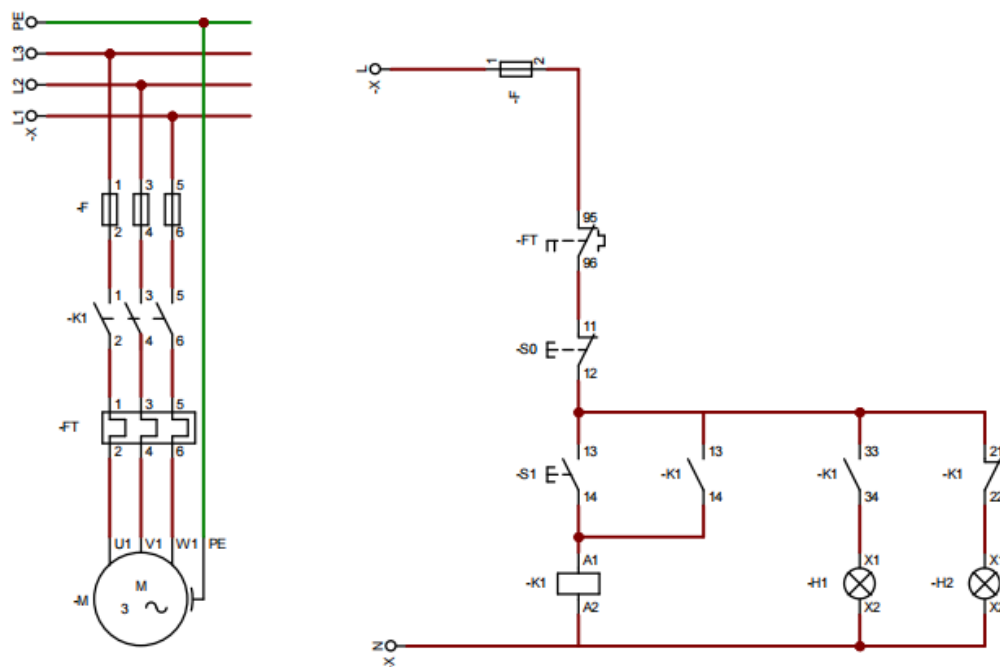
Sendo assim, a partida direta pode ser utilizada quando:

- As três fases são diretamente ligadas ao motor;
- Os motores possuem até 5 CV;
- É necessário um conjugado de partida elevado.

Sua estrutura física se dá por um disjuntor ou fusível que protege o circuito, e um contator com relé de sobrecarga faz a manobra e a proteção do motor. A conexão do motor diretamente na rede é realizada pelo comando liga/desliga que a aciona o contator.

A Figura 01 demonstra o diagrama unifilar da Partida Direta.

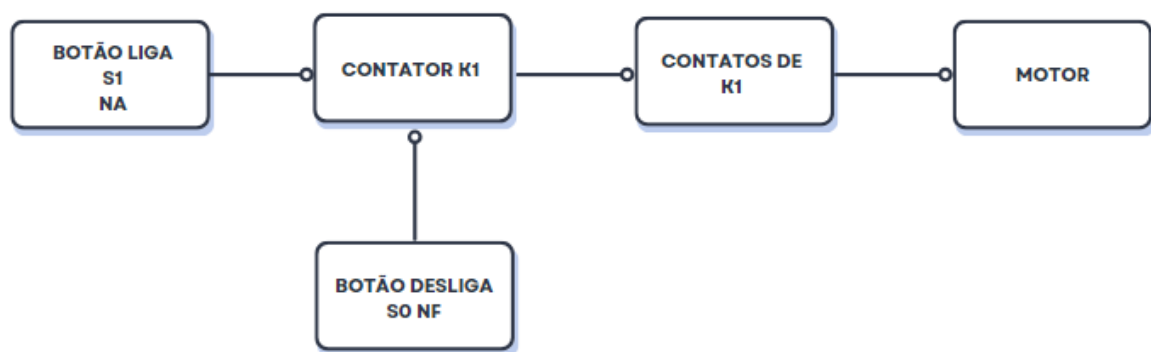
Figura 01 - Partida Direta



Fonte: Próprio autor (2026)

Ao pressionar o botão "liga" S1, a bobina do contator K1 é energizada. Isso faz com que os contatos NA do contator K1 se fechem, permitindo a passagem de corrente elétrica para o motor. O motor começa a funcionar imediatamente com a tensão plena da rede. Ao pressionar o botão "desligar" S0, a bobina de K1 é desenergizada. Os contatos de K1 se abrem, interrompendo a passagem de corrente para o motor desligando-o, conforme mostra a Figura 02.

Figura 02 - Descritivo do funcionamento da Partida Direta



Fonte: Próprio autor (2025)

2.2.1.1 Vantagens

- Simplicidade de implementação e baixo custo.
- Elevado torque de partida.
- Poucos componentes necessários.

2.2.1.2 Desvantagens

- Limita-se a motores de baixa potência.
- Picos de energia na rede causados pela alta corrente de partida, uma vez que o motor precisa vencer a inércia inicial impondo uma grande quantidade de energia, elevando o consumo, podendo gerar problemas na rede, sobrecarga no sistema e quedas de tensão.
- Necessidade de sobredimensionamento dos condutores.

2.2.2 Partida Estrela-Triângulo

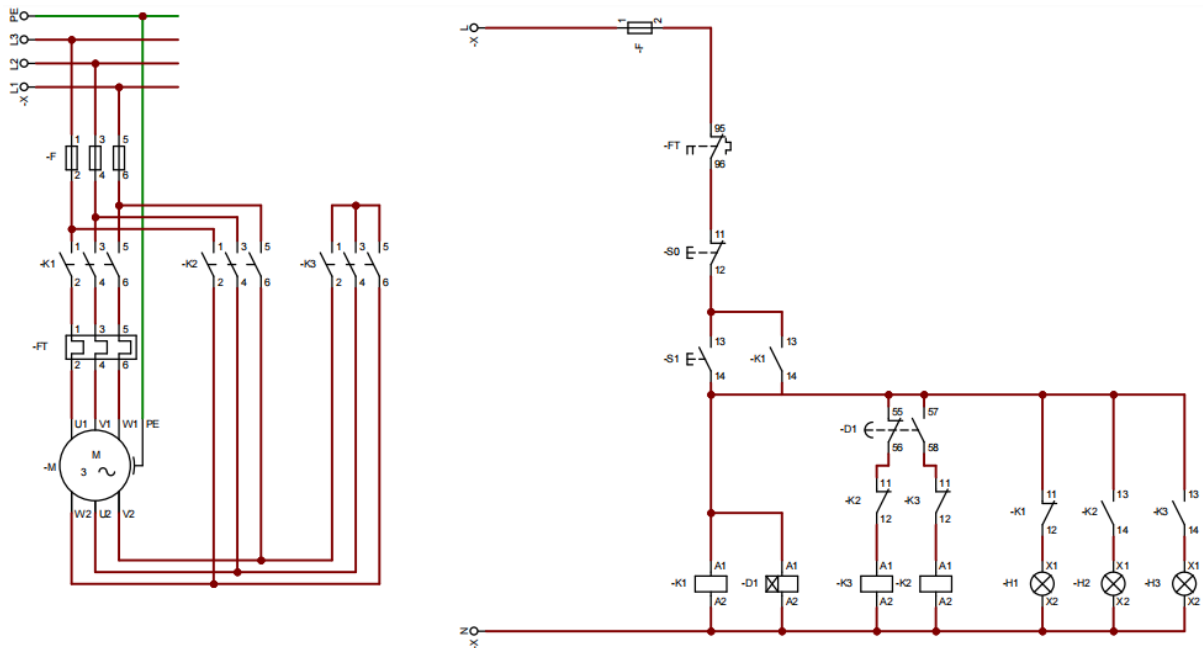
O método partida estrela-triângulo, foi criado para reduzir a corrente de partida em motores trifásicos de maior potência, mas com cargas de baixo conjugado inicial (FRANCHI, 2008). Sendo assim, é amplamente utilizado em compressores, bombas centrífugas e ventiladores industriais devido ao baixo custo e relativa simplicidade.

De forma reduzida o funcionamento se inicia a partir de um fechamento em forma de estrela e após alguns segundos, depois da partida do motor, o sistema migra para fechamento triângulo, reduzindo a corrente elétrica no momento desta partida.

O motor é inicialmente ligado em configuração estrela, reduzindo a tensão em cada enrolamento para $1/\sqrt{3}$ da nominal, partindo lentamente. Após um tempo predeterminado, o motor vence a inércia e atinge 90 % da sua rotação e ocorre a comutação para a ligação triângulo, em que o motor passa a operar em sua tensão plena com sua rotação nominal. O esquema requer três contatores e um temporizador para coordenar a transição. A corrente de partida cai a aproximadamente um terço da partida direta, mas o torque disponível também se reduz a $1/3$ do valor nominal (KOSOW, 2008).

A Figura 03 demonstra o diagrama unifilar da Partida Estrela-Triângulo.

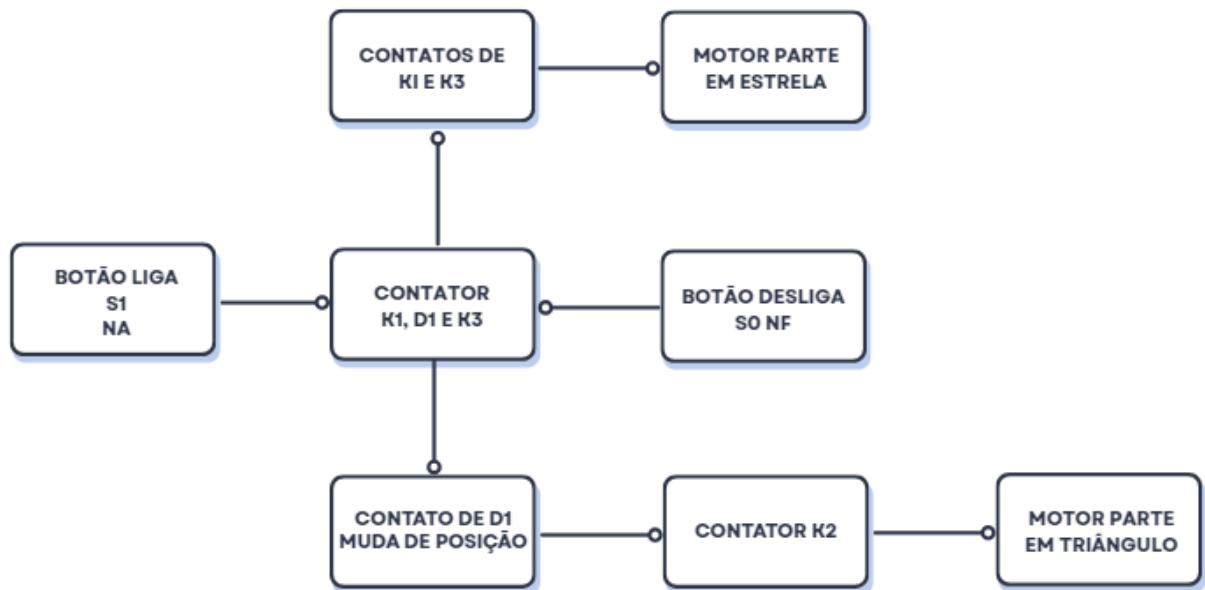
Figura 03 - Partida Estrela-Triângulo



Fonte: Próprio autor (2025)

Conforme a Figura 04 explica, ao acionar a botoeira S1, as bobinas K1, D1 e K3 são energizadas simultaneamente selando o contato de K1 e K3. Será contado um tempo e em seguida o contato 55-56 de D1 mudará de posição, desenergizando apenas a bobina do contator K3 e alimentando a bobina de K2, fazendo com que a conexão do motor passe a ser triângulo.

Figura 04 - Descritivo do funcionamento da Partida Estrela-Triângulo



Fonte: Próprio autor (2025)

2.2.2.1. Vantagens

- Baixo custo comparado com os outros métodos de partida, pois exige uma infraestrutura reduzida e menor gasto energético.
- Os componentes ocupam pouco espaço.
- Não há limitações na quantidade de partidas do motor.
- Redução da corrente de partida para 1/3 da corrente nominal, reduzindo o consumo energético.

2.2.2.2. Desvantagens

- Aplicável apenas a motores com, no mínimo, seis terminais.
- A tensão da rede de alimentação deve ser compatível com a tensão máxima da ligação triângulo do motor.

- O tempo de transição da partida estrela para triângulo (comutação do relé temporizador) precisa estar alinhado com o tempo em que o motor alcança 90 % da sua velocidade nominal.
- O torque de partida é apenas 33 % do torque nominal, logo, é necessário que a carga aplicada na partida seja compatível com o torque disponível.

2.2.3 Partida Compensadora com Autotransformador

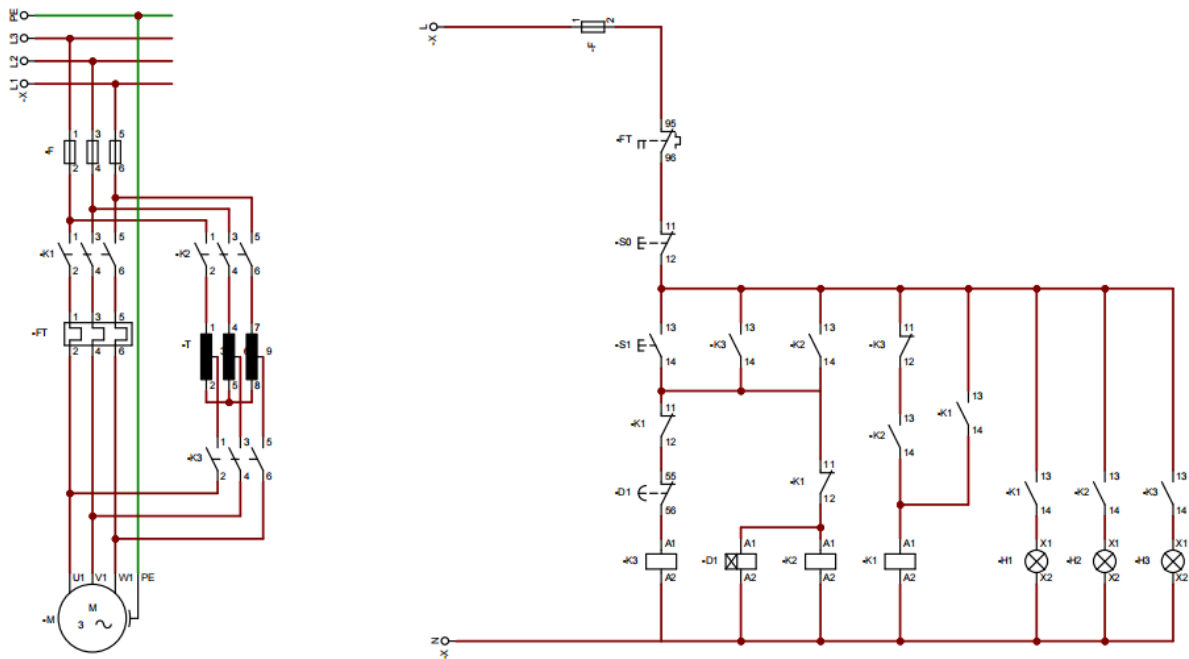
A partida compensadora com autotransformador surgiu como alternativa para reduzir a corrente de partida sem penalizar excessivamente o torque inicial (MAMEDE FILHO, 2010). Nesse método, um autotransformador trifásico fornece tensão reduzida ao motor durante a partida, e após a aceleração inicial o motor é conectado diretamente à rede. O nível de redução depende do ponto de conexão escolhido (tipicamente 50 %, 65 % ou 80 %).

O circuito utiliza contadores para alternar a alimentação entre o autotransformador e a rede. Suas vantagens são a flexibilidade no ajuste da tensão e a redução significativa da corrente, mantendo torque maior que no método estrela-triângulo. Por outro lado, apresenta custo elevado e maior espaço ocupado. É indicado para motores acima de 100 CV, em instalações industriais que não toleram quedas de tensão acentuadas.

Logo, a alimentação inicial do circuito é feita a partir da tensão escolhida no autotransformador. Depois de partir o motor em uma tensão menor do que a da rede, o autotransformador é desligado e o circuito passa a ser alimentado diretamente pela rede.

A Figura 05 mostra o diagrama unifilar da Partida Compensadora com Autotransformador com a utilização de apenas um TAP.

Figura 05 - Partida Compensadora com Autotransformador

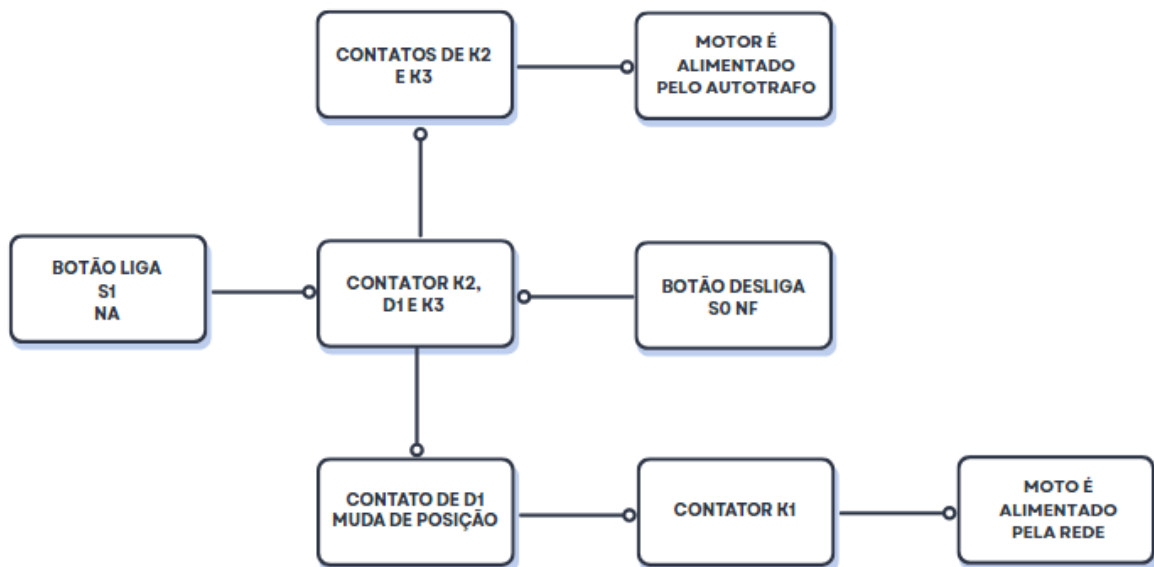


Fonte: Próprio autor (2025)

A Figura 06, mostra todo o funcionamento desta partida. Para energizar o circuito inicialmente é necessário pressionar a botoeira S1, automaticamente energizando a bobina de K3, D1 (temporizador) e K2, fazendo com que o motor parta com a tensão reduzida escolhida no autotransformador.

Assim que a bobina de D1 é energizada é contado um tempo. Após isto o contato normalmente fechado de D1, 55-56, passa a ser aberto, interrompendo a alimentação da bobina de K3 e consequentemente interrompendo a alimentação do autotransformador. Em seguida a bobina de K1 é energizada permitindo que o motor opere diretamente com a tensão da rede.

Figura 06 - Descritivo do funcionamento da Partida Compensadora com Autotransformador



Fonte: Próprio autor (2025)

2.2.3.1 Vantagens

- Na comutação o motor não é desenergizado.
- Variação dos TAPS em 50 %, 65 % e 80 % da relação total.
- O valor da tensão da rede pode ser igual ao valor da tensão em estrela ou triângulo.

2.2.3.2 Desvantagens

- Número de partidas reduzido devido ao aquecimento do autotransformador.
- Custo com a compra do autotransformador.
- Maior espaço ocupado no painel devido ao autotransformador.

2.2.4 Partida Compensadora (com Resistores no Estator) e Partida de Motores com Rotor Bobinado

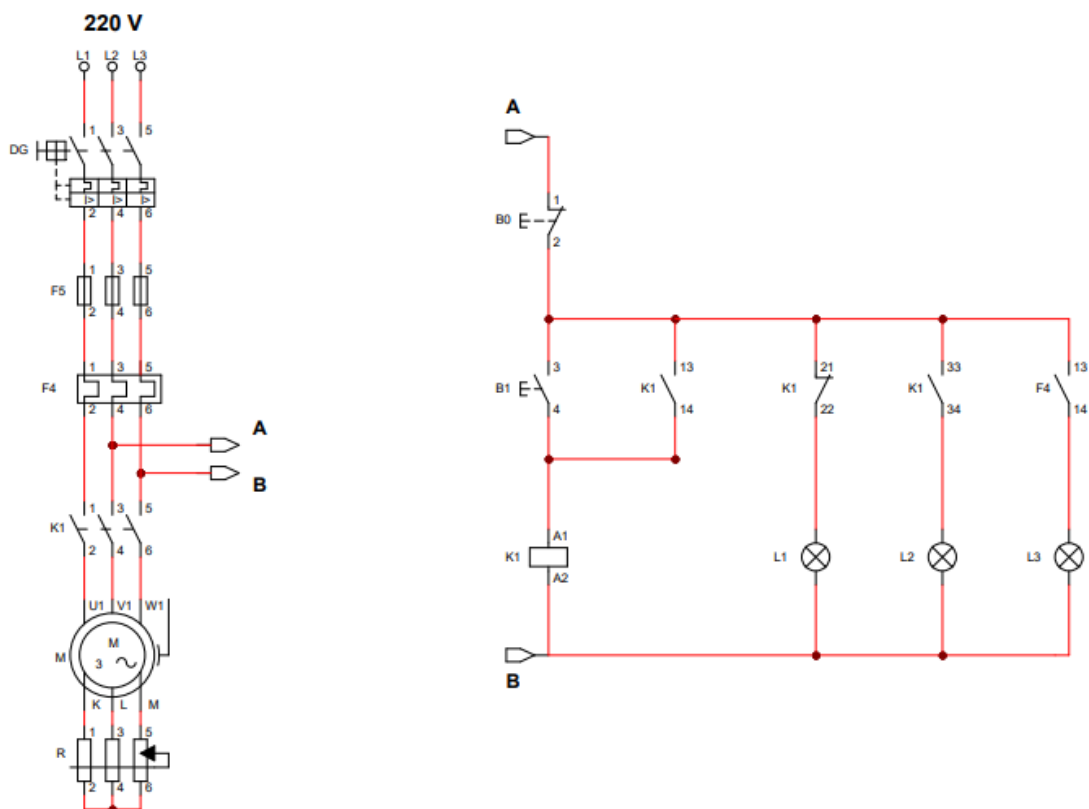
O método de partida compensadora com resistor no estator, hoje é considerado obsoleto, e foi bastante empregado em períodos anteriores à disseminação de autotransformadores e *soft-starters*. Baseia-se na inserção de resistores em série com o estator, limitando a tensão e a corrente de partida. À medida que o motor acelera, os resistores são progressivamente retirados até a conexão plena à rede. Embora simples, o método apresenta perdas de energia e reduz

bastante o torque inicial, sendo atualmente de uso restrito e de interesse histórico (FRANCHI, 2008).

Nos motores de indução com rotor bobinado, utiliza-se a inserção de resistores externos no circuito rotórico, o que aumenta o conjugado de partida e reduz a corrente absorvida. Os resistores são conectados por meio de anéis coletores e retirados progressivamente à medida que o motor acelera, até o rotor operar praticamente em curto-circuito. Essa técnica garante elevado torque de partida e corrente moderada, mas exige maior manutenção devido ao uso de escovas e anéis, além de ter custo mais alto. Foi amplamente empregada em indústrias pesadas, como mineração, siderurgia e em equipamentos como guindastes, moinhos e laminadores, sendo hoje gradualmente substituída por inversores de frequência (KOSOW, 2008; MAMEDE FILHO, 2010).

A Figura 07 mostra o diagrama unifilar da Partida de Motores com Rotor Bobinado.

Figura 07 - Partida de Motores com Rotor Bobinado

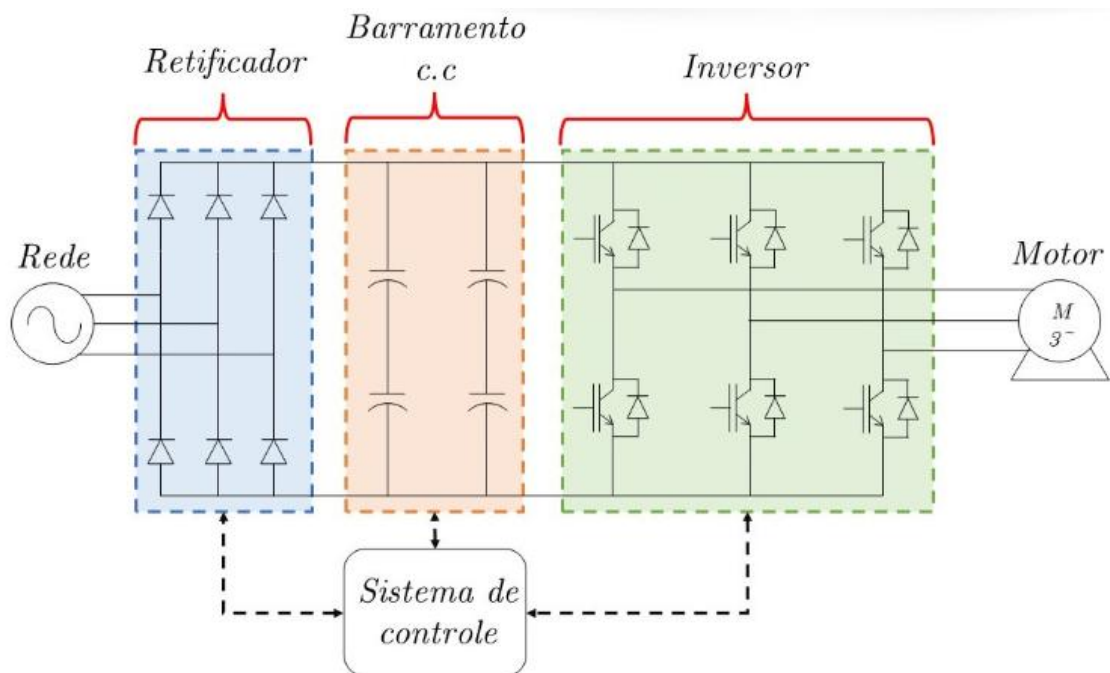


Fonte: Próprio autor (2025)

2.2.5 Partida com Inversor

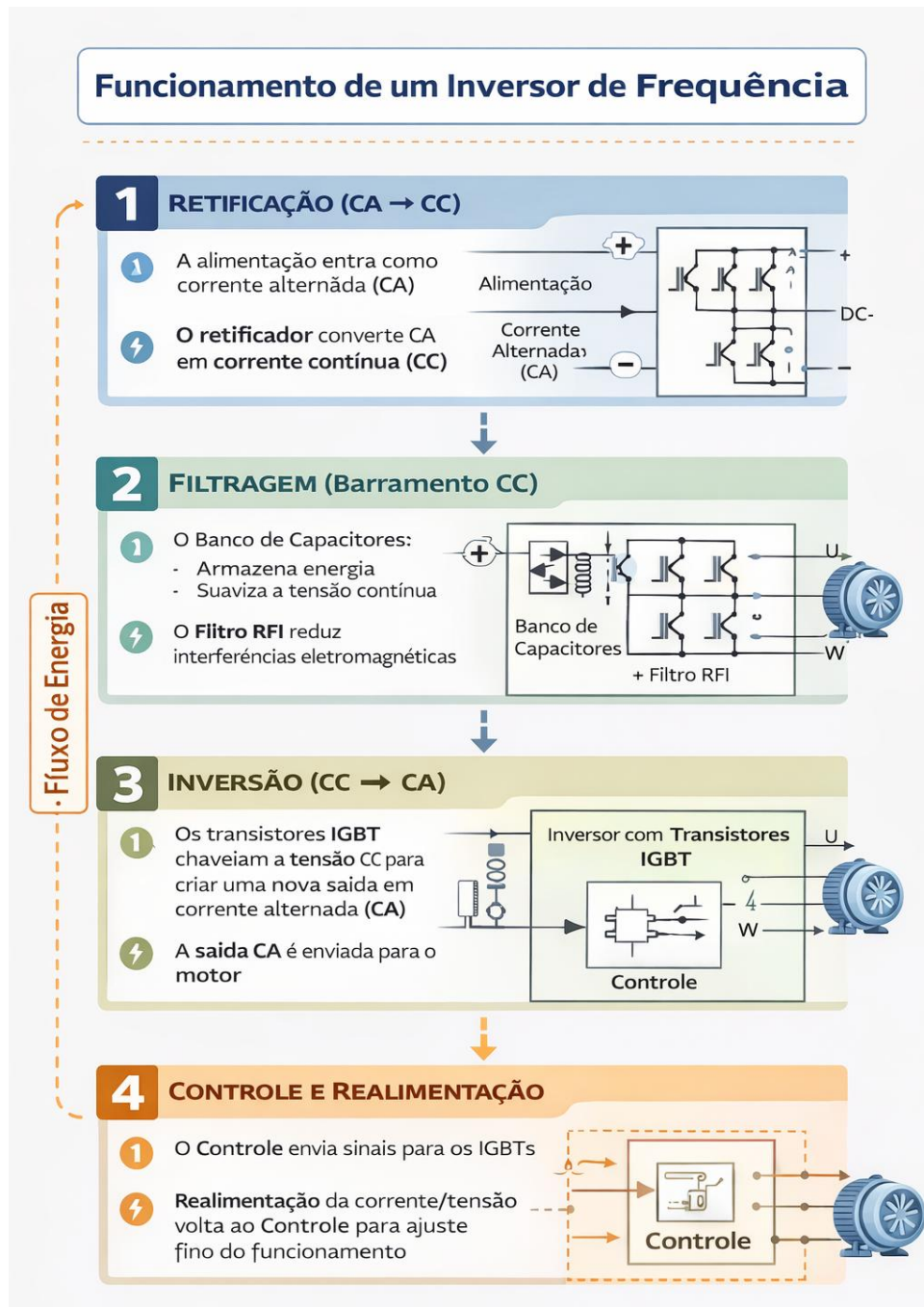
A aplicação de inversores de frequência (*Variable Frequency Drives – VFDs*) como método de partida surgiu com o objetivo de reduzir correntes iniciais, controlar rampas de aceleração e possibilitar a variação da velocidade de motores elétricos. Conforme explica a Figura 08 e Figura 09, o inversor converte a energia da rede elétrica em corrente contínua (CC) e, posteriormente, reconstrói uma tensão alternada (CA) por meio de modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation – SPWM*), permitindo o controle da frequência e da tensão de saída, de modo a manter a relação V/f adequada. Dessa forma, é possível iniciar o motor em baixas frequências e elevá-las progressivamente até o valor nominal, garantindo torque elevado sem a ocorrência de correntes excessivas (WEG, s.d.). Esse tipo de acionamento pode ser aplicado em sistemas que possuam um ou mais motores, desde que a capacidade do inversor seja devidamente dimensionada para atender à potência total dos motores. Nessas condições, os motores operam de forma simultânea e com comportamento equivalente.

Figura 08 - Esquema Geral do Inversor de Frequência



Fonte: TERMOBLOG (2026).

Figura 09 - Funcionamento do Inversor de Frequência



Fonte: ChatGPT (2026)

O sistema do inversor de frequência é composto por diferentes etapas. Pode ser observado na Figura 09 que, inicialmente, há um sistema retificador, formado por uma ponte de diodos (ou, em alguns casos, tiristores), responsável por converter a tensão alternada de entrada em tensão contínua. Em seguida, a energia é conduzida ao barramento CC, constituído por um banco de capacitores, cuja função é armazenar energia e suavizar a tensão, evitando oscilações e picos durante a operação. Nessa etapa, também pode estar presente um filtro contra

interferências eletromagnéticas (*Radio Frequency Interference Filter* – RFI), que reduz ruídos elétricos no sistema.

Na sequência, a energia é aplicada à etapa de inversão, composta por transistores do tipo IGBT (*Insulated Gate Bipolar Transistor*), que atuam como chaves eletrônicas de alta velocidade e alta potência. Esses dispositivos realizam o chaveamento da tensão contínua, gerando uma nova forma de onda em corrente alternada com frequência e amplitude controladas, que é então fornecida ao motor.

Por fim, o sistema conta com um circuito de controle e realimentação, responsável por monitorar grandezas como tensão e corrente, ajustando continuamente o funcionamento do inversor por meio de sua parametrização, garantindo operação segura, eficiente e adequada à aplicação (WEG, s.d.).

Conforme apresentado na Figura 10, na parte frontal do inversor de frequência encontra-se a Interface Homem-Máquina (IHM), por meio da qual é possível realizar comandos e ajustar os parâmetros responsáveis pela configuração de seu funcionamento. A partir da parametrização, o controle do equipamento é realizado comandando os IGBTs, que geram a tensão de saída aplicada ao motor, influenciando diretamente sua velocidade, torque e comportamento operacional, por meio da variação da frequência e da tensão de alimentação (WEG, 2020).

Figura 10 - Interface Homem-Máquina (IHM) do Inversor de Frequência



Fonte: WEG, 2020.

Entre as vantagens, destacam-se a partida suave, fácil reversão do sentido de rotação, eliminação de picos de corrente e a possibilidade de economia energética em cargas de torque variável. Por outro lado, apresenta custo mais elevado e pode introduzir harmônicas na rede

elétrica, exigindo filtros e cuidados no projeto. É um equipamento amplamente utilizado em sistemas de bombeamento, ventiladores e transportadores industriais (WEG, 2017; ROCKWELL AUTOMATION, 2018).

2.2.6 Partida com *Soft-Starter*

A partida com *soft-starter* foi desenvolvida como alternativa mais econômica que os inversores para casos em que não há necessidade de variação contínua de velocidade. Baseia-se no uso de tiristores que controlam o ângulo de condução, reduzindo a tensão aplicada ao estator durante a rampa de aceleração. A tensão inicial é reduzida e aumentada progressivamente até a nominal, limitando a corrente e os esforços mecânicos.

O esquema envolve SCRs em duas ou três fases, podendo ser complementado com contadores de *bypass* e proteções térmicas. Entre as vantagens, incluem-se a redução de correntes de partida, simplicidade de operação e custo inferior a um inversor. As limitações concentram-se na impossibilidade de controle de velocidade e no torque limitado em baixas rotações. Aplica-se principalmente a sistemas de bombeamento, compressores e transportadores. (WEG, 2016; ABB, 2015; SIEMENS, 2017).

Em determinadas aplicações industriais, é comum a utilização de um único módulo de *soft-starter* para o acionamento de mais de um motor, com o objetivo de reduzir custos e otimizar o espaço em painéis. A técnica mais empregada é a partida sequencial, na qual o dispositivo realiza a rampa de aceleração em um motor e, após a atuação do *bypass*, é comutado por meio de contadores para outro motor. Cada motor deve possuir proteção individual, sendo necessário também o uso de intertravamentos que impeçam partidas simultâneas. A capacidade da *soft-starter* deve ser adequadamente dimensionada para a carga total. Nessas condições, os motores tendem a apresentar comportamento semelhante durante a partida, com aceleração controlada e redução dos esforços elétricos e mecânicos.

Embora ofereça vantagens econômicas, a prática exige cuidados no dimensionamento, uma vez que o *soft-starter* deve suportar o ciclo térmico resultante de múltiplas partidas sucessivas, por exemplo, em sistemas de bombeamento redundante ou com sistema de revezamento de bombas e linhas de produção que acionam motores alternadamente.(EATON, 2014).

A principal diferença entre a *soft-starter* e o inversor de frequência está na forma de controle aplicada ao motor. A *soft-starter* atua no controle da tensão, a partir da aplicação de uma rampa de tensão, com o objetivo de suavizar a partida e a parada, sendo mais indicada em aplicações onde se deseja reduzir esforços mecânicos e elétricos durante a partida. Por outro

lado, o inversor de frequência realiza o controle da frequência de alimentação em função da tensão, permitindo a variação da velocidade do motor ao longo da operação, sendo recomendado em situações que exigem controle contínuo de velocidade, torque e aceleração. Dessa forma, a escolha entre esses dispositivos deve ser feita com base nas necessidades específicas da aplicação.

2.3 Processo de Britagem e Moagem

2.3.1 Processo de Britagem

A britagem constitui a primeira etapa do beneficiamento mineral e tem como principal objetivo promover a redução granulométrica do material proveniente da extração, adequando suas dimensões para as etapas subsequentes do processo produtivo. Essa operação possibilita a fragmentação das rochas por meio da aplicação de esforços mecânicos de compressão, impacto ou cisalhamento, tornando o material apto para o processamento posterior (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

O processo inicia-se com a alimentação da planta, realizada por meio de alimentadores responsáveis por controlar e regular a quantidade de material encaminhada aos britadores. Em seguida, os britadores promovem a fragmentação das rochas em partículas menores, reduzindo significativamente seu tamanho.

Após a britagem, o material é direcionado às peneiras vibratórias, responsáveis pela classificação granulométrica. As partículas que atendem às especificações seguem para a etapa seguinte do processo, enquanto aquelas que ainda apresentam dimensões superiores às desejadas são encaminhadas para uma nova etapa de britagem, onde passam por outro britador para promover uma nova redução granulométrica, caracterizando um circuito fechado de britagem (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

Durante todo esse processo, o transporte do material entre os equipamentos é realizado por correias transportadoras, que garantem o fluxo contínuo da produção e a integração entre as diferentes etapas da planta. Dessa forma, a britagem prepara o material para a etapa de moagem, assegurando condições adequadas para a continuidade do beneficiamento (FRANCHI, 2008; MAMEDE FILHO, 2010).

2.3.2 Processo de Moagem

Após a etapa de britagem, o material é encaminhado ao processo de moagem, cuja finalidade é promover uma redução granulométrica ainda mais refinada, permitindo que o

produto final atenda às especificações exigidas para sua aplicação industrial (LUZ; SAMPAIO; FRANÇA, 2010).

A alimentação dos moinhos ocorre por meio das correias transportadoras provenientes da britagem. Antes da entrada nos moinhos, o material pode ser distribuído por calhas vibratórias, responsáveis por direcionar o fluxo de maneira uniforme, contribuindo para a estabilidade operacional do processo.

Os moinhos realizam a fragmentação fina do material por meio da ação mecânica de seus elementos internos, reduzindo ainda mais o tamanho das partículas. Ao longo dessa etapa, também são empregados equipamentos auxiliares, como válvulas rotativas, utilizadas para controlar o fluxo de material entre os equipamentos; exaustores, responsáveis pela remoção de partículas em suspensão e pelo controle da circulação de ar; e umidificadores, que auxiliam na redução da emissão de poeira e na melhoria das condições operacionais da planta (CAPELLI, 2013; MAMEDE FILHO, 2010).

Ao final da moagem, obtém-se um produto com granulometria adequada às exigências do processo industrial, garantindo maior qualidade e uniformidade do material produzido.

2.3.3 Integração entre os Processos e a Importância da Automação

Os processos de britagem e moagem operam de forma integrada e sequencial, sendo a moagem diretamente dependente do desempenho da britagem. Dessa forma, qualquer interrupção, falha operacional ou redução de capacidade na britagem impacta imediatamente a alimentação dos moinhos, comprometendo a continuidade e a eficiência de toda a linha de produção.

Em razão dessa interdependência, torna-se indispensável o sincronismo entre os equipamentos que compõem a planta industrial. O acionamento dos motores, a sequência de partida, os intertravamentos de segurança, o monitoramento das variáveis de processo e o controle das condições operacionais devem ocorrer de forma coordenada, garantindo o fluxo contínuo do material e evitando situações que possam provocar acúmulo de material, sobrecarga dos equipamentos ou interrupções inesperadas da produção (FRANCHI, 2008; CAPELLI, 2013).

Nesse contexto, a automação industrial desempenha papel fundamental ao integrar sensores, instrumentos de campo, sistemas supervisórios e Controladores Lógicos Programáveis (CLPs), permitindo o monitoramento em tempo real do processo e a execução automática das estratégias de controle previamente programadas. Além de aumentar a

produtividade, a automação contribui para a segurança operacional, a confiabilidade do processo e a redução das intervenções manuais, constituindo um elemento essencial para o funcionamento eficiente de plantas industriais modernas (CAPELLI, 2013; MAMEDE FILHO, 2010).

3. METODOLOGIA E DESENVOLVIMENTO

O processo inicial de um projeto de automação passa por um alinhamento com o cliente, a fim de conhecer plenamente as reais necessidades existentes e como a automação poderá trazer melhorias e benefícios a esse processo.

A partir da identificação dos objetivos do projeto é feita uma visita de campo, para um maior esclarecimento dos processos existentes (caso já existam) e possíveis limitações, como, falta de espaço para instalações de painéis, condições ambientais, condições físicas da infraestrutura e inadequação para o normativo atual. (SENAI, s.d.; UFRN, s.d.; UFSM, 2018).

Com o levantamento de campo e um alinhamento com o cliente, em relação às expectativas, datas e planejamentos realizados, é feito um estudo e análise da viabilidade técnica e econômica com o objetivo de desenvolver uma proposta que atenda à todas as necessidades identificadas.

Uma vez definido o que será automatizado e após o cliente estar de acordo com a proposta apresentada, é iniciada a fase de confecção da documentação que irá compor o projeto para que, ao final de toda a elaboração, seja possível a realização do comissionamento e *startup* da planta.

Inicialmente, é definida uma lista de cargas, que conta com uma listagem dos equipamentos que serão necessários para o funcionamento pleno de toda a linha de produção, contendo descrição de todos estes equipamentos, cargas, potência, quantidades, tipo de partida, TAG (identificações de cada equipamento), bitolas de cabo, referência de fornecedor.

No presente trabalho, utiliza-se como estudo de caso uma planta industrial destinada ao beneficiamento de calcário, composta por dois processos principais: britagem e moagem. Esses processos atuam de forma integrada e sequencial, sendo responsáveis pela redução granulométrica do material até que este atinja as características especificadas para sua utilização.

O processo de britagem constitui a primeira etapa do beneficiamento e tem como finalidade reduzir o tamanho das rochas provenientes da extração por meio de equipamentos como alimentadores, britadores, peneiras vibratórias e correias transportadoras. Após essa

etapa, o material segue para o processo de moagem, no qual ocorre uma redução granulométrica mais refinada por meio de moinhos, calhas vibratórias, válvulas rotativas, exaustores, umidificador e demais equipamentos auxiliares, produzindo o material com a granulometria final requerida.

Os dois processos operam de forma integrada, de modo que o material processado na britagem é transportado automaticamente para a moagem. Dessa forma, o funcionamento adequado de cada equipamento influencia diretamente o desempenho da etapa seguinte, tornando indispensável a sincronização entre os processos por meio do sistema de automação.

É importante destacar que a planta utilizada neste estudo foi concebida para operar integralmente de forma automatizada. Dessa forma, diferentemente de projetos de retrofit, não existia uma operação manual anterior à implantação da automação. A produção industrial somente foi iniciada após a conclusão do desenvolvimento da documentação técnica, da programação do sistema de controle, dos testes, do comissionamento e do startup da planta.

A linha de britagem desenvolvida neste projeto era composta, principalmente, por um alimentador de 20 CV, britadores com potências entre 175 CV e 300 CV, correias transportadoras com potências variando de 20 CV a 50 CV e uma peneira vibratória de 40 CV. Os métodos de partida adotados para os equipamentos incluíram partida direta, inversores de frequência e *soft-starters*, de acordo com as características operacionais e requisitos de cada aplicação. Os cabos de alimentação especificados para essa etapa do processo variaram entre 16 mm² e 240 mm².

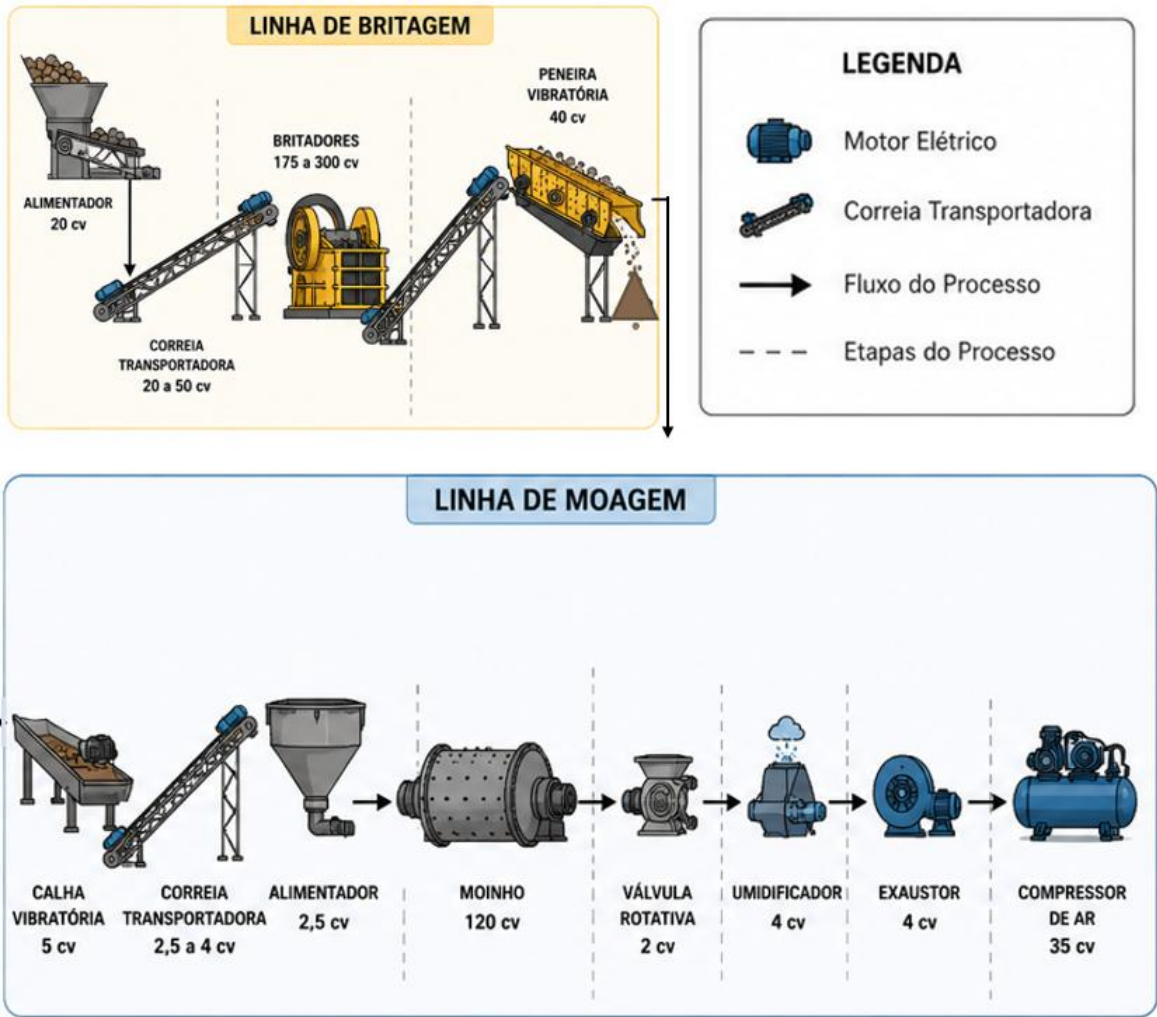
A linha de moagem, localizada após a etapa de britagem, era composta por calhas vibratórias de 5 CV, correias transportadoras com potências entre 2,5 CV e 4 CV, alimentadores de 2,5 CV, moinhos de 120 CV, válvulas rotativas de 2 CV, umidificador de 4 CV, exaustores de 4 CV e compressores de ar de 35 CV. Para esses equipamentos, foram especificados cabos com seções variando entre 2,5 mm² e 120 mm². Ambas as linhas o nível de tensão de controle era 220 volts e de força 380 volts.

As informações referentes à potência instalada, método de partida, dimensionamento dos cabos, identificação dos equipamentos (TAGs) e demais características técnicas foram consolidadas na lista de cargas do projeto, servindo como base para o dimensionamento elétrico, elaboração dos diagramas de interligação e definição dos dispositivos de automação utilizados na planta.

Neste momento é desenvolvido um fluxograma, que se dá a partir de um esquema desenvolvido com auxílio do *software* AutoCad, de como os equipamentos da linha de produção serão posicionados, com o objetivo de facilitar a visualização de todo o projeto e seu fluxo

operacional. A Figura 11 abaixo mostra um esboço do que é desenvolvido nesta fase e a Figura 12 apresenta uma tabela que resume a potência dos motores que acionam cada um dos equipamentos, o método de partida e a faixa de seção dos cabos dos alimentadores de cada motor.

Figura 11 - Esboço na linha de produção e resumo dos equipamentos



Fonte: ChatGPT (2026)

Figura 12 - Quadro resumo das cargas e métodos de partida utilizados

RESUMO DOS EQUIPAMENTOS E PRINCIPAIS INFORMAÇÕES				
LINHA	EQUIPAMENTO	FAIXA DE POTÊNCIA (cv)	MÉTODO DE PARTIDA	SEÇÃO DOS CABOS (mm ²)
BRITAGEM	Alimentador	20	Partida Direta / Inversor	16 a 240
	Britadores	175 a 300	Inversor / Softstart	
	Correias Transportadoras	20 a 50	Partida Direta / Inversor	
	Peneira Vibratória	40	Inversor	
MOAGEM	Calhas Vibratórias	5	Inversor	2,5 a 120
	Correias Transportadoras	2,5 a 4	Partida Direta / Inversor	
	Alimentadores	2,5	Partida Direta / Inversor	
	Moinhos	120	Inversor / Softstart	
	Válvulas Rotativas	2	Partida Direta	
	Umidificador	4	Partida Direta	
	Exaustores	4	Partida Direta	
	Compressores de Ar	35	Partida Direta	

Fonte: ChatGPT (2026)

Com a finalização do desenho da linha de produção e com a lista de cargas em mãos, se torna possível desenvolver a Lista de Instrumentos, que irá conter todo o quantitativo de cada tipo de instrumentação (sensores, chave de desalinhamento, chave de emergência, transmissor de temperatura, transmissor de vazão, vigia de velocidade entre outros) por equipamento da planta.

Nesse sentido, é desenvolvida a Arquitetura Digital pelo AutoCad, que é um documento que representa toda a conectividade dos *hardwares* e *softwares* que serão utilizados, ou seja, como todos os componentes do sistema se conectam e se comunicam, tanto no nível físico quanto lógico, representando a estrutura completa de como as informações circulam, desde os sensores de campo até os sistemas de supervisão e gestão.

Neste documento estão descritos: os sensores, transmissores, válvulas e inversores que serão utilizados, o tipo de sinal (análogo, digital), a localização, ligação com os controladores, os equipamentos responsáveis pelo processamento lógico, como CLPs e módulos remotos, redes de comunicação, como *switches* industriais e o protocolo a ser utilizado, *Ethernet*, *Profinet*, *Modbus TCP*, *Profibus*. Além disso também é demonstrado o sistema de supervisão e interface a ser utilizada, nos quais os operadores interagem com o processo a partir de IHMs locais, sistema SCADA dentre outros. (ISA, s.d.; ROCKWELL AUTOMATION, s.d.).

Em seguida é elaborada a relação de entradas e saídas do projeto, a qual contempla toda a instrumentação prevista para a planta. Para isso, desenvolve-se uma planilha específica contendo a descrição completa dos cartões de entradas e saídas analógicas e digitais. Cada página da planilha corresponde a um cartão, bem como aos respectivos pontos associados.

Nesses pontos são enquadrados os sinais provenientes da instrumentação dos equipamentos da planta, sendo mais comuns, chaves de alinhamento, desalinhamento e emergência, comandos de habilitação e acionamento, sinalização de defeito elétrico, transmissores de temperatura, controle de vazão, retorno de ligado, vigia de velocidade e sensores de nível.

3.1 Sinal Digital e Analógico

O ponto principal de um projeto de automação é automatizar o processo industrial, promovendo a integração entre equipamentos físicos de campo e sistemas computacionais de supervisão e controle. Isso acontece através da comunicação em redes industriais, dispositivos de aquisição de dados e, principalmente, pelo Controlador Lógico Programável (CLP), considerado o núcleo do sistema de automação.

O CLP é composto por fonte de alimentação, unidade central de processamento (CPU), módulos de comunicação (no caso deste estudo ocorre via *Ethernet/IP*) e módulos de entradas e saídas (I/O), conforme a Figura 13. O seu objetivo é adquirir sinais provenientes do campo, processá-los conforme a lógica programada (que neste caso será considerada a *Ladder*) e enviar os comandos aos atuadores do processo.

Figura 13 - CLP utilizado na implantação do projeto



Fonte: Próprio Autor (2024)

A comunicação *Ethernet* é amplamente utilizada neste tipo de operação por permitir a conexão entre dispositivos industriais em redes locais. Existem diferentes protocolos industriais baseados em *Ethernet*, sendo a *Ethernet/IP* utilizada neste estudo, devido à sua elevada taxa de

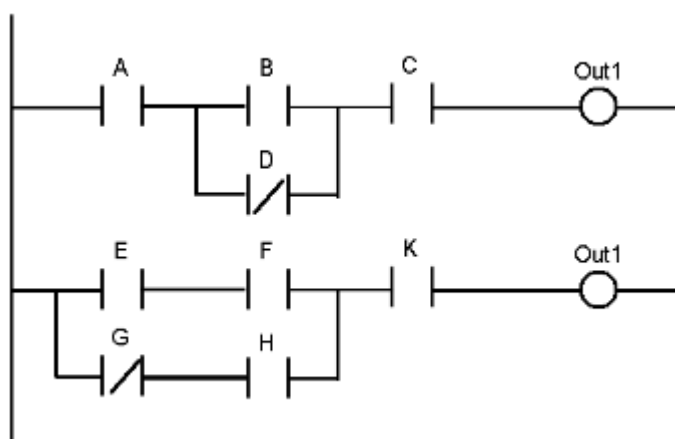
transmissão de dados, comunicação simultânea entre dispositivos, monitoramento em tempo real e facilidade de diagnóstico remoto.

A programação do CLP foi desenvolvida utilizando a linguagem *Ladder Diagram* (LD), padronizada pela norma IEC 61131-3. Essa linguagem é uma das mais utilizadas na automação industrial devido à sua semelhança com diagramas elétricos convencionais, facilitando a interpretação por técnicos e equipes de manutenção (BOLTON, 2015).

A lógica *Ladder* é composta por contatos, bobinas, temporizadores, contadores e blocos funcionais organizados em linhas chamadas de “degraus” (*rungs*). Seu funcionamento ocorre por meio da leitura das entradas do sistema, processamento lógico das condições programadas e acionamento das respectivas saídas (BOLTON, 2015; CAPELLI, 2013).

A Figura 14 apresenta um exemplo de programação em linguagem Ladder, na qual contatos normalmente abertos (NA) e normalmente fechados (NF) são organizados em uma lógica de controle que estabelece as condições necessárias para energização das bobinas de saída. Quando as condições lógicas definidas pelos contatos são satisfeitas, ocorre a continuidade do circuito lógico, permitindo o acionamento das respectivas saídas.

Figura 14 - Exemplo de Lógica *Ladder*



Fonte: INETEC (2026).

Neste projeto, a linguagem *Ladder* foi utilizada para implementar acionamentos de motores, intertravamentos operacionais, permissivos de partida, alarmes, lógicas de segurança, temporizações e monitoramento de falhas.

A escolha dessa linguagem ocorreu devido à sua elevada confiabilidade, facilidade de diagnóstico e ampla aceitação em sistemas industriais de britagem e moagem (BOLTON, 2015).

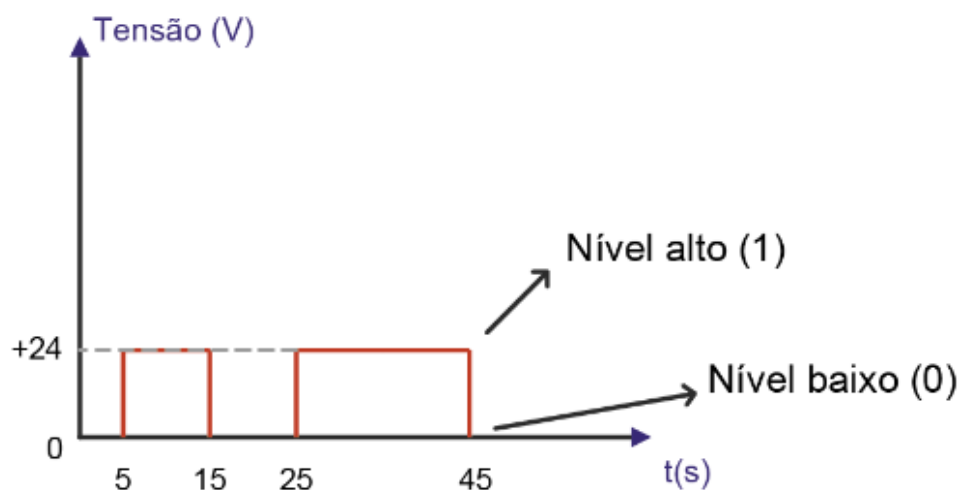
Em sistemas de automação utilizados para plantas como britagem, os CLPs realizam a interface entre o processo físico e o sistema de controle por meio de entradas e saídas, que também podem ser chamadas de *inputs* e *outputs* (I/O). De acordo com a natureza de cada um destes sinais eles serão classificados como analógicos ou digitais (ROCKWELL AUTOMATION, s.d.).

3.1.1 Sinal Digital

Os sinais digitais assumem apenas dois estados discretos, 0 ou 1, ou seja, aberto ou fechado, ligado ou desligado. São utilizados quando a variável do processo necessita apenas da indicação de um estado lógico e não de uma representação contínua. (MONOLITHIC POWER, 2025).

A Figura 15 demonstra como é o desempenho do sinal digital.

Figura 15 - Gráfico de desempenho do Sinal Digital



Fonte: IMD/UFRN (2024).

As entradas digitais normalmente permitem a leitura de informações de campo, como por exemplo, sensores indutivos e capacitivos, chave de fim de curso, botões de comando, contatos auxiliares, intertravamentos entre outros. O nível de tensão do sinal destas informações normalmente é de 24 VCC, pois oferece maior segurança operacional e reduz riscos de choque elétrico. Porém em algumas aplicações específicas podem ser utilizados sinais de 110/220 VCA, quando há compatibilidade com circuitos já existentes na planta.

Já as saídas digitais não alimentam diretamente grandes cargas, mas comandam dispositivos intermediários, como relés (fornecem um isolamento elétrico permitindo chaveamento CA/CC), contadores e inversores, permitindo a atuação no processo acionando motores, válvulas, sinalizadores e alarmes.

3.1.2 Sinal Analógico

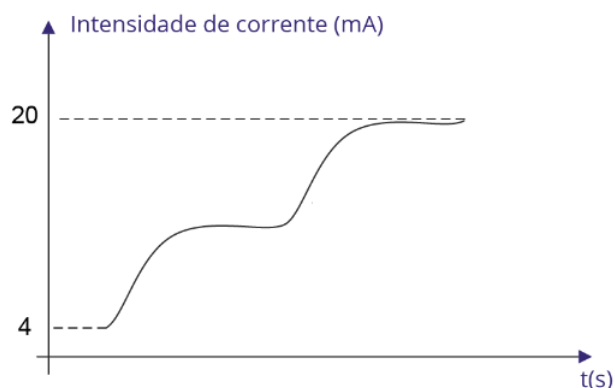
Diferentemente do sinal digital, o analógico apresenta as variações graduais e contínuas do processo. Representam valores contínuos, como pressão, vazão, temperatura, nível, corrente e tensão, variando continuamente dentro de uma faixa definida no CLP por meio de conversores A/D (Analógico Digital) e D/A (Digital Analógico), podendo as saídas analógicas enviarem tais sinais contínuos do CLP para os inversores de frequência e válvulas de controle. (INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE, 2018).

O conversor Analógico Digital funciona em três etapas: amostragem do sinal, quantização e conversão em código binário, ou seja, o valor de uma tensão que variou de 0 a 10 volts, pode ser representado por um valor digital, como 0 a 1234. Enquanto o conversor Digital Analógico transforma valores digitais da CPU em sinais contínuos a fim de oferecer o controle de válvulas e inversores presentes na planta.

As entradas analógicas recebem sinais de instrumentos de medição, como, transmissores de pressão, nível, termopares e medidores de vazão. O principal padrão mais utilizado é a 4-20 mA, onde 4 mA representa 0% da variável, 20 mA representa 100%, e valores menores que 4 mA indicam falha no sistema. Este padrão é o mais recomendado pelas normas e fabricantes, pois apresenta maior imunidade a ruídos elétricos, permite detecção de falha (corrente abaixo de 4 mA), sendo o mais adequado para longas distâncias.

A Figura 16 mostra como é o desempenho do sinal analógico.

Figura 16 - Gráfico de desempenho do Sinal Analógico



Fonte: IMD/UFRN (2024).

Para definir estes pontos para um projeto é importante a consulta às normas IEC 61131-2 que define requisitos para sinais elétricos de entradas e saídas de CLPs e a NBR 5410 que faz as recomendações práticas de aterramento e segregação de cabos.

3.2 Tipos de cartões I/O

Nesta fase do projeto são definidos todos os cartões de entrada e saída que serão utilizados. Para isso, foi realizado um estudo do funcionamento geral desta etapa do processo, a fim de identificar quais módulos atenderiam adequadamente às necessidades do cliente. A escolha correta dos cartões em um sistema de automação é um fator crítico para garantir a confiabilidade, a segurança e a qualidade do controle da planta.

As principais normas técnicas que influenciam nas especificações de cartões de I/O são a *International Electrotechnical Commission* IEC 61131-2 — que define os requisitos elétricos e funcionais para entradas e saídas de CLPs —, a Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 5410 — que estabelece diretrizes para instalações elétricas de baixa tensão — e a IEC 61000, relacionada à compatibilidade eletromagnética (EMC). Nessas normas são definidos critérios técnicos mínimos, como faixas de tensão e corrente, isolamento elétrica, imunidade a ruídos e proteção contra falhas (IEC 61131-2, s.d.; ABNT NBR 5410, 2004; IEC 61000, s.d.).

Os sistemas modernos utilizam arquitetura modular, permitindo expansão do sistema, substituição individual de módulos e maior flexibilidade de configuração. Além disso, a maioria dos cartões industriais emprega isolamento galvânica entre o circuito de campo e o circuito interno do CLP, normalmente realizada por optoacopladores, transformadores ou isoladores capacitivos. Essa isolamento tem como principal objetivo evitar a propagação de surtos elétricos,

reduzir interferências eletromagnéticas e proteger a unidade de processamento do controlador (BOLTON, 2015; DUNN, 2010).

Em aplicações que apresentam riscos operacionais, são utilizados módulos *Safety I/O*, que possuem diagnóstico interno contínuo, redundância de canais e monitoramento de falhas, garantindo que o sistema entre em estado seguro em caso de anomalias (*fail-safe*). Esses módulos são aplicados em circuitos de parada de emergência, intertravamentos e sistemas de proteção de operadores, atendendo às exigências das normas regulamentadoras NR 10 - Segurança em Instalações e Serviços em Eletricidade e NR 12 - Segurança no Trabalho em Máquinas e Equipamentos, estabelecidas pelo Ministério do Trabalho e Emprego.

No projeto desenvolvido foram utilizados módulos da linha *CompactLogix 5069* da *Rockwell Automation*, reconhecida pela conformidade com padrões industriais e elevada confiabilidade.

Para as entradas digitais, foi utilizado o módulo 5069-IA16 (220 VCA), responsável pela leitura de sinais provenientes de contatos auxiliares de contadores, chaves de fim de curso e intertravamentos elétricos. Entre as instrumentações associadas estão defeito elétrico, controle de nível, vigia de velocidade, detector de metais e sensores de ausência de material. A escolha por sinais em 220 VCA foi motivada pela compatibilidade com a infraestrutura elétrica existente na planta, evitando a necessidade de conversores de sinal. Entretanto, ressalta-se que, conforme práticas atuais, o uso de 24 VCC é mais recomendado por apresentar maior segurança operacional e menor risco de choque elétrico grave.

Para as saídas digitais, foi utilizado o módulo 5069-OW16 (saída a relé em 220 VCA), destinado ao acionamento de contadores, comando de motores e sistemas de sinalização, como torres luminosas, sirenes e alarmes. Nesse projeto, foi utilizado, principalmente, para o acionamento das sirenes da planta. A utilização de saídas a relé permite isolamento elétrico entre o CLP e a carga, uma vez que o acionamento ocorre por meio de contatos eletromecânicos, sem conexão elétrica direta entre o circuito de controle e o circuito de potência. Essa característica evita a propagação de surtos elétricos e aumenta a proteção do sistema. Como desvantagem, esse tipo de módulo apresenta menor velocidade de comutação e desgaste mecânico ao longo do tempo, embora ainda seja amplamente utilizado devido à sua robustez (ROCKWELL AUTOMATION, s.d.).

Nas entradas analógicas, foi utilizado o módulo 5069-IF8 (4–20 mA), aplicado na leitura dos transmissores de nível dos equipamentos da linha de britagem e moagem. A escolha do padrão 4–20 mA se deve à sua alta imunidade a ruídos eletromagnéticos, especialmente relevantes em ambientes industriais com grande quantidade de motores e inversores de

frequência. Além disso, esse padrão permite a detecção de falhas, uma vez que correntes abaixo de 4 mA indicam problemas no circuito. Diferentemente dos sinais em tensão (0–10 volts), o sinal em corrente não sofre influência significativa da resistência dos cabos, sendo mais adequado para longas distâncias (DUNN, 2010; LIPTAK, 2003).

Também foi utilizado o módulo 5069-IY4 para sensores RTD (*Resistance Temperature Detector*), empregados no monitoramento da temperatura de mancais e na proteção térmica de motores. Os sensores RTD operam com base na variação da resistência elétrica em função da temperatura, sendo amplamente utilizados devido à sua alta precisão, estabilidade e confiabilidade em aplicações industriais. Apesar do custo superior em comparação a outros sensores, sua utilização é essencial para a proteção de equipamentos críticos, como britadores e rebritadores (OGATA, 2010).

Para as saídas analógicas, foi utilizado o módulo 5069-OF4 (4–20 mA), responsável pelo controle de inversores de frequência e válvulas de controle, permitindo atuação contínua e proporcional. Esse tipo de controle é fundamental para o ajuste da velocidade de motores e para o controle fino do processo industrial.

Por fim, foram utilizados módulos de segurança *Safety* I/O, sendo o 5069-IB8S (entrada digital de segurança) e o 5069-OBV8S (saída digital de segurança). Esses módulos são essenciais para garantir o funcionamento seguro do sistema, assegurando a detecção de falhas, redundância de sinais e execução de ações seguras em situações críticas. No projeto, foram aplicados em circuitos de parada de emergência, intertravamentos, monitoramento de proteções mecânicas e sistemas de segurança dos equipamentos.

Observa-se que houve uma evolução normativa significativa ao longo dos anos. Em sistemas antigos, não eram exigidos requisitos como redundância, diagnóstico automático e validação de segurança. Com a atualização das normas, especialmente da NR 12, passou a ser obrigatória a implementação de sistemas de segurança mais robustos, com lógica redundante, auto diagnóstico e prevenção de falhas perigosas.

Dessa forma, sistemas modernos apresentam maior confiabilidade e segurança operacional, reduzindo significativamente os riscos de acidentes e falhas críticas. Embora os módulos *Safety* apresentem maior custo inicial, eles proporcionam benefícios relevantes, como redução de acidentes, maior disponibilidade operacional e conformidade com normas, além de minimizar riscos jurídicos para a empresa.

3.3 Diagramas de Interligação

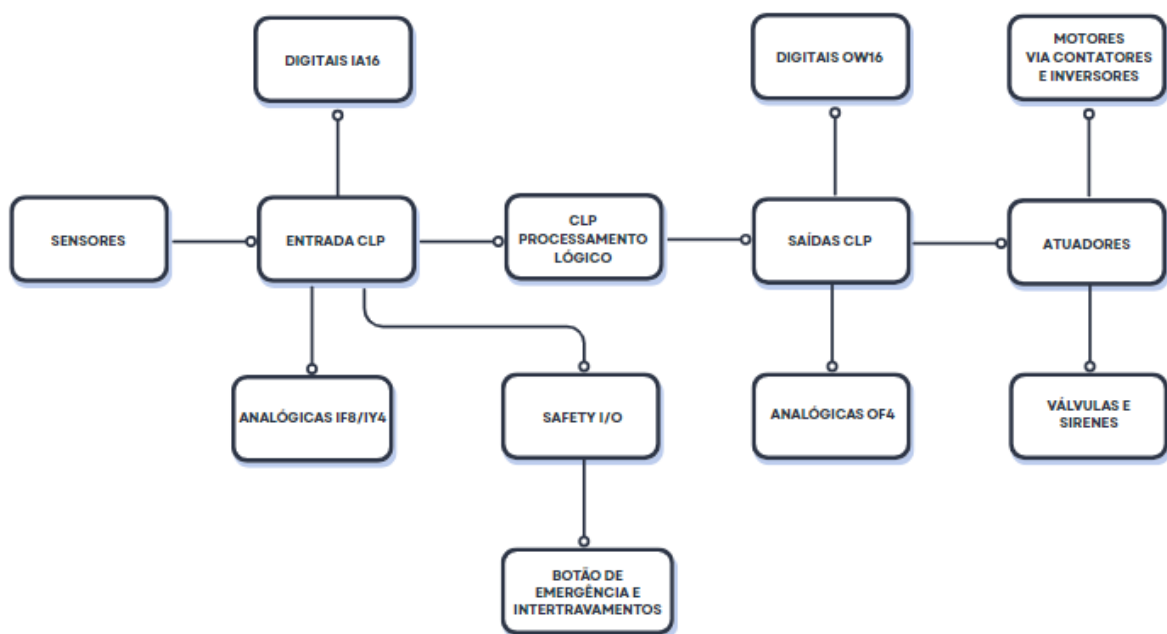
Após a elaboração da documentação referente à relação de entradas e saídas (E/S), são desenvolvidos os diagramas de interligação do sistema. Esses diagramas têm como finalidade representar de forma detalhada as conexões entre os dispositivos de campo, os painéis elétricos e o CLP.

São elaborados diagramas específicos para cada tipo de partida adotada, contemplando todos os elementos necessários para os circuitos de alimentação e comando da planta, como dispositivos de proteção, acionamento e controle.

Além disso, são desenvolvidos diagramas individuais para cada equipamento do processo, nos quais são definidos os pontos de conexão nos cartões de entrada e saída do CLP, a identificação dos instrumentos de campo e os pontos relacionados aos sistemas de segurança previamente estabelecidos na lista de E/S.

Os diagramas também indicam o trajeto dos cabos de alimentação e comando, desde os equipamentos de campo até os painéis elétricos e o CLP, permitindo uma visão clara da arquitetura física do sistema. Essa documentação é essencial para garantir a correta montagem, facilitar a manutenção e assegurar a rastreabilidade das conexões do sistema de automação. A Figura 17 demonstra de forma simplificada o funcionamento de um diagrama de interligação do sistema de automação.

Figura 17 - Diagrama simplificado de interligação do sistema de automação



Fonte:Próprio autor (2026)

3.4 Desenvolvimento e Configuração do sistema

Após a conclusão da documentação técnica do projeto, foi iniciada a etapa de desenvolvimento e configuração do sistema de automação da planta. Nessa fase foi realizada a criação da lógica de controle do CLP, definição das comunicações industriais e desenvolvimento do sistema supervisor responsável pelo monitoramento e operação da planta.

Para o desenvolvimento da lógica de controle foi utilizado o *software Studio 5000* da *Rockwell Automation*, utilizando a linguagem *Ladder Diagram* (LD), padronizada pela IEC 61131-3. A linguagem *Ladder* foi escolhida devido à sua ampla aplicação industrial, facilidade de interpretação e maior praticidade em atividades de manutenção e diagnóstico de falhas, permitindo a implementação das rotinas operacionais e de segurança da planta de forma organizada (BOLTON, 2015).

No projeto desenvolvido, a programação contemplou acionamento dos equipamentos da britagem e moagem, intertravamentos operacionais, lógicas de segurança, monitoramento de falhas, alarmes, permissivos operacionais e controle automático da linha de produção.

Em paralelo ao desenvolvimento da lógica do CLP, foi realizado o desenvolvimento do sistema supervisor (SCADA/IHM), conforme mostra a Figura 18, responsável pela interface entre operador e processo industrial. Nesse sistema foram desenvolvidas telas gráficas representando toda a planta em operação, permitindo monitoramento em tempo real dos equipamentos, visualização de alarmes, estados operacionais, falhas elétricas e variáveis do processo.

Figura 18 - Sistema Supervisório desenvolvido



Fonte: Próprio Autor (2024)

A integração entre supervisório, CLP, inversores de frequência e módulos remotos ocorreu por meio da rede industrial *Ethernet/IP*, protocolo amplamente utilizado na automação industrial devido à elevada velocidade de comunicação, integração entre dispositivos e facilidade de diagnóstico.

Durante o desenvolvimento do sistema, toda a documentação elaborada anteriormente foi fundamental para garantir a correta implementação do projeto, especialmente: lista de entradas e saídas; *TAGs* dos equipamentos; diagramas de interligação; definições dos cartões I/O; instrumentação; pontos de segurança e emergência.

Além da elaboração dos diagramas elétricos e da definição dos cartões de entrada e saída, também foi realizada a definição da arquitetura física dos painéis elétricos e módulos remotos utilizados no sistema de automação. Essa etapa contempla a montagem física dos painéis responsáveis pela comunicação entre os equipamentos de campo, os módulos de entrada e saída e o sistema de controle da planta.

Os módulos remotos de entrada e saída possuem a função de descentralizar os sinais da planta, permitindo que sensores e atuadores sejam conectados próximos aos equipamentos de campo. Essa estratégia reduz significativamente a quantidade de cabeamento até o painel principal, facilita futuras expansões do sistema e simplifica atividades de manutenção. Na Figura 19 é possível observar que nessas remotas são instalados os cartões de entrada e saída responsáveis pela leitura dos sinais dos sensores e pelo acionamento dos dispositivos de campo (BOLTON, 2015).

Figura 19 - Montagem dos cartões de entrada e saída



Fonte: Próprio Autor (2024)

Nos painéis também são instaladas régulas de bornes, conforme a Figura 20 mostra, que serão utilizadas para organizar e distribuir as conexões elétricas entre os equipamentos de campo e os cartões do CLP. Cada ponto é identificado conforme os diagramas elétricos e a lista de entradas e saídas do projeto, permitindo rastreabilidade dos sinais, facilidade de manutenção e maior segurança durante intervenções elétricas.

Figura 20 - Instalação das régulas de borne nos painéis



Fonte: Próprio Autor (2024)

Os painéis foram instalados na sala elétrica da planta, ambiente responsável por concentrar os sistemas de alimentação, proteção, controle e automação industrial. A comunicação entre os módulos remotos, CLP e supervisor ocorre por meio da rede *Ethernet/IP*, utilizando *switches* industriais responsáveis pelo gerenciamento do tráfego de dados da automação e pela integração entre os dispositivos do sistema (ROCKWELL AUTOMATION, s.d.).

A rede elétrica disponível na planta operava em 380/220 VCA, sendo 380 V entre fases e 220 V entre fase e neutro. Entretanto, os circuitos auxiliares e de comando dos painéis foram projetados para operar em 127 VCA, padrão da região onde foram fabricados. Dessa forma, foi necessária a instalação de transformadores de controle nos pontos de alimentação dos painéis,

adequando os níveis de tensão e possibilitando a correta energização e operação dos equipamentos em campo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Considerando que a planta em estudo foi concebida para operar integralmente de forma automatizada, o início da produção industrial somente ocorreu após a conclusão das etapas de configuração, testes, comissionamento e startup do sistema de automação.

4.1 Testes de Comunicação e Integração

Após a conclusão do desenvolvimento lógico e da montagem física dos painéis, foram iniciadas as etapas de testes e comissionamento do sistema de automação.

Inicialmente, foram realizados testes internos de comunicação entre o CLP, o sistema supervisório e os dispositivos conectados à rede *Ethernet/IP*. Nessa etapa foram verificadas as leituras dos sinais de entrada e saída, funcionamento das animações gráficas do supervisório, alarmes, intertravamentos, falhas simuladas e comandos operacionais.

Conforme mostrado na Figura 21, também foram realizados testes de integração entre módulos remotos, inversores de frequência, *switches* industriais e demais dispositivos da rede de automação, garantindo o correto funcionamento da arquitetura de comunicação implementada.

Figura 21 - Testes de integração



Fonte: Próprio Autor (2024)

Outro ponto importante observado durante os testes foi a necessidade de conferência da árvore de comunicação *Ethernet/IP*, garantindo que todos os dispositivos estivessem configurados corretamente na mesma faixa de rede e sincronizados entre o CLP e o sistema supervisorio.

4.2 Testes Operacionais da Planta

Durante os testes operacionais foram avaliados os diferentes modos de operação da planta, garantindo flexibilidade e segurança operacional.

O modo local permite o acionamento individual dos equipamentos diretamente em campo, sendo normalmente utilizado para manutenção, inspeções e testes específicos. Já o modo remoto permite o acionamento dos equipamentos por meio do sistema supervisorio, possibilitando que os operadores controlem a planta diretamente da sala de controle.

No modo automático, toda a lógica operacional ocorre de forma sequencial e automatizada pelo CLP, respeitando permissões, intertravamentos, tempos de partida e condições de segurança previamente programadas. Esse modo representa a condição final de operação da planta, proporcionando maior produtividade, redução da intervenção humana e aumento da segurança operacional.

Durante essa fase também foram avaliadas as respostas das telas supervisorias, alarmes e animações gráficas desenvolvidas, garantindo que os operadores conseguissem identificar rapidamente falhas, sobrecargas e condições anormais do processo industrial.

4.3 Startup e Comissionamento

Após a validação em bancada, os painéis foram enviados para a planta para início do startup e comissionamento em campo.

Com os painéis energizados, foram estabelecidas as comunicações entre remotas, CLP, supervisorio, inversores de frequência e dispositivos da rede industrial. Durante o *startup*, os equipamentos foram, inicialmente, testados de forma individual, permitindo verificar sentido de rotação, funcionamento elétrico, comunicação, atuação das proteções e lógica operacional.

Após os testes individuais, foi realizado o teste da linha completa sem carga, conhecido como “teste a vazio”, no qual todos os equipamentos operaram simultaneamente sem material no processo.

Com a validação desta etapa, iniciaram-se os testes com carga, nos quais o sistema passou a operar em condições reais de produção. Durante os testes com carga, os equipamentos foram acionados de forma sequencial, respeitando toda a lógica operacional implementada no sistema de automação.

Caso algum equipamento apresentasse falha operacional, elétrica, mecânica ou de automação, toda a linha era interrompida para análise e correção da não conformidade identificada. Após a validação de todos os equipamentos e da operação completa da planta em modo automático, a etapa de comissionamento foi considerada concluída. A Figura 22 mostra uma parte do processo em execução, em que a correia despeja o material formando uma pilha de calcário.

Figura 22 - Linha de produção operando



Fonte: Próprio Autor (2024)

Em seguida, foi realizado o treinamento operacional com os responsáveis pela operação da planta, contemplando utilização do sistema supervisório, reconhecimento de falhas, alarmes e procedimentos operacionais básicos.

4.4 Não Conformidades e Lições Aprendidas

Durante o *startup* foram identificadas diversas situações práticas importantes para o aperfeiçoamento do sistema e para futuras implantações de automação industrial. Observou-se que os testes operacionais não devem ser iniciados sem que os cartões de falha e os intertravamentos estejam devidamente configurados e validados, uma vez que essas funções são fundamentais para garantir a segurança operacional da planta.

A ausência dos cartões de falha compromete o monitoramento adequado do processo, impossibilitando a identificação imediata de condições anormais de operação, tais como sobrecarga, sobretensão, excesso de velocidade e falhas associadas à instrumentação de campo. Nessas condições, o operador deixa de receber informações críticas por meio do sistema supervisão, reduzindo a capacidade de tomada de decisão e aumentando os riscos operacionais.

Da mesma forma, a operação sem a implementação adequada dos intertravamentos pode ocasionar acidentes, danos aos equipamentos e perdas de material. Como exemplo, em uma linha de britagem, o acionamento do alimentador deve ocorrer somente após a entrada em operação da correia transportadora subsequente. Caso essa sequência lógica não seja respeitada, poderá ocorrer acúmulo de material na correia, comprometendo o fluxo do processo e aumentando os riscos de parada operacional.

Também foram identificadas situações relacionadas à parametrização dos inversores de frequência, compatibilidade entre a potência dos motores e os *drives* utilizados, além de problemas associados às ligações elétricas dos circuitos de proteção e contatos auxiliares. Nesses casos, a análise dos diagnósticos apresentados nas interfaces dos equipamentos e a consulta à documentação técnica dos fabricantes mostraram-se fundamentais para a identificação e correção das falhas.

Em situações relacionadas às conexões elétricas, foram necessários procedimentos de verificação de continuidade dos cabos, conferência das tensões de alimentação, inspeção das ligações nos painéis elétricos e análise das sinalizações luminosas dos dispositivos, garantindo a correta identificação das causas das falhas observadas.

Embora essas não conformidades tenham demandado ajustes durante o *startup*, seu impacto no cronograma foi minimizado devido ao planejamento prévio das atividades de comissionamento, que já contemplava a possibilidade de adequações e correções em campo. Essa prática contribuiu para reduzir atrasos na entrega do projeto e garantir maior confiabilidade durante a entrada em operação da planta.

Essas ocorrências demonstraram a importância da validação completa da lógica de controle, da conferência dos diagramas elétricos, dos testes de continuidade e da verificação das parametrizações dos equipamentos antes do início da operação automática da planta.

As lições aprendidas obtidas durante o *startup* contribuíram para aumentar a confiabilidade do sistema, aperfeiçoar os procedimentos de comissionamento e otimizar futuras implantações de automação industrial em processos semelhantes.

4.5 Ganhos Operacionais Obtidos

A implantação do sistema de automação foi fundamental para o início da operação da planta industrial, uma vez que o processo foi concebido para operar integralmente de forma automatizada. Dessa forma, a produção da planta somente pôde ser iniciada após a conclusão das etapas de desenvolvimento, testes, comissionamento e *startup* do sistema de automação.

Com a implantação do sistema automatizado, foram garantidos, à segurança operacional, monitoramento em tempo real, confiabilidade do processo e controle da linha de produção.

Com a automação implementada, foram obtidos ganhos como: aumento da segurança operacional, redução do tempo de parada, maior facilidade na identificação de falhas, melhoria na operação da planta, aumento da confiabilidade do processo, maior proteção dos operadores e aumento da produtividade.

Além disso, a centralização das informações operacionais no sistema supervisorio permitiu maior agilidade na tomada de decisões e redução significativa das intervenções manuais na operação da planta.

Embora o investimento inicial em automação industrial seja elevado, os ganhos operacionais e produtivos obtidos permitem retorno técnico e operacional em médio prazo, principalmente devido à redução de falhas, aumento da disponibilidade da planta e melhoria da eficiência do processo industrial.

5. CONCLUSÃO

A automação industrial aplicada a processos de britagem e moagem apresenta papel fundamental no aumento da segurança, confiabilidade e eficiência operacional das plantas industriais. Neste trabalho foi possível desenvolver e acompanhar todas as etapas de implantação de um sistema de automação industrial, desde o levantamento de campo e elaboração da documentação técnica até o desenvolvimento lógico, configuração do sistema supervísório, testes operacionais, *startup* e comissionamento da planta.

Durante o desenvolvimento do projeto foram aplicados conceitos relacionados a redes industriais, instrumentação, sistemas supervísórios, controladores lógicos programáveis (CLPs), cartões de entradas e saídas, diagramas de interligação e sistemas de segurança industrial, utilizando tecnologias amplamente empregadas na indústria, como *Ethernet/IP*, módulos remotos de I/O e programação em linguagem *Ladder*.

Os testes realizados durante o *startup* permitiram validar o funcionamento do sistema em condições reais de operação, possibilitando a identificação de não conformidades relacionadas à parametrização de equipamentos, lógica de controle e intertravamentos operacionais. Essas situações evidenciaram a importância da validação completa dos sistemas antes da operação automática da planta, bem como da correta configuração dos dispositivos de segurança e comunicação industrial.

A implantação da automação garantiu ganhos significativos para o processo industrial, como segurança operacional, redução do tempo de parada, melhoria no monitoramento da planta, maior facilidade na identificação de falhas e confiabilidade operacional. Além disso, a centralização das informações no sistema supervísório contribuiu para maior agilidade na tomada de decisões e redução das intervenções manuais no processo.

Dessa forma, conclui-se que os objetivos propostos neste trabalho foram atingidos, demonstrando que a automação industrial representa uma solução essencial para otimização de processos industriais de britagem e moagem, proporcionando melhorias operacionais, produtivas e de segurança. Além disso, o desenvolvimento deste estudo contribuiu significativamente para o aprimoramento técnico e profissional, permitindo a aplicação prática dos conhecimentos adquiridos ao longo do curso de Engenharia Elétrica.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABB. *Motor starting with soft starters: reduced stresses*. Zürich: ABB, 2015.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 5410: *instalações elétricas de baixa tensão*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
3. BOLTON, W. *Programmable logic controllers*. 6. ed. Oxford: Newnes, 2015.
4. BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 10: *segurança em instalações e serviços em eletricidade*. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 1978.
5. BRASIL. Ministério do Trabalho e Emprego. NR 12: *segurança no trabalho em máquinas e equipamentos*. Brasília, DF: Ministério do Trabalho e Emprego, 1978.
6. CAPELLI, Alexandre. *Automação industrial: controle do movimento e processos contínuos*. 2. ed. São Paulo: Érica, 2013.
7. DUNN, William C. *Fundamentals of industrial instrumentation and process control*. New York: McGraw-Hill, 2010.
8. EATON. *Application note: starting multiple motors with one soft starter*. Dublin: Eaton Corporation, 2014.
9. EngProcess. *Projeto de automação industrial*. Disponível em: <https://engprocess.com.br/projeto-de-automacao-industrial>. Acesso em: 10 abr. 2026.
10. FRANCHI, Claiton Moro. *Acionamentos elétricos*. 4. ed. São Paulo: Érica, 2008.
11. INETEC. *O que é Ladder e por que todo eletricitista deveria aprender*. Disponível em: <https://inetec.com.br/o-que-e-ladder-e-por-que-todo-eletricista-deveria-aprender/>. Acesso em: 31 maio 2026.
12. INSTITUTO FEDERAL CATARINENSE. *Instrumentação – transmissores e receptores*. 2018. Disponível em: <https://professor.luzerna.ifc.edu.br/giovani-pasetti/wp-content/uploads/sites/35/2018/03/Instrumenta%C3%A7%C3%A3o-Parte-2-Transmissores-e-Receptores.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2026.
13. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61000: *electromagnetic compatibility (EMC)*. Genebra: IEC, s.d.
14. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61131-2: *programmable controllers – equipment requirements and tests*. Genebra: IEC, s.d.
15. INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. IEC 61131-3: *programmable controllers – programming languages*. Genebra: IEC, s.d.
16. INTERNATIONAL SOCIETY OF AUTOMATION. ISA-95: *enterprise-control system integration*. Research Triangle Park: ISA, s.d.
17. KOSOW, Irving L. *Máquinas elétricas e transformadores*. 15. ed. São Paulo: Globo, 2008.
18. LIPTAK, Béla G. *Instrument Engineers' Handbook*. Boca Raton: CRC Press, 2003.
19. LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C. A. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.
20. MAMEDE FILHO, João. *Instalações elétricas industriais*. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.
21. Monolithic Power Systems. *Analog vs Digital Signal*. Disponível em: <https://www.monolithicpower.com/en/learning/resources/analog-vs-digital-signal>. Acesso em: 17 mar. 2026.
22. OGATA, Katsuhiko. *Modern control engineering*. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010.
23. ROCKWELL AUTOMATION. *ControlLogix Digital I/O Modules – User Manual 1756-UM009*. Milwaukee: Rockwell Automation, s.d.
24. ROCKWELL AUTOMATION. *EtherNet/IP Network Configuration User Manual*. Milwaukee: Rockwell Automation, s.d.
25. ROCKWELL AUTOMATION. *When to use a soft starter or a drive*. Milwaukee:

- Rockwell Automation, 2018.
26. SENAI. *Projeto de automação industrial – Ouro Branco*. Brasília: SENAI, s.d.
 27. SIEMENS. *Soft starters: application guide*. Munique: Siemens AG, 2017.
 28. [Termoblog](https://termoblog.com.br/como-funciona-um-inversor-de-frequencia/). *Como funciona um inversor de frequência*. Disponível em: <https://termoblog.com.br/como-funciona-um-inversor-de-frequencia/>. Acesso em: 17 jan. 2026.
 29. [TOTVS](https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/industria-4-0/). *Indústria 4.0: o que é, pilares e como aplicá-la nas empresas*. 2023. Disponível em: <https://www.totvs.com/blog/gestao-industrial/industria-4-0/>. Acesso em: 22 jun. 2025.
 30. UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA. *Automação industrial: material didático*. Santa Maria: UFSM, 2018.
 31. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. Instituto Metrópole Digital. *Título da aula ou disciplina*. Disponível em: <https://materialpublic.imd.ufrn.br/curso/disciplina/1/60/2/6>. Acesso em: 31 maio 2026.
 32. UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE. *Projeto em automação industrial: material didático*. Natal: UFRN, s.d.
 33. WEG. *CFW11T – inversor de frequência para controle de motores aplicados em veículos elétricos: manual*. Jaraguá do Sul: WEG, 2020. Disponível em: <https://static.weg.net/medias/downloadcenter/hf2/h79/WEG-cfw11t-inversor-de-frequencia-para-controle-de-motores-aplicados-em-veiculos-eletricos-10002020360-manual-portugues-br.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2026.
 34. WEG. *Guia de aplicação: inversores de frequência CFW500*. Jaraguá do Sul: WEG, 2017.
 35. WEG. *Inversor de frequência CFW700*. Disponível em: <https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Drives/Produtos-Descontinuados/Inversor-de-Frequ%C3%Aancia-CFW700/INVERSOR-CFW700A10P0T4DB20C3Y1/p/11874764>. Acesso em: 10 jan. 2026.
 36. WEG. *Manual do usuário: Soft-Starter SSW07*. Jaraguá do Sul: WEG, 2016.