

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ANDRIWS GALDENCIO VITORINO CORDEIRO
JONATHAS LOPES PEREIRA**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA
AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE
EXAUSTÃO DE UM LAMINADOR DE ENCRUAMENTO**

**VOLTA REDONDA
2018**

**FUNDAÇÃO OSWALDO ARANHA
CENTRO UNIVERSITÁRIO DE VOLTA REDONDA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA
AUMENTO DA EFICIÊNCIA ENERGÉTICA NO SISTEMA DE
EXAUSTÃO DE UM LAMINADOR DE ENCRUAMENTO**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Elétrica do UniFOA como requisito à obtenção do título de Engenheiro Eletricista.

Aluno:

Andriws Galdencio Vitorino Cordeiro

Jonathas Lopes Pereira

Orientador:

Prof. Msc. Claudio Marcio de Freitas da Silva

Co-orientador:

Prof. Msc. Adilson Gustavo do Espirito Santo

**VOLTA REDONDA
2018**



Fundação Oswaldo Aranha



FOLHA DE APROVAÇÃO

Curso: Engenharia Elétrica

Acadêmico: Matrícula: Andriws Galdencio Vitorino Cordeiro 201210336; Jonathas Lopes Pereira 201211154

Título do TCC: Estudo de viabilidade técnica e econômica para aumento da eficiência energética no sistema de exaustão de um Laminador de Encruamento.

Apresentado publicamente perante a Banca Avaliadora, como parte dos requisitos para conclusão do Curso de Engenharia Elétrica

Aprovada em 10 de Novembro de 2018

Banca Avaliadora:

Professor Orientador

Cláudio Márcio de Freitas da Silva, Mestre, UniFOA

Professor Avaliador

Maurício Ferreira Haddad, Mestre, UniFOA

Professor Avaliador

Bruno Moreira da Silva, Especialista, UniFOA

Dedicamos primeiramente a Deus, que iluminou nossos caminhos durante esta caminhada. Aos professores Claudio e Adilson pela orientação e grande disponibilidade em ajudar.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos a Deus e a todos os familiares e amigos pela força e companheirismo, pois com tantas ocasiões difíceis, tudo fica mais fácil quando temos pessoas que ao nosso lado nos fortalecem e amparam em todos os momentos.

RESUMO

O presente trabalho visa o aumento da eficiência energética em um sistema de exaustão responsável pela sucção de névoa de óleo proveniente do processo de laminação e encruamento. Tal sistema se encontra em funcionamento há mais de vinte anos, contando com acionamento através de partida direta e sem controle de velocidade. Com o passar dos anos e a atualização da microeletrônica, as possibilidades se tornaram infinitas, proporcionando um controle maior dos processos industriais.

Serão comprovados através dos métodos de análise de problemas, cálculos matemáticos e financeiros que a variação de velocidade, terá como resultado uma economia de energia superior a 50%.

A própria equação que rege as bombas, ventiladores e exaustores mostra que uma pequena variação na velocidade do sistema já é suficiente para gerar resultados satisfatórios quanto a redução da potência consumida da rede.

O tema eficiência energética é muito abrangente e neste trabalho os esforços foram concentrados nos resultados da implantação do controle de velocidade do sistema de exaustão. Contudo, a eficiência energética por se tratar de um assunto muito complexo e abrangente em sistemas de exaustão ainda há um grande espaço para estudos futuros.

Palavras chave: Eficiência energética; Sistema de Exaustão; Controle de velocidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Justificativa	3
1.2	Objetivo Geral	3
1.2.1	Objetivo Específico.....	4
1.3	Metodologia	4
2	EMBASAMENTO TEÓRICO	5
2.1	Eficiência energética.....	5
2.2	Demanda (kW).....	6
2.3	Grupos Tarifários	7
2.4	Motores.....	8
2.4.1	MIT	8
3.2.1	Modelo em regime permanente.....	11
3.2.2	Seleção e aplicação dos motores elétricos assíncronos trifásicos de alta tensão.....	13
2.5	Partidas de motores.....	14
2.5.1	Conjugado de partida	16
2.5.2	Partida direta	18
2.5.3	Partida Estrela triângulo	20
2.5.4	Soft Starter	25
2.5.4.1	Princípio de Funcionamento do Soft- Starter	26
2.5.4.2	Condição para instalação de soft starters.....	28
2.5.5	Inversores de frequência.....	29
2.5.5.1	Estrutura básica do Inversor de frequência	30
2.5.5.2	Métodos de controle	33
2.5.5.3	Controle Escalar	33
2.5.5.4	Controle Vetorial	35
2.6	Ventilação industrial.....	35

2.7	Potência e Energia.....	36
2.7.1	Triângulo de potência.....	38
2.7.2	Potência Ativa.....	38
2.7.3	Potência Reativa.....	40
2.7.4	Potência Aparente.....	40
2.7.5	Fator de potência.....	41
2.7.6	Determinação do FP.....	41
2.7.7	Correção do FP.....	41
3	Fluxograma de uma Siderúrgica.....	42
3.1	Laminador de tiras a frio (LTF).....	44
3.2	Laminador de Encruamento Reversível (LER).....	46
3.2.1	Componentes do laminador de encruamento.....	48
3.2.2	Sistema de aplicação de óleo Protetivo.....	50
4	IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS.....	54
4.1	Instrumento para análise das variáveis.....	57
4.2	Problemas com o método de partida.....	58
4.3	Consumo elevado de energia no exaustor.....	60
4.4	Regime de funcionamento do exaustor.....	62
5	ESTIMANDO A TAXA DE UTILIZAÇÃO DO EXAUSTOR.....	63
6	ESTUDO DA SOLUÇÃO.....	65
6.1	Escopo do projeto.....	66
6.2	Método controle de velocidade stand-by.....	70
7	RESULTADOS ESPERADOS.....	71
8	CONCLUSÃO.....	73
9	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	74

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Motor de indução com rotor gaiola de esquilo.	9
Figura 2 Motor de indução com rotor bobinado.	9
Figura 3 Estator de um motor de indução.	10
Figura 4 Rotor gaiola de esquilo.	10
Figura 5 Rotor bobinado.	10
Figura 6 Modelo do motor de indução em regime permanente.	12
Figura 7 Circuito equivalente por fase de um motor de indução.	13
Figura 8 Estrutura geral de partidas de motores.	15
Figura 9 Curva característica de partida de motores.	16
Figura 10 Diagrama de força e controle de uma partida direta.	19
Figura 11 Curva característica partida estrela-triângulo	22
Figura 12 Ligação do motor em estrela.	23
Figura 13 Diagrama do motor em triângulo.	24
Figura 14 Diagrama elétrico de uma partida estrela triangulo.	25
Figura 16 Diagramas de blocos simplificados do soft-starter.	26
Figura 17 Forma de onda de tensão aplicada ao motor na aceleração.	27
Figura 18 Rampa de tensão na aceleração.	27
Figura 19 Curva característica corrente x tempo, detalhe na corrente de partida direta.	28
Figura 20 Módulos do Inversor de Frequência.	30
Figura 21 Simbologia do IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor).	31
Figura 22 Sistema de modulação PWM (Pulse Width Modulation).	31
Figura 23 Onda senoidal à frequência de 30 Hz.	32
Figura 24 Onda senoidal à frequência de 90 Hz.	33
Figura 25 Curva V/f do inversor de frequência com controle escalar	34
Figura 26 Curva T/f evidenciando o enfraquecimento de campo.	34
Figura 27 Fonte de tensão CC alimentando uma carga com resistência R.	37
Figura 28 Fonte de tensão CA alimentando uma carga com impedância $Z = Z \angle \theta$	37
Figura 29 Triângulo de Potência.	38

Figura 30 Carga ligada em Δ equilibrada.....	39
Figura 31 Uma carga ligada em Y equilibrada.....	39
Figura 32 Fluxograma de produção do aço.	44
Figura 33 Exemplo real de laminador de tiras a frio.	45
Figura 34 Configurações de laminação a frio; a) Laminador Duo; b) Laminador Duo reversível; c) Laminador Trio; d) Laminador Quádruo.	46
Figura 35 Partes de um cilindro de laminação.....	46
Figura 36 Supervisório de automação do LER	47
Figura 37 Etapas de processo do LER	48
Figura 38 Layout básico de um Laminador de Encruamento.....	49
Figura 39 a) Rolo medidor de planicidade; b) Resultado gerado e tratado para exibição no supervisório	50
Figura 40 Manifold com bicos injetores de óleo.....	51
Figura 41 Diagrama em bloco de controle de: a) largura e b) velocidade de aplicação de óleo	52
Figura 42 Resposta do controle de fluxo de óleo em relação à velocidade do laminador.....	53
Figura 43 Gráfico do consumo de energia dos motores AC do LER	54
Figura 44 Diagrama de Pareto do LER.....	55
Figura 45 Motor do Sistema Roll Force.	56
Figura 46 Motor do sistema hidráulico central	56
Figura 47 Sistema de exaustor do LER.	57
Figura 48 Analisador de qualidade Power Pad III Modelo 8336	58
Figura 49 Modelo de geração de arquivo em Excel pelo analisador de qualidade.....	58
Figura 50 Corrente de Pico do Exaustor de Névoas.....	59
Figura 51 Diagrama unifilar de alimentação elétrica do LER	60
Figura 52 Consumo de energia do exaustor em sete dias.....	61
Figura 53 Regime de funcionamento do laminador (m/min)	62
Figura 54 Diagrama de estados para transferência de etapas de processo...	63
Figura 55 Dados de placa do exaustor	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 conjugado x velocidade	18
Tabela 2 Fator da letra de código	21
Tabela 3 Comparativo entre modelos de soft-starters.	29
Tabela 4 Parâmetros para saída analógica	52
Tabela 5 Consumo atual de energia do exaustor	61
Tabela 6 Tempo médio por etapa de cada turno (min,%min)	64
Tabela 7 Dados de placa do motor de exaustão	66
Tabela 8 Cálculo do rendimento com dados de placa do motor	66
Tabela 9 Cálculo da potência fornecida à carga	67
Tabela 10 Proposta comercial para inversor G120 e componentes periféricos	68
Tabela 11 Lógica para controle de velocidade do Exaustor.	69
Tabela 12 Percentual de energia com velocidade stand-by	70
Tabela 13 Análise de investimento para o método controle de velocidade ON/OFF (hipótese 1).....	71
Tabela 14 Análise de investimento para o método controle de velocidade stand-by (hipótese 2).....	71
Tabela 15 Retorno para cada investimento	72

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 Utilização de sistemas por setor.....	5
Gráfico 2 Demanda ativa (KW) no intervalo de um dia.....	7
Gráfico 3 Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga ..	17

LISTA DE SIGLAS

CA - Corrente alternada
CC - Corrente contínua
CCM – Central de Controle de Motores
CLP – Controlador Lógico Programável
FT - Relé térmico
ID - Corrente de magnetização
IGBT - Insulated Gate Bipolar Transistor
IP - Corrente de pico
IQ - Corrente produtora de TORQUE
MIT - Motor de indução trifásico
MME - ministério de Minas e Energia
PWM - Pulse Width Modulation
RPM - Rotações Por Minuto
TIR – Taxa Interna de Retorno
TMA – Taxa Mínima de Atratividade
VPL – Valor Presente Líquido
LER – Laminador de Encruamento Reversível.

1 INTRODUÇÃO

Eficiência energética tem sido o termo dos últimos tempos nos setores industriais e residenciais. Quando o assunto é eficiência, esta deve estar ligada diretamente a rendimento, ou seja, aquilo que se é pago, deve ser utilizado em sua plenitude.

Cada valor gasto a mais com energia ou utilidades deve ser impresso no produto e proporcionalmente elevar o seu valor no mercado, perdendo concorrência com as demais empresas do ramo.

Os principais pilares de qualquer setor do país são os cortes de custos e a melhor utilização dos recursos disponíveis. A substituição de motores elétricos precários é um assunto de grande importância e é incentivada pela Aneel – Agência Nacional de Energia Elétrica; que atenta para o alto número de motores ainda em operação no Brasil e que não atendem aos requisitos mínimos de eficiência energética.

1.1 Justificativa

Diante do cenário atual foi analisado um setor industrial e notado a possibilidade de se gerar ganhos financeiros, tecnológicos e extensão de vida útil para um sistema de exaustão de nevoas de óleo de um laminador de bobinas. Os ganhos que serão descritos no decorrer desse trabalho, vão desde redução no consumo de energia elétrica ao aumento da vida útil do equipamento.

Serão avaliados os tempos de processo de uma bobina para então ser projetado o controle do novo equipamento bem como métodos de cálculos financeiros para estimarmos os ganhos e pay-back.

1.2 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica-econômica para o aumento da eficiência energética em um sistema de exaustão de um laminador de encruamento.

Apresentar os princípios básicos do sistema de encruamento, dos motores de indução trifásicos, do controle de velocidade, a análise do sistema de partida atual e os principais desafios encontrados durante a realização deste estudo.

1.2.1 Objetivo Específico

Analisar a viabilidade técnica-econômica para a substituição do sistema de partida de um motor de 250cv responsável pela exaustão de névoas de óleo de um laminador de encruamento visando à redução do consumo de energia e aumento de vida útil do equipamento.

1.3 Metodologia

Observar a rotina de funcionamento do exaustor de névoa de óleo aplicada diretamente na bobina durante processo de laminação, determinar as principais oportunidades de melhoria no funcionamento do exaustor, atualmente contínuo. Posteriormente serão analisando todos os dados de tempo médio de processo onde realmente é necessário o funcionamento do sistema, a partir daí será analisado a viabilidade da implementação do sistema que fará o controle de velocidade e partida do exaustor.

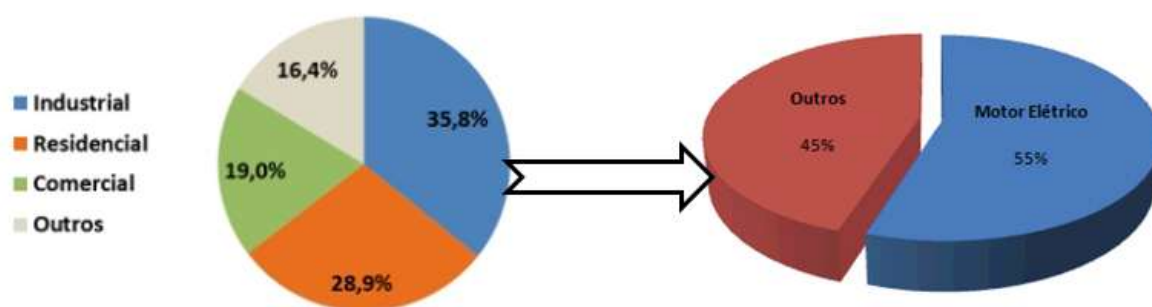
2 EMBASAMENTO TEÓRICO

2.1 Eficiência energética

A Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), foi criada para regular o setor elétrico brasileiro iniciando suas atividades em dezembro de 1997, tendo como principais atribuições regular, fiscalizar e implementar as políticas e diretrizes do governo federal, estabelecer medidas tarifárias e promover as atividades e autorizações de empreendimentos e serviços de energia elétrica, por delegação do Governo Federal.

O consumo de energia elétrica deve-se, principalmente, à utilização contínua dos sistemas de iluminação, climatização dos ambientes e força motriz (indústrias e setor agrícola), conforme representado no gráfico 1.

Gráfico 1 Utilização de sistemas por setor.



Fonte: EPE (2018), adaptado pelos autores.

Com uso eficiente de energia elétrica, a indústria terá uma melhor utilização de energia elétrica em instalações e equipamentos, além de uma redução no consumo de energia, o que gera economia nas despesas com eletricidade. Este melhor aproveitamento acarreta em aumento de produtividade e qualidade no produto final, esta economia da indústria também produzirá redução nos investimentos com a construção de usinas e redes elétricas, reduzindo assim o custo da eletricidade, dos preços dos produtos e serviços, com uma maior

confiabilidade no fornecimento de energia. A redução no consumo de energia afeta toda a cadeia produtiva, abrangendo os consumidores finais que sentirão o reflexo favorável no preço do produto final (Copel, 2005).

2.2 Demanda (kW)

Média das potências elétricas ativas ou reativas, solicitadas ao sistema elétrico pela parcela da carga instalada em operação na unidade consumidora, durante um intervalo de tempo especificado (Copel, 2005).

a) Demanda contratada:

Demanda de potência ativa a ser obrigatória e continuamente disponibilizada pela concessionária, no ponto de entrega, conforme valor e período de vigência fixados no contrato de fornecimento e que deverá ser integralmente paga, seja ou não utilizada durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW)

b) Demanda de ultrapassagem:

Parcela da demanda medida que excede o valor da demanda contratada, expressa em quilowatts (kW), sendo passível de multa

c) Demanda faturável:

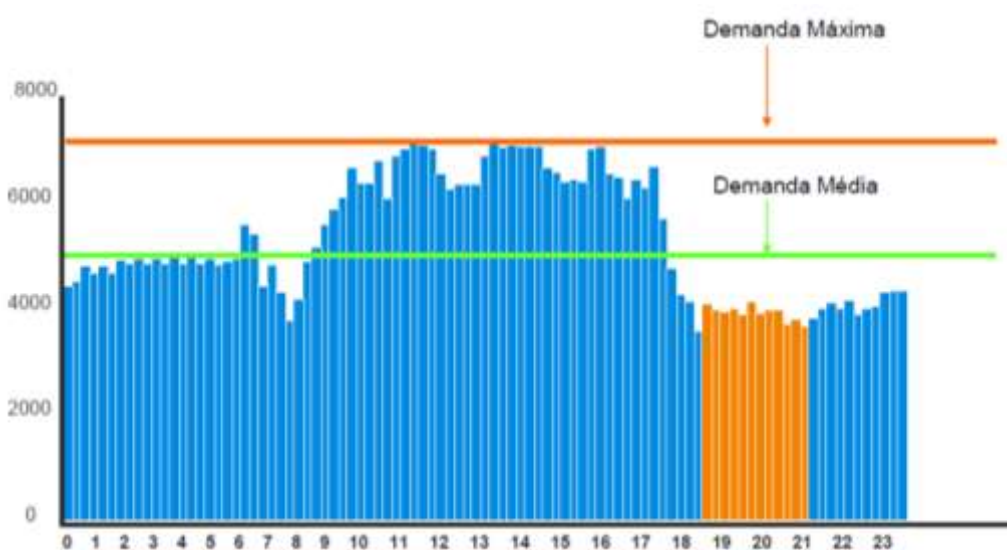
Valor da demanda de potência ativa, identificado de acordo com os critérios estabelecidos e considerado para fins de faturamento, com aplicação da respectiva tarifa, expressa em quilowatts (kW).

d) Demanda medida:

Maior demanda de potência ativa, verificada por medição, integralizada no intervalo de 15 (quinze) minutos durante o período de faturamento, expressa em quilowatts (kW).

Conforme exemplificado no gráfico 2, a análise histórica do consumo da instalação nos guia quanto ao valor de demanda devemos contratar, com o foco de reduzir o valor contratado evitando desperdícios.

Gráfico 2 Demanda ativa (KW) no intervalo de um dia.



Fonte: Copel (2005)

2.3 Grupos Tarifários

(ANEEL, 2016) Para o faturamento da energia elétrica, existem dois grupos tarifários:

- **Grupo “A”**

Grupamento de unidades consumidoras com fornecimento em tensão igual ou superior a 2.300 V, ou, ainda, atendidas em tensão inferior a 2.300 V a partir de sistema subterrâneo de distribuição, caracterizado pela estruturação tarifária binômia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo A1 - tensão de fornecimento igual ou superior a 230.000 V;
- b) Subgrupo A2 - tensão de fornecimento de 88.000 V a 138.000 V;

- c) Subgrupo A3 - tensão de fornecimento de 69.000 V;
- d) Subgrupo A3a - tensão de fornecimento de 30.000 V a 44.000 V;
- e) Subgrupo A4 - tensão de fornecimento de 2.300 V a 25.000 V;
- f) Subgrupo AS - tensão de fornecimento inferior a 2.300 V, atendidas a partir de sistema subterrâneo de distribuição e faturadas neste Grupo em caráter opcional.

- **Grupo “B”**

Grupamento composto de unidades consumidoras com fornecimento em tensão inferior a 2.300 V, ou, ainda, atendidas em tensão superior a 2.300 V, caracterizado pela estruturação tarifária monômnia e subdividido nos seguintes subgrupos:

- a) Subgrupo B1 - residencial;
- b) Subgrupo B1 - residencial baixa renda;
- c) Subgrupo B2 - rural;
- d) Subgrupo B2 - cooperativa de eletrificação rural;
- e) Subgrupo B2 - serviço público de irrigação;
- f) Subgrupo B3 - demais classes;
- g) Subgrupo B4 - iluminação pública.

2.4 Motores

2.4.1 MIT

Segundo a Universidade Federal de Goiás (UFG, 2016) o setor industrial é responsável por 39% do consumo de energia elétrica no Brasil apontando ser o oitavo maior consumidor de energia elétrica no mundo. Os motores elétricos são responsáveis por grande parte do consumo de eletricidade porque são utilizados nos mais variados processos industriais como principal fonte de força motriz.



Figura 1 Motor de indução com rotor gaiola de esquilo.

Fonte: Chapman (2013)

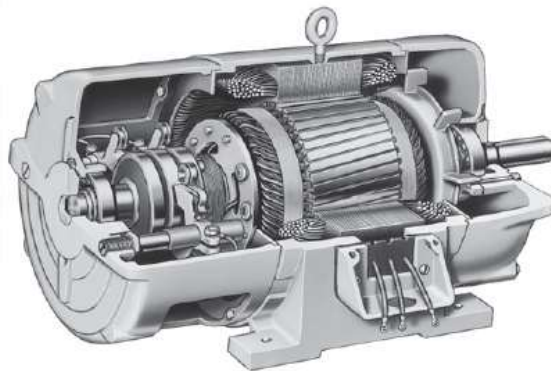


Figura 2 Motor de indução com rotor bobinado.

Fonte: Chapman (2013)

Os motores de indução são compostos por duas partes principais: rotor e estator, conforme ilustrado nas figuras 1 e 2. O estator de um motor de indução trifásica está representado pela figura 3 e é idêntico ao de uma máquina síncrona, com uma construção de rotor diferente. No estator estão distribuídos os enrolamentos de armadura de maneira uniforme, simétricos e defasados de 120° (Chapman, 2013).



Figura 3 Estator de um motor de indução.
Fonte: website: <http://www.sotofilhos.com.br/index.html>

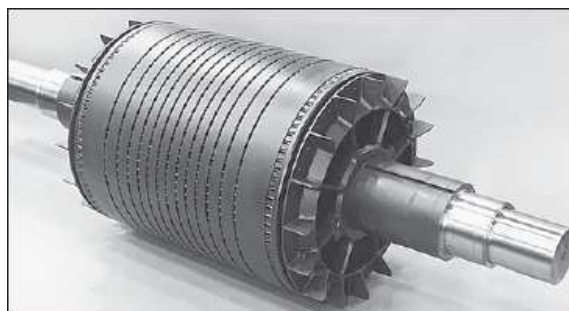


Figura 4 Rotor gaiola de esquilo.
Fonte: Chapman (2013, p. 308).



Figura 5 Rotor bobinado.
Fonte: Chapman (2013, p. 310).

A figura 4 mostra um rotor do tipo gaiola de esquilo, esse rotor equivale a uma série de barras condutoras que estão embutidas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades. Já a figura 5 mostra um

rotor bobinado que possuem um conjunto de enrolamentos trifásicos que são parecidos com os enrolamentos do estator. As três fases dos enrolamentos do rotor são usualmente ligadas em Y e possuem seus três terminais conectados aos anéis deslizantes localizados no eixo do rotor. As escovas se apoiam nos anéis deslizantes e colocam os enrolamentos do rotor em curto-circuito (Chapman, 2013).

Os motores de indução com rotor do tipo bobinado raramente são usados, pois possuem um custo mais elevado comparados aos motores de indução de gaiola de esquilos e exigem mais manutenção devido ao desgaste das escovas e anéis deslizantes.

3.2.1 Modelo em regime permanente

Uma fonte de tensão senoidal trifásica e equilibrada é então injetada nos enrolamentos do estator de um MIT, isso faz com que surjam correntes elétricas com as mesmas características nesses enrolamentos, produzindo então um campo magnético girante B_s , que possui o sentido anti-horário de rotação (Chapman, 2013).

O campo B_s gira a velocidade síncrona n_s , em RPM, dada pela equação:

$$n_s = \frac{120 f_e}{p} \quad (2.1)$$

em que f_e é a frequência da fonte de tensão trifásica e p é o número de polos da máquina.

No entanto, a velocidade síncrona é superior à velocidade do rotor e essa desigualdade entre as velocidades é definida como sendo o escorregamento do rotor. Segundo (Chapman, 2013) o escorregamento s é apresentado como uma fração da velocidade síncrona e pode ser definido pela equação (2.2), onde n_r equivale à velocidade do rotor em RPM.

$$s = \frac{n_s - n_r}{n_s} \quad (2.2)$$

Pode-se estabelecer a velocidade do rotor em função da frequência elétrica e do escorregamento de uma fonte CA através da relação das equações (2.1) e (2.2).

$$n_r = (1 - s) \frac{120 f_e}{p} \quad (2.3)$$

Como a tensão induzida nas barras do rotor surge devido ao movimento relativo do rotor em relação ao campo do estator, a frequência f_r da tensão induzida está diretamente relacionada com o escorregamento e com a frequência f_e aplicada ao estator conforme a equação 2.4 (Chapman, 2013).

$$f_r = s \cdot f_e \quad (2.4)$$

Portanto, o escorregamento será $s = 0$ se o rotor girar na velocidade síncrona e não haverá movimento ocasional entre o campo do estator e o rotor, isso faz com que não haja tensão induzida nas barras do rotor.

Utilizando as considerações anteriores, o MIT pode ser aproximado por um modelo equivalente por fase em regime permanente conforme mostrado na Figura 6.

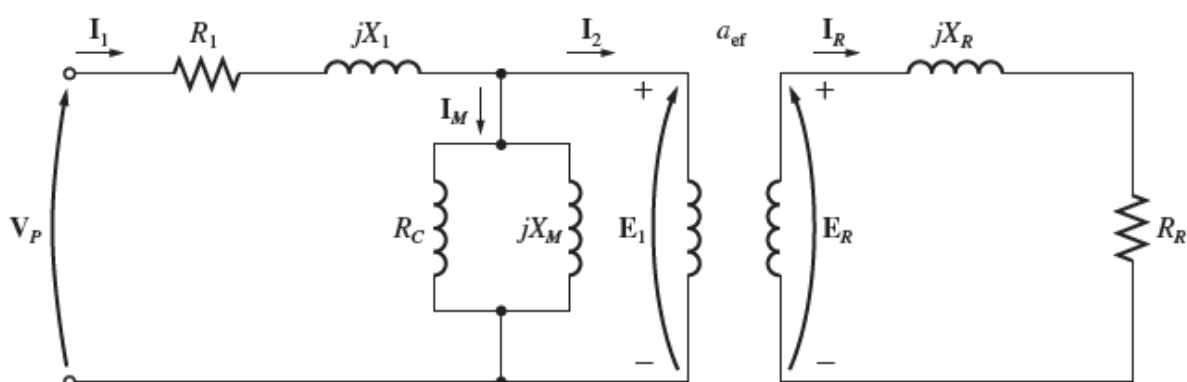


Figura 6 Modelo do motor de indução em regime permanente.

Fonte: Chapman (2013, p. 316).

As componentes do rotor podem ser mencionadas ao estator, de uma forma similar ao processo feito em transformadores conforme ilustrado na figura 7.

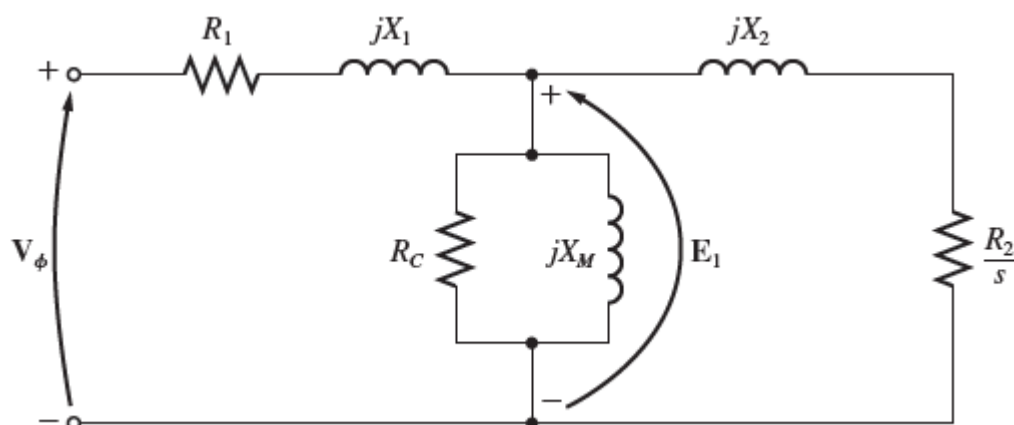


Figura 7 Circuito equivalente por fase de um motor de indução.

Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

ONDE:

V_ϕ = Tensão de fase do estator;

R_1 = Resistência do estator;

X_1 = Reatância de dispersão do estator;

R_c = Resistência de perdas no núcleo;

X_m = Reatância de magnetização;

R_2 = Resistência do rotor Referida ao estator;

X_2 = Reatância de dispersão do rotor referida ao estator;

E_1 = Tensão induzida no rotor referida ao estator.

3.2.2 Seleção e aplicação dos motores elétricos assíncronos trifásicos de alta tensão

De acordo com (WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2015) para correta especificação do motor, são necessárias as seguintes informações na consulta:

- Características da rede de alimentação:
 - Tensão de alimentação do motor e dos aquecedores internos, quando necessários;
- Frequência nominal em Hz;
- Método de partida (quando esta informação não for fornecida, será considerada a partida direta);
- Características do ambiente:

- Altitude;
- Temperatura ambiente;
- Atmosfera do ambiente.
- Características construtivas:
 - Forma construtiva;
 - Potência em kW e velocidade em rpm;
 - Fator de serviço;
 - Sentido de rotação (horário, anti-horário ou ambos, olhando para ponta de eixo principal).
- Características da carga:
 - Momento de inércia da máquina acionada e a que rotação está referida (ao eixo do motor ou da carga);
 - Curva de conjugado resistente da carga;
 - Dados de transmissão (acoplamento);
 - Cargas axiais e seu sentido, quando existentes;
 - Cargas radiais e seu sentido quando existentes;
 - Regime de funcionamento da carga (número de partidas/horas).

Em resumo, a correta seleção do motor implica que o mesmo satisfaça às exigências requeridas pela aplicação específica. Sob este aspecto o motor deve, basicamente, ser capaz de acelerar a carga com tempo suficientemente curto para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes e demais componentes.

2.5 Partidas de motores

Profissionais da área elétrica normalmente se deparam com esse tema, seja no setor industrial quanto residencial, como exemplo uma bomba de poço.

O ponto chave que deverá estar bem embasado se trata da forma pela qual será fornecida a energia elétrica ao motor, saber detalhes como alimentação da rede e do equipamento, qual carga o motor suporta, qual a proteção adequada etc.

Saber especificar e projetar a forma de partida, garante a maior vida útil ao sistema e evita oscilações no circuito.

Na figura 8 é demonstrada a estrutura geral de partida de motores, no qual ambos necessitam de dispositivos de seccionamento e proteção contra curto circuito.

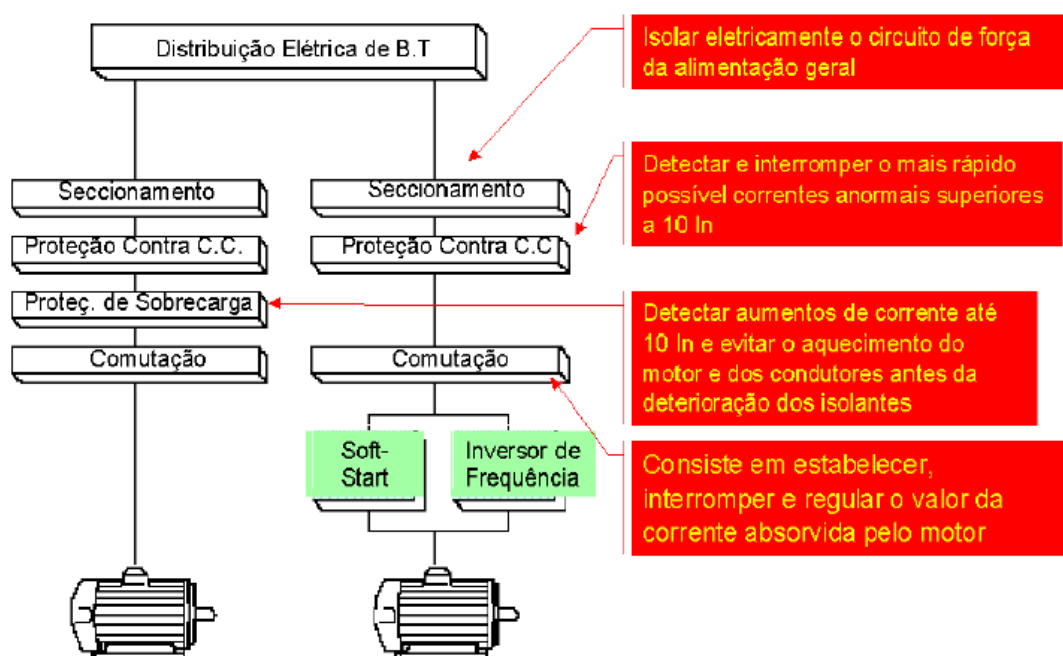


Figura 8 Estrutura geral de partidas de motores.

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

O momento de partida é o mais crítico, onde o motor requer correntes de seis a oito vezes a corrente nominal de trabalho, chamado de corrente de pico (IP). O tempo e a amplitude da corrente estão ligados diretamente à forma de partida desse motor.

A figura 9 demonstra a condição da corrente nos métodos mais comuns de partida.



Figura 9 Curva característica de partida de motores.

Fonte:(Eng. Fabio Fuentes, 2018).

Os motores de indução possuem um valor de corrente de partida elevado e devido ao tempo necessário para aceleração de cargas de alta inércia resultam no aumento rápido da temperatura do motor.

É estabelecido pela norma NBR 7094 um regime de partida com um valor mínimo capazes de serem realizados pelos motores. Nesse regime são realizados testes nos motores. O primeiro teste simula o caso em a partida do motor malsucedida, como por exemplo pelo desligamento da proteção, e logo em seguida permitindo uma segunda tentativa. O Segundo teste simula o caso de um desligamento acidental do motor em condições normais de funcionamento, por exemplo, pela ausência de energia na rede, que ao ser reestabelecida permite a recuperação do funcionamento.

2.5.1 Conjugado de partida

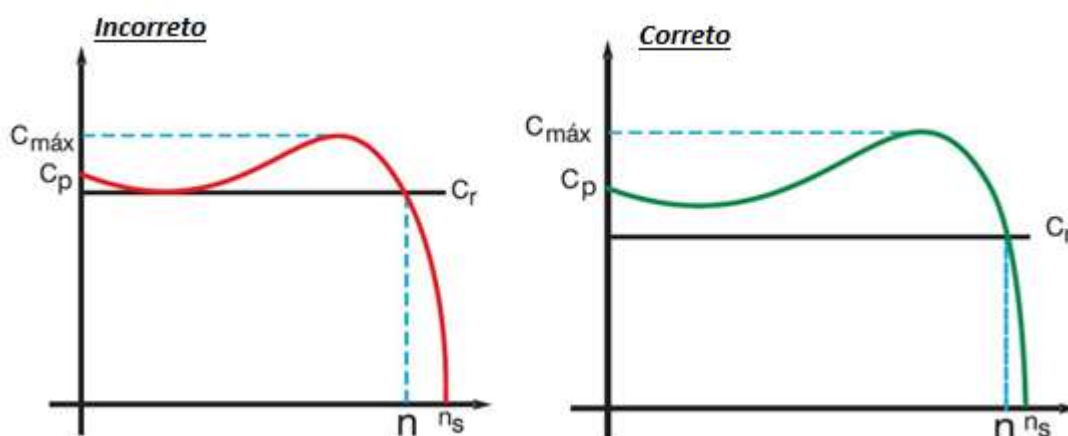
Todos os sistemas de partida com tensão reduzida possuem a desvantagem de que o conjugado de partida é reduzido na proporção do quadrado da redução da tensão fornecido ao motor.

Conforme Franchi (2008) a força necessária para romper a inércia da máquina e gerar movimento.

O conjugado do motor será sempre superior ao conjugado da carga para que essa carga atinja a sua velocidade nominal, podendo se comportar de forma constante ou variável.

Conforme apresentado no gráfico 3 a curva de conjugado motor e carga em relação à rotação do sistema, observa-se que o conjugado do motor está à cima do conjugado da carga até que os dois se cruzam, ponto em que o sistema atinge a velocidade nominal.

Gráfico 3 Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga



Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015), adaptado pelos Autores.

ONDE:

$C_{m\acute{a}x}$ = conjugado máximo;

C_p = conjugado de partida;

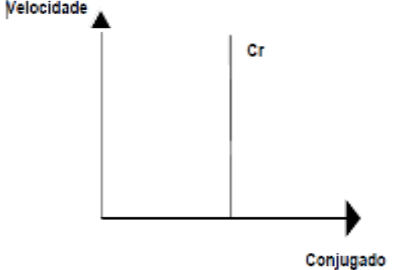
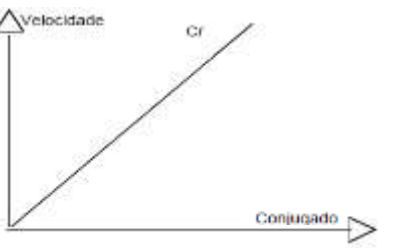
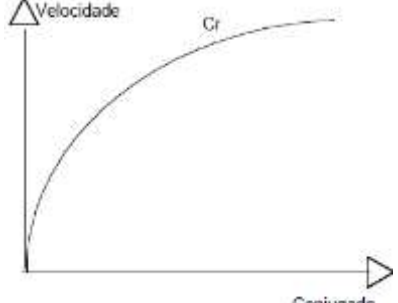
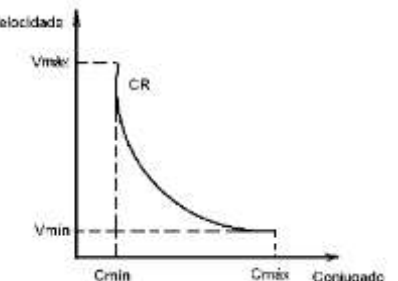
C_r = conjugado resistente;

n_s = rotação síncrona;

n = rotação nominal.

Na tabela 1 são apresentadas as curvas de conjugado x velocidade existentes.

Tabela 1 conjugado x velocidade

 <p>Um gráfico com o eixo vertical rotulado 'Velocidade' e o eixo horizontal rotulado 'Conjugado'. Uma linha vertical, rotulada 'Cr', se estende do eixo horizontal para cima, indicando que o torque é constante independentemente da velocidade.</p>	<p>A potência é proporcional à velocidade</p> $P = Cr \cdot \omega, P = k \cdot \omega$ $Cr = \text{constante}$ <p>Ex: Transportadores, pontes rolantes.</p>
 <p>Um gráfico com o eixo vertical rotulado 'Velocidade' e o eixo horizontal rotulado 'Conjugado'. Uma linha diagonal, rotulada 'Cr', parte da origem e se estende para cima e para a direita, indicando que o torque é diretamente proporcional à velocidade.</p>	<p>A potência varia como o quadrado da velocidade</p> $P = Cr \cdot \omega, Cr = k \cdot \omega, \text{ portanto,}$ $P = k \cdot \omega^2$ <p>Ex: Sistema de acoplamento hidráulico ou eletromagnético.</p>
 <p>Um gráfico com o eixo vertical rotulado 'Velocidade' e o eixo horizontal rotulado 'Conjugado'. Uma curva, rotulada 'Cr', parte da origem e se curva para cima, mas sua inclinação diminui à medida que a velocidade aumenta, indicando que o torque varia com o cubo da velocidade.</p>	<p>A potência varia com o cubo da velocidade</p> $P = Cr \cdot \omega, Cr = k \cdot \omega^2, \text{ portanto,}$ $P = k \cdot \omega^3$ <p>Ex: Ventiladores, bombas centrifugas.</p>
 <p>Um gráfico com o eixo vertical rotulado 'Velocidade' e o eixo horizontal rotulado 'Conjugado'. Uma curva, rotulada 'CR', parte de um ponto no eixo vertical rotulado 'Vmax' e se curva para a direita, aproximando-se do eixo horizontal. Pontos 'Crmin' e 'Crmax' são marcados no eixo horizontal, e 'Vmin' no eixo vertical, indicando que o torque é inversamente proporcional à velocidade.</p>	<p>A potência é constante</p> $P = Cr \cdot \omega, Cr = k/\omega, \text{ portanto,}$ $P = k$ <p>Ex: Broca de máquinas, bobinador.</p>

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

2.5.2 Partida direta

A partida direta é a forma mais simples de se partir um motor, no qual suas fases são ligadas à fonte de alimentação por meio de um dispositivo de acionamento. Indicado para motores de baixa potência tal qual não causem perturbações no circuito e cargas que não necessitam de partidas progressivas.

Soma vantagens como baixo custo de instalação, quando dimensionado corretamente, ocupa pouco espaço e praticidade na instalação. Porém cuidados como corrente de pico, queda de tensão e correto dimensionamento dos componentes devem ser levados em conta por segurança da instalação.

No diagrama de força e controle mostrado na figura 10, sinaliza que as fases L1, L2 e L3 são protegidas por fusíveis, os elementos mais tradicionais para proteção contra curto-circuito de sistemas elétricos, posteriormente o dispositivo de comutação ou seccionamento

O contator K1 tem o papel de interromper ou permitir a energização do motor através de seus contatos de potência quando energizado sua bobina eletromagnética. Embora protegido pelo fusível, este também deve ser calculado e dimensionado corretamente por conta de sua capacidade de fluxo de corrente.

Acoplado ao contator existe o relé térmico FT1, provido de material que se deforma com a variação de temperatura provocado pelo fluxo de corrente no circuito. Quando acima da corrente nominal, ou seja, aumento na carga, o dispositivo interrompe o circuito de controle, desenergizando a bobina do contator e desligando o circuito de potência, sinalizando falha no sistema.

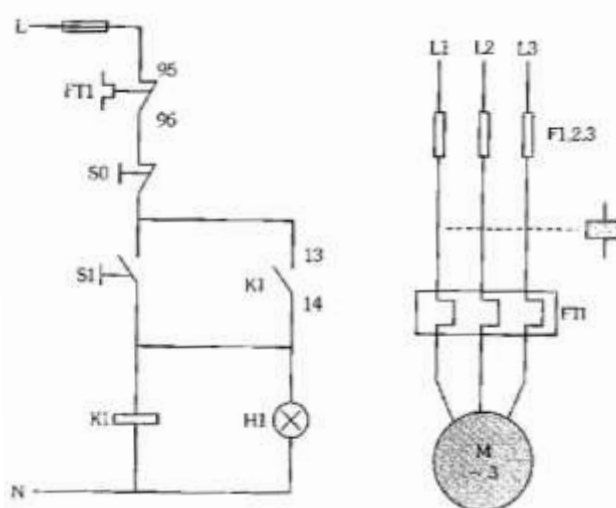


Figura 10 Diagrama de força e controle de uma partida direta.

Fonte - Franchi (2008, p. 156).

Como dito anteriormente o correto dimensionamento de um sistema de partida de motores tem como suas principais vantagens, a garantia de um sistema saudável, econômico e confiável.

Saudável porque dependendo do sistema, se o acionamento for intermitente, ou seja, vários acionamentos no decorrer do dia, os componentes como contatores, cabos e até o próprio motor se degradarão facilmente aumentando o risco de incêndio, comprometendo toda a instalação. Econômico por conta do dimensionamento correto dos componentes, sem superdimensionar contatores, cabos e proteções de forma que eleve seu custo. Quando dimensionado corretamente o dispositivo térmico, FT1, a elevação de carga prejudicial ao motor será limitada, indicando problema no circuito. Levando assim o usuário buscar o motivo de tal defeito ou condição.

2.5.3 Partida Estrela triângulo

Partida direta é a forma mais prática de transformar energia elétrica em energia mecânica, uma das mais brilhantes descobertas do homem. No entanto, conforme dito anteriormente não basta só energizar qualquer motor, é preciso que as condições sejam levantadas e levadas em consideração. Nesta seção iremos discorrer sobre a partida “Estrela-Triângulo” no qual tem como sua principal vantagem, a redução da corrente de partida.

Segundo Chapman (2013) em motores de indução de gaiola de esquilo, a corrente de partida pode variar amplamente dependendo primariamente da potência nominal do motor e da resistência efetiva do rotor nas condições de partida. Para estimar a corrente do rotor nas condições de partida, todos os motores de gaiola têm agora uma *letra de código* de partida (não confundir com a letra da sua *classe de projeto*) nas suas placas de identificação. A letra de código especifica limites para a quantidade de corrente que o motor pode consumir na partida.

Esses limites são expressos em termos da potência aparente de partida do motor em função da sua especificação nominal de potência (HP).

Para determinar a corrente de partida de um motor de indução, leia a tensão nominal, a potência (HP) e a letra de código de sua placa. Então, a potência aparente do motor será pela equação

$$S_{partida} = Pot. nominal (HP) \times Fator da letra de código \quad (2.7)$$

e a corrente de partida será dada pela equação 2.8.

$$I_{partida} = \frac{S_{partida}}{\sqrt{3}V_T} \quad (2.8)$$

Os valores correspondentes a essas letras do código de partida são mostradas na tabela 2. Pela norma NBR 17094, indica-se diretamente o valor de IP/In, que é a relação entre a corrente de rotor bloqueado e a corrente nominal.

Tabela 2 Fator da letra de código

Código	kVA / cv	Código	kVA / cv
A	0 - 3,14	L	9,0 - 9,99
B	3,15 - 3,54	M	10,0 - 11,09
C	3,55 - 3,99	N	11,2 - 12,49
D	4,0 - 4,49	P	12,5 - 13,99
E	4,5 - 4,99	R	14,0 - 15,99
F	5,0 - 5,59	S	16,0 - 17,99
G	5,6 - 6,29	T	18,0 - 19,09
H	6,3 - 7,09	U	20,0 - 22,09
J	7,1 - 7,99	V	22,4 ou mais
K	8,0 - 8,99		

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

Sempre que possível é recomendado utilizar a partida direta com o intuito de utilizar ao máximo o conjugado de partida.

Acelerar a carga com tempo suficientemente curto para que o aquecimento não venha a danificar as características físicas dos materiais isolantes e demais componentes. (WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2015).

Quando necessário, a corrente de partida de um motor de indução deverá ser reduzida por meio de um circuito de partida. Entretanto, caso isso seja feito, o conjugado de partida do motor também será reduzido conforme o gráfico 5.

Uma maneira de se reduzir a corrente de partida é trocar a ligação normal em Δ do motor por uma ligação em Y durante o processo de partida, daí o nome característico.

Conforme identificado na figura 11, a tensão de fase no enrolamento diminuirá de V_L para $V_L/\sqrt{3}$ reduzindo a corrente máxima de partida pelo mesmo fator. Quando o motor acelera até próximo da velocidade plena, os enrolamentos do estator podem ser abertos e religados em uma configuração Δ .

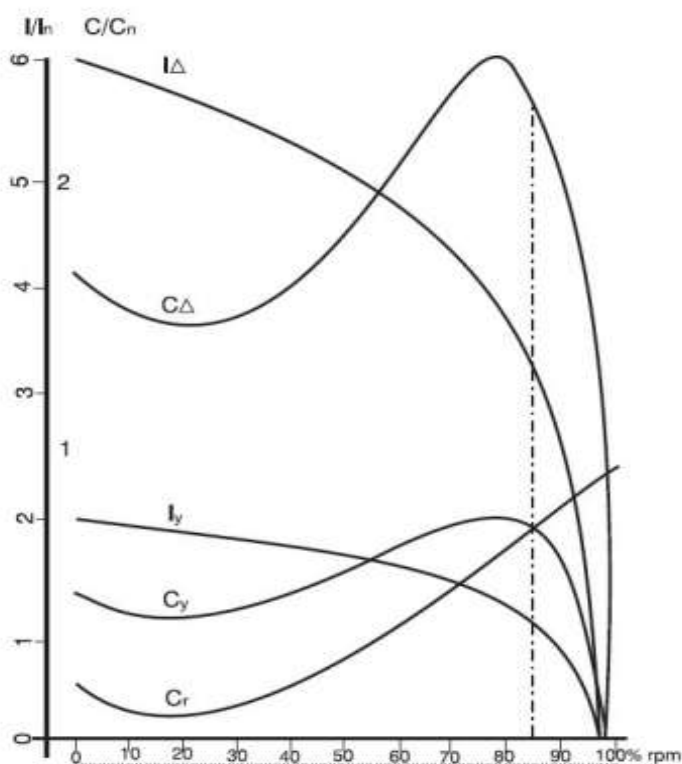


Figura 11 Curva característica partida estrela-triângulo.

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

Sendo:

I_{Δ} = corrente na ligação delta;

C_{Δ} = conjugado na ligação delta;

I_Y = corrente na ligação estrela;

CY = conjugado na ligação estrela;

C_r = conjugado resistente;

n = rotação síncrona;

n_c = tempo ou rotação em que deverá ocorrer a comutação Y/ Δ .

De acordo com Franchi (2008) para ser calculado a corrente IK_3 no contator K3, devemos considerar a ligação em estrela, pois ele somente entra em funcionamento na partida do motor quando exige-se a ligação estrela. A figura 12 mostra o diagrama de força da ligação estrela com suas respectivas correntes.

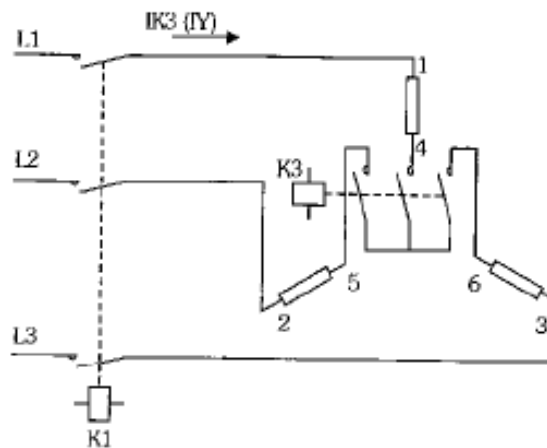


Figura 12 Ligação do motor em estrela.

Fonte: Franchi (2008).

Desta forma, temos a corrente em estrela dada pela tensão dividida pela impedância resultando em:

$$I_y = I_n/3 = 0,33xI_n \quad (2.9)$$

Ou seja:

$$IK_3 = 0,33xI_n \quad (2.10)$$

A figura 13 representa a ligação do motor em triângulo ou delta.

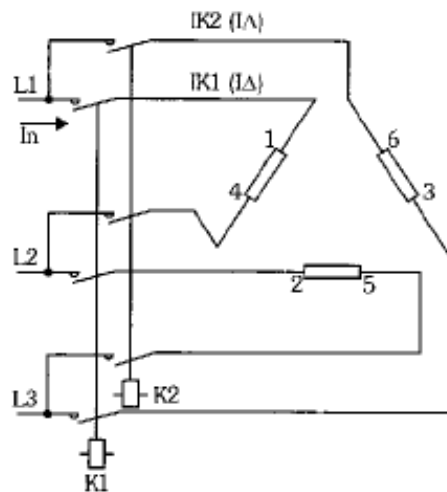


Figura 13 Diagrama do motor em triângulo.

Fonte: Franchi (2008).

Para o dimensionamento de K1 e K2, devemos analisar as correntes que circulam pelos respectivos contatores.

Inicia-se a análise considerando:

$$I_L = I_n \quad (2.11)$$

Pelo fato de o circuito estar ligado em Δ , a corrente por fase será:

$$I_{\Delta} = I_L / \sqrt{3} \quad (2.12)$$

Portanto:

$$I_{\Delta} = I_L / \sqrt{3} = I_{K1} = I_{K2} = 0,58 \times I_n \quad (2.13)$$

Basicamente para uma partida estrela triângulo o motor deve ter a possibilidade de ligação em dupla tensão, como exemplo 220/440, em 380/660, 3800/6600V etc. e os motores deverão ter no mínimo seis bornes de ligação (WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2015).

Conforme dito anteriormente, na ligação estrela o conjugado fica reduzido para 25 a 33% do conjugado de partida e a corrente de partida para 33% do valor em da ligação triângulo. Por este motivo, sempre que for necessária uma partida

estrela-triângulo, deverá ser usado um motor com curva de conjugado de partida elevado.

O circuito da figura 14, representa o esquema de partida estrela triângulo, no qual será utilizado para o cálculo dos componentes.

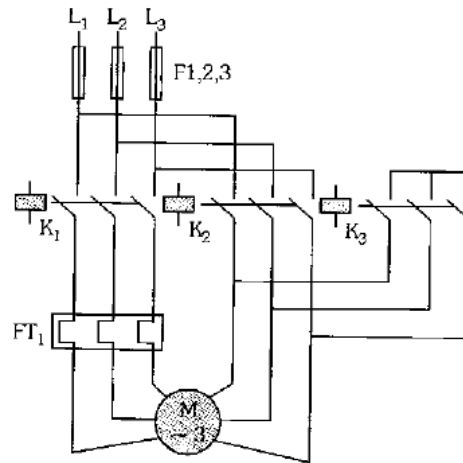


Figura 14 Diagrama elétrico de uma partida estrela triângulo.

Fonte: Franchi (2008).

2.5.4 Soft Starter

As chaves de partida soft-starters são destinadas ao controle de motores de corrente contínua e corrente alternada, controlando a aceleração e desaceleração livres de golpes, além de permitirem adaptação da velocidade do motor às condições de operação (Franchi, 2008).

A partida com soft-starter geralmente é utilizada para minimizar impactos na linha de alimentação e também na carga, pois ajusta-se o equipamento de partida para fornecer corrente limitada da rede e de forma mais suave possível dentro das necessidades de aceleração da carga que o motor está acionando.

O soft starter assegura ao usuário:

- Limitação da corrente de partida;
- Partida suave, por conta do controle da rampa de tensão por meio de tiristores;
- Conjugado na partida;

- Proteção mecânica da máquina tracionada por conta da supressão dos golpes da partida.
- Detecção de desequilíbrio ou falta de fases e de defeitos nos tiristores

2.5.4.1 Princípio de Funcionamento do Soft- Starter

O avanço da eletrônica permitiu a criação da chave de partida a estado sólido a qual consiste de um conjunto de pares de tiristores (SCR, ou combinações de tiristores/diodos), um em cada borne de potência do motor (WEG Equipamentos Elétricos S.A., 2015). O diagrama em blocos demonstrado na figura 16 representa o circuito de controle e potencia do soft-starter.

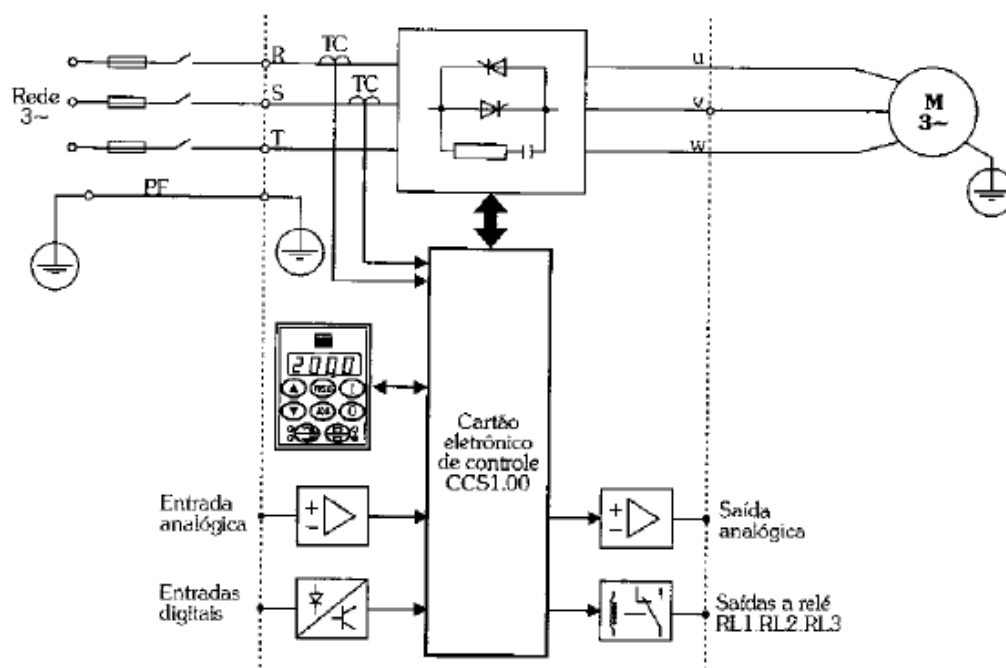


Figura 15 Diagramas de blocos simplificados do soft-starter.

Fonte: Franchi (2008).

É demonstrado na figura 17, o ângulo de disparo de cada par de tiristores sendo controlados eletronicamente para uma tensão variável aos terminais de potência do motor durante a "aceleração". Este comportamento recebe o nome de "partida suave" (Soft starter).

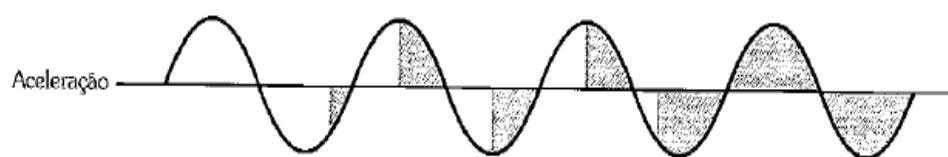


Figura 16 Forma de onda de tensão aplicada ao motor na aceleração.

Fonte: Franchi (2008).

Ao fazer o ajuste da tensão de partida (V_p) e parametrizado um tempo de partida (T_p), a tensão cresce a partir do valor de V_p e dentro do tempo T_p , atinge a tensão de linha do sistema, conforme figura 18. Desta forma, evita-se o circuito ser submetido a incrementos ou "saltos" repentinos, como ocorre com os métodos de partida por autotransformador e ligação estrela-triângulo. Com isso, consegue-se manter a corrente de partida dentro de um limite estipulado e com suave variação, como desejado.

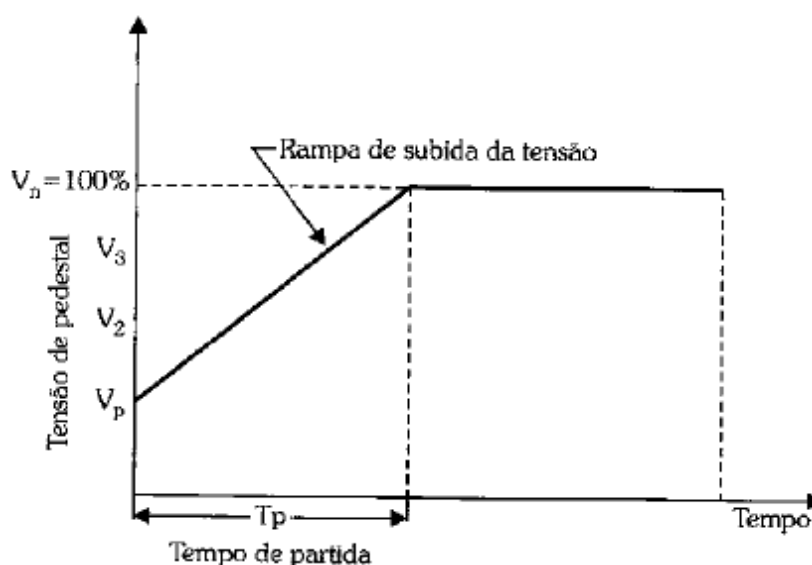


Figura 17 Rampa de tensão na aceleração.

Fonte: Franchi (2008).

Como consequência, temos a seguinte curva Corrente x Tempo representada pela figura 19.

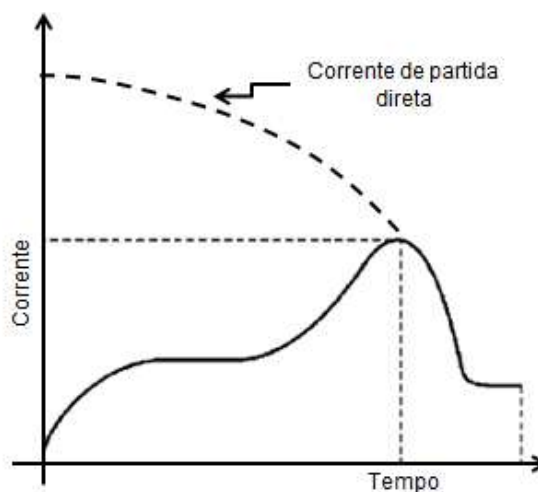


Figura 18 Curva característica corrente x tempo, detalhe na corrente de partida direta.

Fonte: Franchi (2008).

2.5.4.2 Condição para instalação de soft starters

O que determina qual equipamento será usado é basicamente o tipo de função necessária e a função que o componente oferece.

Basicamente, quando o objetivo é o simples acionamento do motor, usamos o soft starter. Quando o objetivo for além da partida, conseguir controlar as ações da ponta do eixo do motor e/ou automatizar o processo deve-se utilizar o inversor de frequência.

Saber como e quando utilizar este tipo de componente é bastante importante, assim como sempre se atentar para aplicar os conhecimentos da forma mais segura possível, evitando assim, possíveis acidentes elétricos.

Na tabela 3 é apresentado um catálogo de soft-starters com quatro modelos, onde observa-se a variação de potência (cv e kW) que cada modelo abrange, bem como alguns dados de parametrização. Com os dados do motor, carga, espaço físico etc. já podemos dimensionar o soft-starter.

Tabela 3 Comparativo entre modelos de soft-starters.

Produto		SSW05	SSW06	SSW07	SSW08	
Tensão de alimentação da potência		220 a 460 V 460 a 575 V (-15% a +10%)	220 a 575 V (-15% a +10%)	220 a 575 V (-15% a +10%)	220 a 575 V 575 a 690 V (-15% a +10%)	
Tipo da rede de alimentação		TT / TN / IT	TT / TN / IT	TT / TN / IT	TT / TN / IT	
Tensão de alimentação da eletrônica e ventilação		110 a 230 V CA (-15% a +10%)	110 a 240 V CA ¹⁾ (-15% a +10%)	110 a 240 V CA ¹⁾ (-15% a +10%)	110 a 230 V CA ²⁾ (-15% a +10%)	
Frequência		50 a 60 Hz (±10%)	50 a 60 Hz (±10%)	50 a 60 Hz (±10%)	50 a 60 Hz (±15%)	
Potência	cv	0,75 a 75 cv	6 a 450 cv	6 a 450 cv	3 a 2.850 cv	
	kW	0,55 a 55 kW	4,5 a 330 kW	4,5 a 330 kW	2,2 a 1.900 kW	
	Corrente	3 a 185 A	17 a 412 A	17 a 412 A	10 a 1.400 A	
Grau de proteção		IP00	IP00 e IP20 ³⁾	IP00 e IP20 ³⁾	IP00 e IP21 ⁴⁾	
Ligação dentro do delta do motor (5 cabos)		Não	Não	Não	Sim	
Tipos de controle	Rampa de tensão	Sim	Sim	Sim	Sim	
	Limitação de corrente	Não	Sim	Sim	Sim	
	Rampa de limitação de corrente	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim	
	Controle de torque 1, 2 e 3 pontos	Não	Não	Não	Sim	
Tempos	Aceleração	1 a 20s	1 a 40s (1 a 999s) ⁶⁾	1 a 40s (1 a 999s) ⁶⁾	1 a 999s	
	Desaceleração	0 a 20s	0 a 40s (0 a 240s) ⁶⁾	0 a 40s (0 a 240s) ⁶⁾	0 a 299s	
Regime de partida	Cargas	Leves	Sim	Sim	Sim	Sim
		Médias	Não	Sim	Sim	Sim
		Pesadas	Não	Não	Sim	Sim
	Número de partidas por hora	4	4 ou 10 ⁷⁾	3 ou 10 ⁸⁾	5 ou 10 ⁸⁾	
Capacidade térmica normal	300% @ 10s	300% @ 20s	300% @ 30s	300% @ 30s ⁹⁾		
Entradas	Digitais	2 (110 a 230 V CA)	3 (110 a 240 V CA)	3 (110 a 240 V CA)	6 (24 V CC)	
	Entrada para PTC	Não	Sim (kit opcional)	Sim (kit opcional)	Sim	
Saídas	Relé	2	2	2	3	
	Analógicas	Não	Não	Não	2	
Funções	Bypass incorporado	Sim	Sim	Sim	Sim (10 A a 820 A)	
	Pulso de torque na partida (kick start)	Não	Sim	Sim	Sim	
	Controle de bombas (pump control)	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim	
	Jog	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim (baixa velocidade)	
	Frenagem CC (com contator)	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim	
	Frenagem ôhmica (sem contator)	Não	Não	Não	Sim	
	Frenagem por troca de sentido de giro	Não	Não	Não	Sim	
	Cópia dos parâmetros	Sim ⁵⁾	Sim ⁵⁾	Sim ⁵⁾	Sim	
	Usuário 1 e usuário 2	Não	Não	Não	Sim	
	Start-up orientado	Não	Não	Não	Sim	
	Histórico de falhas	Não	Sim (4 falhas) ⁶⁾	Sim (4 falhas) ⁶⁾	Sim (6 falhas)	
	Diagnósticos de falhas	Não	Não	Não	Sim	
	Diagnósticos de partida e regime	Não	Não	Não	Sim	
	Troca do sentido de giro	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim	
	Acionamento multímetros	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim (kit opcional)	
	Partida de emergência	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Sim	
	Partida direta (D.O.L.)	Não	Não ⁵⁾	Não ⁵⁾	Não	
	Atribuição das falhas em erros ou alarmes	Não	Não	Não	Sim	
	Expansão de entradas e saídas	Não	Não	Não	Sim (kit opcional)	
	Entradas Pt-100 para o motor	Não	Não	Não	Não (kit opcional)	
SoftPLC (programação em ladder)	Não	Não	Não	Sim		

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

2.5.5 Inversores de frequência

Acionamentos eletrônicos estão em larga escala nas indústrias e nas residências como, por exemplo, os novos ares condicionados do tipo “inverter”. Porém existem algumas informações com relação às aplicações dos acionamentos eletrônicos para motores. Algumas relacionadas aos diferentes tipos de acionamentos disponíveis, outras para cálculos de desempenho de bombas e

ventiladores em diferentes velocidades, bem como conceitos de: aceleração de cargas inerciais e torsionais e vibração lateral. O conhecimento destes assuntos é importante para a avaliação preliminar dos projetos de acionamentos eletrônicos (Américo 2004).

Utilizando um acionamento eletrônico, em muitos casos, dados específicos do motor (reatância de dispersão) são necessários para garantir uma boa comutação das chaves eletrônicas. Alguns modelos mais modernos de acionamento eletrônico já possuem a função de reconhecimento automático desses parâmetros do motor.

2.5.5.1 Estrutura básica do Inversor de frequência

Acionamentos de motores por inversor de frequência funcionam por meio de uma conversão indireta (CA-CC-CA), ou seja, converte a tensão alternada (CA) da rede de alimentação em uma tensão/corrente contínua (CC), conhecido tecnicamente como “Link-DC”, e em seguida, converte essa tensão/corrente contínua novamente em uma tensão/corrente alternada (CA).

O inversor de frequência é constituído basicamente de três unidades principais, como mostrado na figura 20.

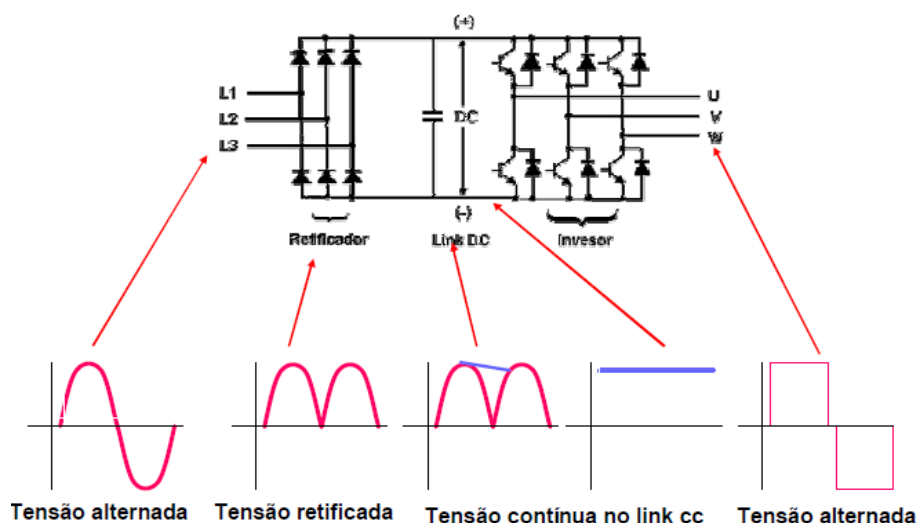


Figura 19 Módulos do Inversor de Frequência.

Fonte: Autores.

Retificador é a unidade que recebe a tensão CA da rede e converte em uma tensão/corrente CC com uma frequência de entrada fixa (60Hz).

Link-DC é a unidade onde a tensão ou a corrente CC é filtrada, ou seja, tem suas oscilações instantâneas minimizadas;

Por fim, o inversor é unidade que converte a tensão/corrente CC em uma tensão/corrente CA, a partir de um circuito secundário de disparo aciona o gate dos IGBT's (Insulated Gate Bipolar Transistor) representado na figura 21, gerando os pulsos PWM.

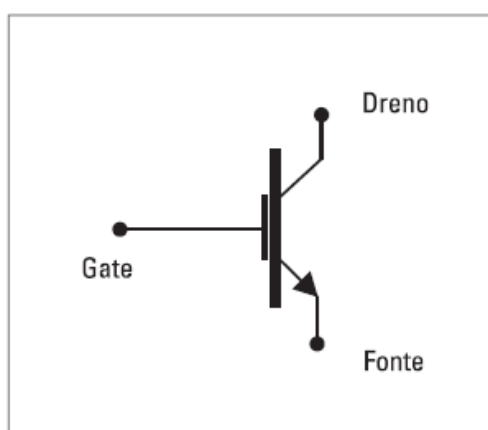


Figura 20 Simbologia do IGBT.

Fonte: AMERICO (2004).

PWM, conforme demonstrado na figura 22, é a técnica usada para gerar sinais analógicos de um dispositivo digital como um Microcontrolador e ela é tão eficiente que hoje em dia quase todos os Microcontroladores modernos possuem hardware dedicado para a geração de sinais PWM.

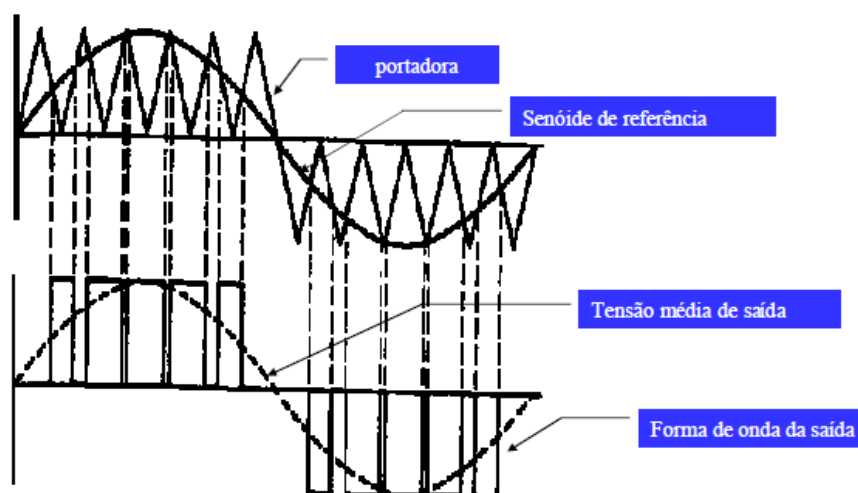


Figura 21 Sistema de modulação PWM (Pulse Width Modulation).

Fonte: WEG Equipamentos Elétricos S.A. (2015).

Conforme citado nos capítulos anteriores, o inversor de frequência trabalha na variação da frequência que será entregue ao motor através da modulação da equação 2.3.

$$n = \frac{120 \times f \times (1 - s)}{p} \quad (2.3)$$

Daremos dois exemplos de controle de velocidade de um motor de quatro polos com escorregamento nominal ($s = 0,0278$) para frequências de 30 e 90 Hz.

Para o primeiro caso faremos:

$$n = \frac{120 \times 30 \times (1 - s)}{4} = 875 \text{ rpm}$$

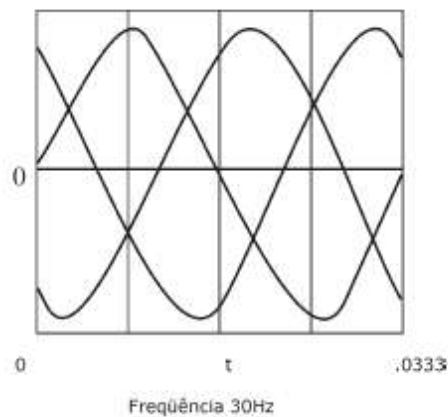


Figura 22 Onda senoidal à frequência de 30 Hz

Fonte: M. Eng. Mascheroni, et al. (2005).

Para uma frequência de 90 Hz teremos a seguinte condição

$$n = \frac{120 \times 90 \times (1 - s)}{4} = 2625 \text{ rpm}$$

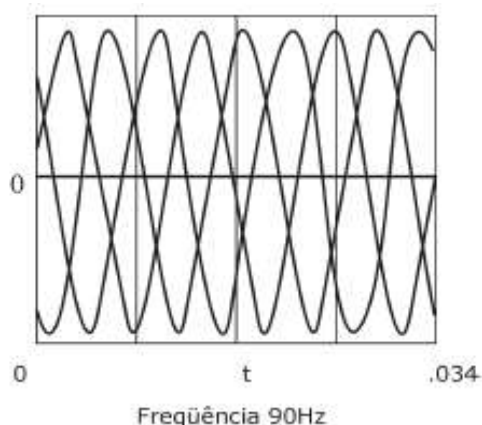


Figura 23 Onda senoidal à frequência de 90 Hz.

Fonte: M. Eng. Mascheroni, et al. (2005).

As figuras 23 e 24 mostram em um mesmo período de tempo exemplos de ondas senoidais trifásicas com valores de frequência de 30 e 90 Hz respectivamente.

2.5.5.2 Métodos de controle

É muito importante conhecer e entender o funcionamento dos sistemas (motor + inversor) para eliminar os possíveis erros de aplicação que poderiam acabar com os benefícios dos inversores (M. Eng. Mascheroni, et al., 2005). Técnicos ou engenheiros envolvidos com a necessidade de variação de velocidade não precisam de conhecimentos sobre o projeto de motores e projeto de sistemas eletrônicos de comando/controle, mas sim sobre o funcionamento e utilização dos mesmos.

Existem dois métodos de controle de inversores de frequência, o controle escalar e vetorial.

2.5.5.3 Controle Escalar

O funcionamento dos inversores de frequência com controle escalar está baseado numa estratégia de comando chamada “V/F constante”, que mantém o torque do motor constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento do motor (Grupo WEG, 2016).

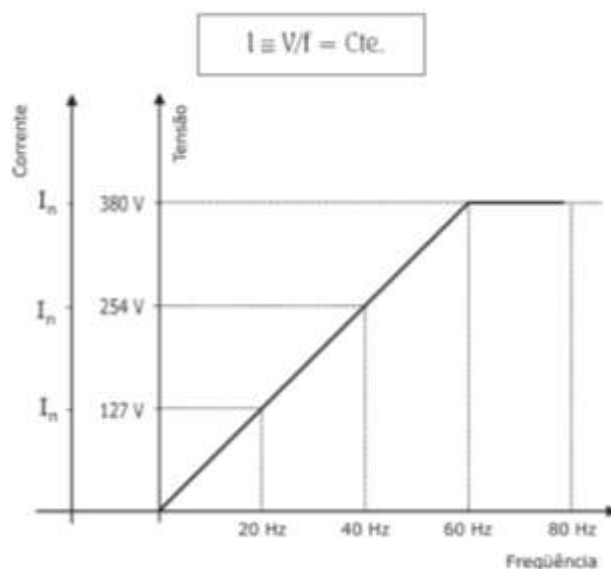


Figura 24 Curva V/f do inversor de frequência com controle escalar

Fonte: M. Eng. Mascheroni, et al. (2005).

Como se pode observar na figura 25, quando ultrapassa 60Hz a tensão não pode continuar subindo, pois já se atingiu a máxima tensão (tensão da rede). Desta forma a partir deste ponto a corrente, e conseqüentemente o torque do motor, diminuirão. Esta região (acima dos 60Hz) é conhecida como região de enfraquecimento de campo, conforme mostrado na figura 26 a seguir, no qual o gráfico do torque em função da frequência, fica a evidência deste comportamento.

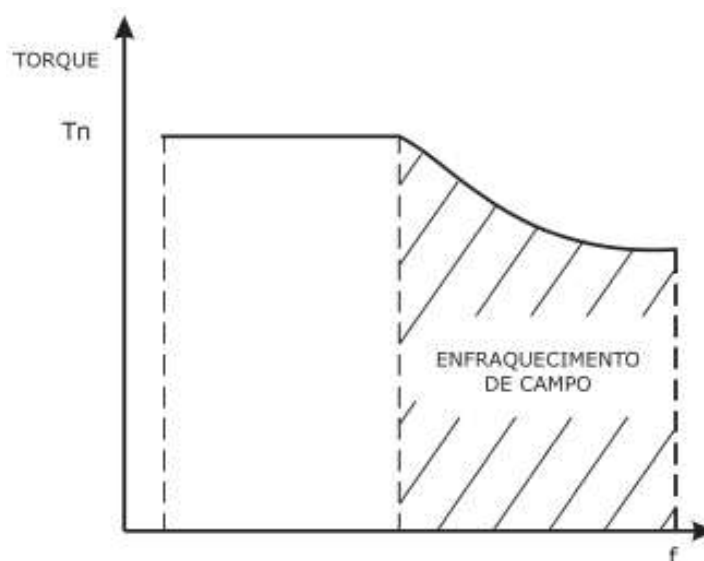


Figura 25 Curva T/f evidenciando o enfraquecimento de campo

Fonte: M. Eng. Mascheroni, et al. (2005).

2.5.5.4 Controle Vetorial

Basicamente, o circuito de potência do inversor de modelo vetorial não é diferente de um inversor de frequência V/f, sendo idênticos os mesmos blocos funcionais. No inversor V/f a referência de velocidade é usada como sinal para gerar os parâmetros variáveis tensão/frequência e disparar os IGBT's ou transistores de potência. Já o inversor vetorial calcula a corrente necessária para produzir o torque requerido pela máquina, calculando a corrente do estator e a corrente de magnetização. Inclusive existem fabricantes que já uniram os dois métodos de controle dentro de um só inversor, podendo o usuário optar pela qual melhor se adequar ao processo.

A corrente que circula no bobinado estático de um motor de indução pode ser separada em duas componentes; I_D , corrente de magnetização na qual é produtora de FLUXO e I_Q , corrente produtora de TORQUE.

A corrente total é a soma vetorial destas duas componentes e o torque produzido no motor é proporcional ao “produto vetorial” das duas componentes. A qualidade com a qual estas componentes são identificadas e controladas define o nível de desempenho do inversor.

Em alguns sistemas que utilizam controle vetorial é necessário o uso de um encoder ou tacômetro acoplado ao motor para que se tenha uma melhor dinâmica. Sendo assim podemos dizer que existem dois tipos de implementação de inversores vetoriais: o inversor “sensorless” (sem sensores) e o inversor com realimentação por encoder (controle orientado pelo campo).

2.6 Ventilação industrial

A ventilação industrial é a operação realizada por meios mecânicos com finalidade de controlar alguns parâmetros, tais como temperatura, distribuição do ar, umidade, e eliminação de agentes contaminantes ou poluentes, entre eles: gases, vapores, poeiras, névoas, microrganismos e odores (Thies, et al., 2016).

De acordo com Thies & Zanomi (2016), os sistemas de ventilação são classificados em sistemas de ventilação geral e local exaustora. O sistema de ventilação geral fornece a ventilação de um determinado ambiente de uma forma geral e global. O sistema de ventilação local exaustora ocorre com um equipamento captor de ar próximo à fonte poluidora, em outras palavras, que produz poluente nocivo à saúde, de modo que se remova o ar da fonte poluidora para a atmosfera. O sistema de exaustão é o responsável pela remoção desse ar da fonte poluidora e deve ter um tratamento adequado com a intensão de ser devidamente entregue à atmosfera para que não ocorra nenhum risco de poluição ao meio ambiental.

Segundo ABNT – NBR 10131, de 1987, os ventiladores são classificados de acordo com a forma do rotor em centrífugos ou radiais, axiais e mistos.

Normalmente, com um sistema de exaustão projetado e instalado, o exaustor opera a uma velocidade constante, porém há momentos em que a mudança na vazão é desejável. São utilizados alguns métodos para variar o fluxo de ar em um sistema de exaustão, tendo como mais eficiente o método de acionamento por velocidade variável que oferece ao sistema inúmeras possibilidades no controle da vazão.

2.7 Potência e Energia

Temos por definição que potência elétrica é a capacidade que um material possui de efetuar certo tipo de trabalho em um determinado instante de tempo (Moraes, 2013). A energia de uma forma generalizada pode ser compreendida como sendo a capacidade de uma força aplicada a um corpo executar trabalho.

Então, pode-se dizer que o trabalho mede a energia transferida pela atuação de alguma força em um dado objeto.

A figura 27 mostra um circuito de corrente contínua (CC), potência elétrica em circuitos CC é determinada simplesmente pelo produto da tensão na carga vezes a corrente que circula por ela.

$$P = V.I \quad (2.13)$$

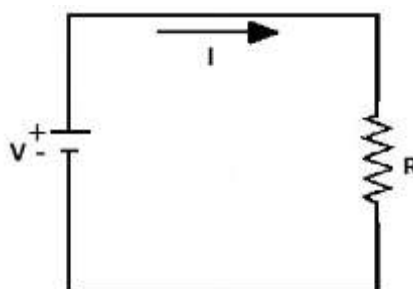


Figura 26 Fonte de tensão CC alimentando uma carga com resistência R.
 Fonte: Adaptado de Chapman (2013).

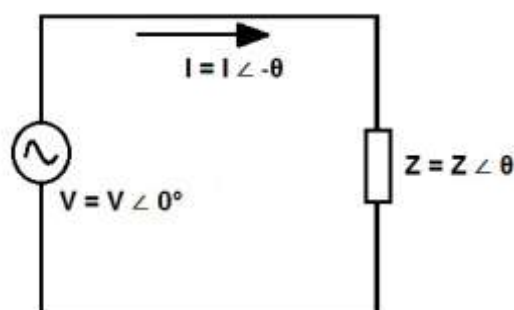


Figura 27 Fonte de tensão CA alimentando uma carga com impedância $Z = Z \angle \theta$.
 Fonte: Próprio

Já no caso dos circuitos alimentados com corrente alternada senoidal (CA) pode ocorrer uma diferença de fase entre a corrente CA e a tensão CA. Essa diferença de fase se dá devido à existência de cargas indutivas e capacitivas alimentadas ao circuito, isso nos leva a considerar mais três tipos de potências que juntas são conhecidas como triângulo de potência.

Todos os equipamentos que possuem um circuito magnético e funcionam em corrente alternada (motores, transformadores, etc.) absorvem dois tipos de energia: a ativa e a reativa (Copel, 2005).

- Energia ativa: é aquela que efetivamente produz trabalho.
- Energia reativa: é aquela que, apesar de não produzir trabalho efetivo, é indispensável para produzir o fluxo magnético necessário ao funcionamento dos motores, transformadores, etc.

De acordo com Chapman (2015) cada uma destas energias corresponde uma corrente, também denominada de Ativa e Reativa. Estas duas correntes se somam vetorialmente para formar uma corrente aparente. Esta, embora chamada Aparente,

é bastante real, percorrendo os diversos condutores do circuito, provocando seu aquecimento, e, portanto, gerando perdas por efeito Joule.

2.7.1 Triângulo de potência

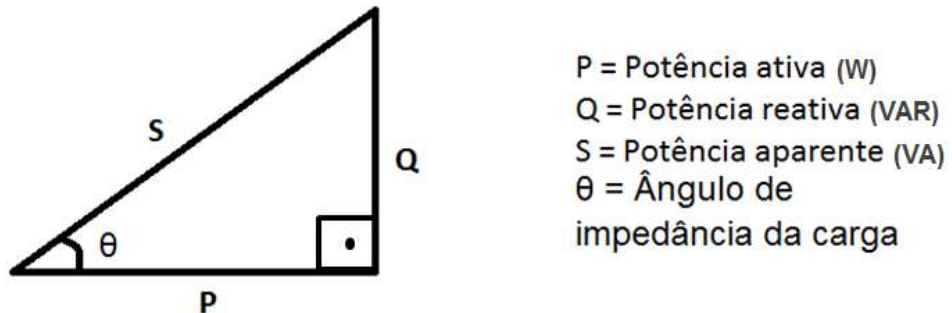


Figura 28 Triângulo de Potência.

Fonte: Autores

O triângulo de potência surge da relação trigonométrica entre três potências para circuitos CA, que são: potência ativa, reativa e aparente como mostrado na figura 29 (Chapman, 2013).

$$\cos \theta = \frac{P}{S} \quad (2.14)$$

$$\text{sen } \theta = \frac{Q}{S} \quad (2.15)$$

$$\text{tg } \theta = \frac{Q}{P} \quad (2.16)$$

2.7.2 Potência Ativa

Segundo Chapman (2013) potência ativa é a que de fato realiza trabalho, ou seja, a potência que realmente estará sendo utilizada pelo circuito na execução da atividade. A Potência ativa ou média é medida em *watts* (w).

$$P = V \cdot I \cos \theta \quad (2.17)$$

$$P = 3 V_{\phi} \cdot I_{\phi} \cos \theta \quad (2.18)$$

$$P = \sqrt{3} V_L I_L \cos \theta \quad (2.19)$$

A equação (2.17) é aplicada em circuitos CA monofásicos, enquanto as equações (2.18) e (2.19) são aplicadas em circuitos CA trifásicos em um sistema equilibrado onde V_ϕ e I_ϕ são denominados tensão e corrente de fase, V_L e I_L conhecidos como tensão e corrente de linha.

$$V_F = V_L \quad (2.20)$$

$$I_F = \frac{I_L}{\sqrt{3}} \quad (2.21)$$

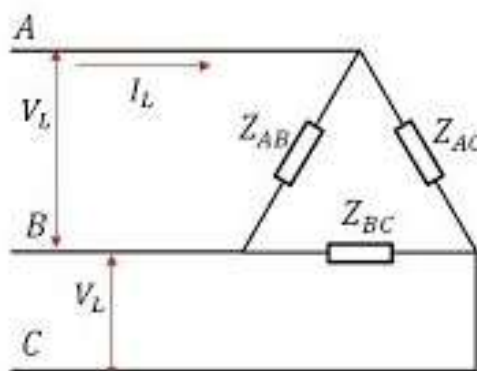


Figura 29 Carga ligada em Δ equilibrada.

Fonte: Chapman (2013)

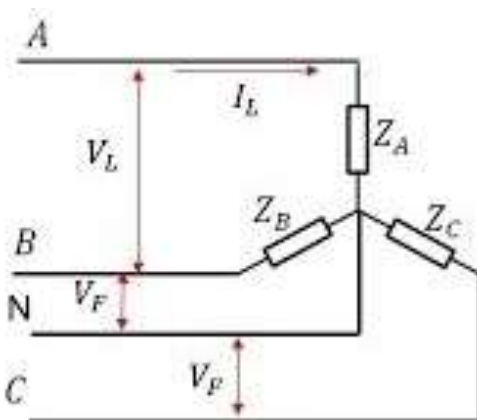


Figura 30 Uma carga ligada em Y equilibrada.

Fonte: Chapman (2013)

$$I_L = I_F \quad (2.22)$$

$$V_F = \frac{V_l}{\sqrt{3}} = \frac{V_{AB}}{\sqrt{3}} = \frac{V_{BC}}{\sqrt{3}} \quad (2.23)$$

2.7.3 Potência Reativa

Equipamentos elétricos que utilizam reatâncias indutivas ou reatâncias capacitivas, como por exemplo, os motores e transformadores, desenvolvem em seu interior um campo magnético necessário para seu funcionamento. Em dispositivos elétricos indutivos, essa energia armazenada em forma de campo magnético tende a se opor à variação da intensidade da corrente, provocando um atraso na corrente em relação à tensão. Os dispositivos elétricos capacitivos são similares, porém, o campo magnético tende a se opor à variação da intensidade da tensão, causando um atraso de tensão em relação à corrente. A potência reativa é medida em Volt-Ampère reativo (Var) (Chapman, 2013).

$$Q = V \cdot I \cdot \sin \theta \quad (2.24)$$

$$Q = 3 V \Phi \cdot I \Phi \cdot \sin \theta \quad (2.25)$$

$$Q = \sqrt{3} V_l \cdot I_l \cdot \sin \theta \quad (2.26)$$

2.7.4 Potência Aparente

Também conhecida como potência complexa ou total, a potência aparente é representada pela soma fasorial da potência ativa e potência reativa, a unidade de medida em Volt-Ampère (VA).

$$S = P + jQ \quad (2.27)$$

$$S = V \cdot I^* \quad (2.28)$$

Segundo J. Chapman (2013), para compreender essa equação, suponhamos que a tensão aplicada a uma carga seja $V = V \angle \alpha$ e que a corrente através da carga seja $I = I \angle \beta$. Então, a potência complexa fornecida à carga será

$$\begin{aligned}\mathbf{S} &= \mathbf{VI}^* = (V\angle\alpha)(I\angle-\beta) = VI\angle(\alpha - \beta) \\ &= VI\cos(\alpha - \beta) + jVI\sin(\alpha - \beta)\end{aligned}$$

O ângulo de impedância ϑ é a diferença entre o ângulo da tensão e o ângulo da corrente ($\theta = \alpha - \beta$), de modo que essa equação reduz-se a

$$\begin{aligned}\mathbf{S} &= VI\cos\theta + jVI\sin\theta \\ &= P + jQ\end{aligned}$$

2.7.5 Fator de potência

Chapman (2013) define o fator de potência como sendo a fração da potência aparente S que está verdadeiramente fornecendo potência ativa a uma carga. Ele indica a eficiência em que a energia está sendo usada. O fator de potência é determinado pelo tipo de carga ligada ao sistema elétrico, que pode ser Resistiva, Indutiva ou Capacitiva.

$$FP = \cos\theta \quad (2.29)$$

2.7.6 Determinação do FP

A Figura 29 mostra que θ é o ângulo de impedância da carga, porém, o fator de potência produzido pelos ângulos de impedância -30° e $+30^\circ$ tem exatamente o mesmo valor uma vez que $\cos\theta = \cos(-\theta)$, sendo assim não é possível distinguir quando uma carga é capacitiva ou indutiva. Para que isso seja especificado, costuma-se dizer que a corrente está adiantada ou atrasada em relação à tensão sempre que um fator de potência é fornecido.

2.7.7 Correção do FP

Um fator de potência baixo nos mostra que não estamos utilizando inteiramente a energia, e uma saída para a correção desse fator de potência seria a instalação de Banco de Capacitores. Essa correção é feita mediante o acoplamento

de bancos de capacitores conectados em paralelo com a carga, como por exemplo, para diminuir ao máximo o efeito indutivo de motores, sabendo-se que os bancos de capacitores possuem uma carga reativa contrária a dos motores.

Outra forma de corrigir o fator de potência seria através do uso de motores síncronos ou outros equipamentos. De acordo com Chapman (2013), um motor síncrono pode propiciar correção do fator de potência e também custos menores para o sistema de potência, além disso, muitas cargas que aceitam um motor de velocidade constante são acionadas por motores síncronos, mesmo que as cargas não precisem necessariamente de velocidade constante.

3 Fluxograma de uma Siderúrgica

Todo processo se inicia nos pátios de matéria prima, onde os principais insumos são o minério de ferro, extraído da mineradora, o calcário e o carvão mineral. A partir deles, são preparados o sinter, o coque e o carvão pulverizado.

Os altos fornos são equipamento que produzem o ferro líquido ainda impuro chamado gusa, depois da aplicação de oxigênio puro e sucatas metálicas e outros metais nas aciarias, é transformado em aço. O gusa é transformado através da incineração do sinter, coque e pelota. Ainda no processo de redução nos autos-fornos, outro produto gerado é a escória, matéria-prima base do cimento.

A partir dos altos fornos, o fluxograma se divide em duas vertentes até seu produto final, aços planos ou aços longos.

Paralelo aos altos-fornos existe a aciaria elétrica, na qual é composta por dois principais equipamentos: forno elétrico a arco e forno-panela. No forno elétrico a sucata de aço reciclada de toda usina e gusa sólido são fundidos através da corrente elétrica conduzida pelos eletrodos até a carga metálica, produzindo o aço líquido que é vazado em uma panela e transportado ao forno-panela, no qual ocorrem os ajustes de composição química, dando origem ao grau do aço.

Na linha de aços longos o próximo equipamento será o lingotamento contínuo onde já foi definida a composição química do aço no forno-panela, ele é transportado ao lingotamento contínuo, onde o aço líquido passa por moldes refrigerados e é solidificado, originando os tarugos.

Posteriormente na laminação a quente, chamado de “trem de Laminação”, o tarugo é aquecido no forno de reaquecimento e submetido a deformações plásticas em uma sequência de cadeiras de laminação, onde ocorre uma redução sequencial da seção do material após cada cadeira.

Na linha de barras e rolos é definida a seção transversal final do material com suas características dimensionais e mecânicas. O produto final é fornecido no formato de barras retas ou de rolos, indo para o comércio como vergalhão, arames etc., daí o nome da vertente “aços longos”. Posteriormente o setor de embalagens onde vergalhões em barras são acondicionados em feixes com pesos e comprimentos definidos. Já os rolos e fios-máquina são embalados de forma unitária.

Na via de aços planos, após o gusa ser produzido nos auto fornos, é transferido por meio de carros torpedos até a aciaria onde será transformado o ferro gusa em aço. O gusa escoia dos altos-fornos e é carregado em conversores, onde também será acrescentada a sucata para produzir aço. O refinamento do gusa ocorre por sopros de oxigênio puro, para diminuir os altos teores de elementos químicos presentes.

Igualmente ao processo de aços longos, agora o então aço propriamente, passará pela etapa de lingotamento contínuo, onde o aço líquido é transformado em aço sólido, formando espessas tiras que ao final do processo são cortadas em placas nas dimensões apropriadas para a laminação.

Laminação, aqui, a placa de aço passa entre cilindros que a comprimem, tendo como resultados do processo, peças de aço com espessuras que variam de 1,20 a 25 mm com diferentes larguras que costumam ser encontradas entre 750 até 2100 mm, sendo necessários diversos passes de laminação à alta temperatura, seguida pela laminação à temperatura ambiente. As etapas geram os produtos conhecidos como laminado a quente e a frio, que já podem ser comercializados.

Todo esse processo citado anteriormente pode ser acompanhado através da do diagrama representado pela figura 32

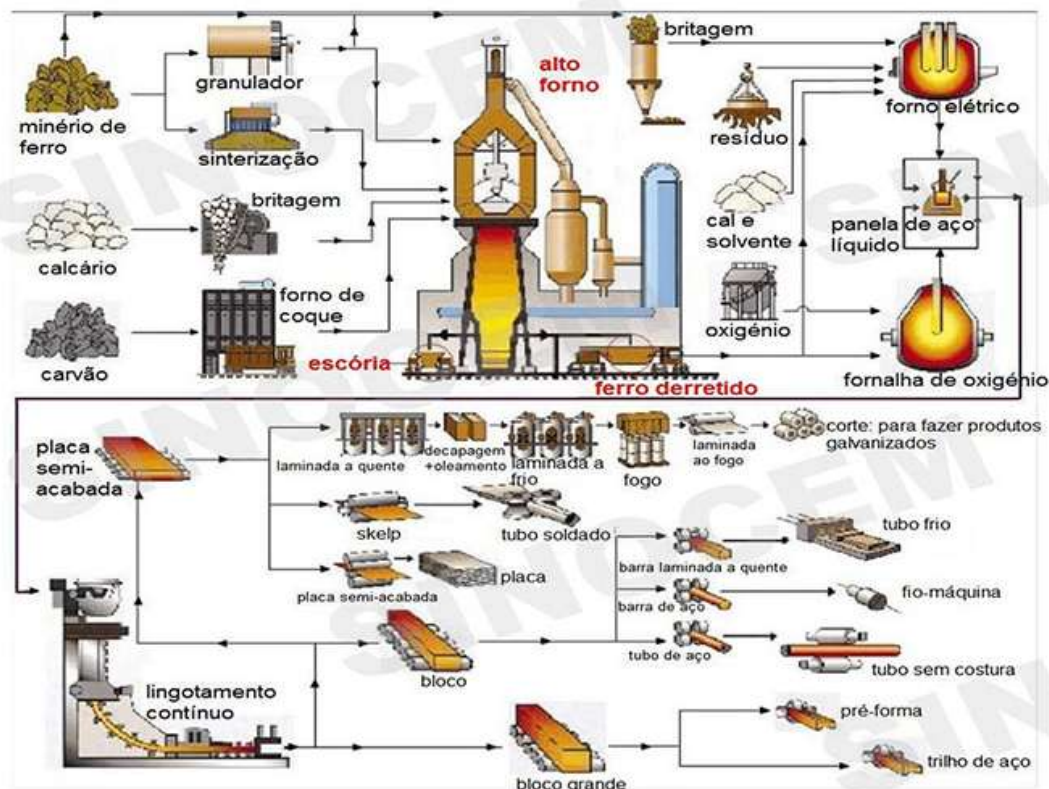


Figura 31 Fluxograma de produção do aço.

Fonte: Sinocem (2010).

3.1 Laminador de tiras a frio (LTF)

Constituídos basicamente por cilindros (rolos), mancais, um quadro para fixar estas partes (gaiola) e um motor para proporcionar potência para os cilindros e permitir o controle de velocidade de rotação. As forças incluídas na laminação atingem milhares de toneladas com uma certa facilidade, desse modo, é extremamente importante e necessária uma construção bastante rígida, além de motores de uma potência elevada a fim de fornecer a potência requerida pelo equipamento (Grupo CIMM, 2018).



Figura 32 Exemplo real de laminador de tiras a frio.
Fonte: Companhia Siderurgica Nacional (2005).

Na laminação são utilizadas várias formas na disposição dos cilindros, em sua forma mais simples ele é composto por dois cilindros de eixo horizontais que são postos um sobre o outro verticalmente. Este equipamento é conhecido como laminador duo, podendo ser reversível ou não. No laminador duo não reversíveis, figura 34(a), os cilindros giram apenas em um sentido, ou seja, o material será laminado nesse mesmo sentido. Já no laminador reversível figura 34(b), o sentido do giro dos cilindros pode ser invertido permitindo que a laminação ocorra nos dois sentidos. No laminador trio, os cilindros são postos a girar sempre no mesmo sentido e o material pode ser laminado nos dois sentidos uma vez que o material passa alternadamente entre os cilindros superior e intermediário e entre os cilindros intermediário e o inferior, representados pela figura 34(c). Com o interesse em laminar materiais cada vez mais finos, surge o laminador quádruplo, figura 34(d). Nele os cilindros de trabalhos são de pequeno diâmetro e são apoiados por cilindros de encosto de tamanhos mais elevados comparados aos de trabalho.

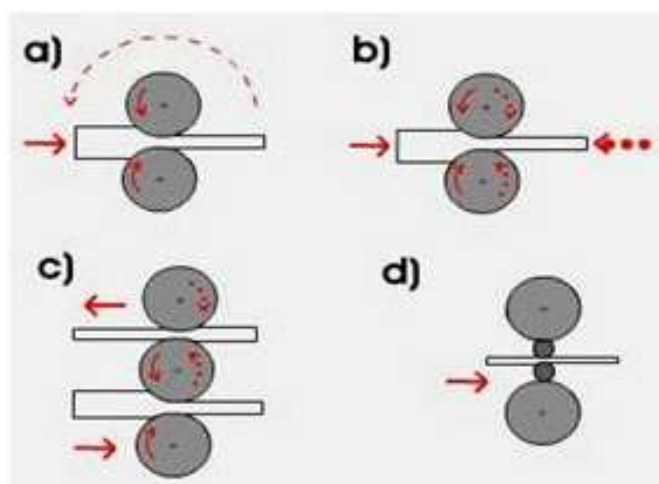


Figura 33 Configurações de laminação a frio; a) Laminador Duo; b) Laminador Duo reversível; c) Laminador Trio; d) Laminador Quádruplo.
 Fonte: Grupo CIMM (2018).

Os mancais servem de apoio aos cilindros, onde eventuais deformações destas peças provocariam variações dimensionais na chapa a ser laminada. o que é altamente indesejável. Três tipos de mancais são usados em laminadores: mancais de fricção, onde o pescoço gira sobre casquilhos de bronze, madeira, etc., devidamente lubrificados; mancais de rolamento; mancais a filme de óleo sob pressão (tipo “Morgoil”).

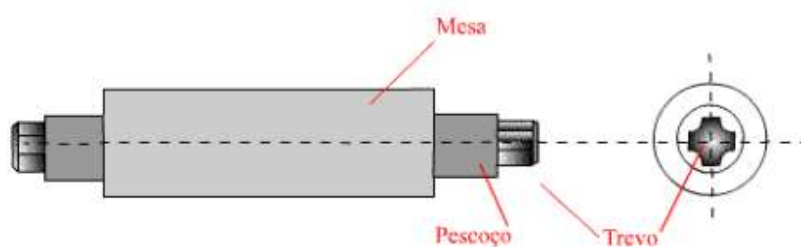


Figura 34 Partes de um cilindro de laminação.
 Fonte: Grupo CIMM (2018).

3.2 Laminador de Encruamento Reversível (LER)

Após a recristalização processada pelo recozimento, o aço apresenta-se mole, num estado bem diferente daquele gerado após a laminação a frio. Antes rígido e inflexível, agora é de fácil conformação devido às qualidades adquiridas.

No entanto, nesta condição não poderia ser utilizado, a menos que as peças solicitadas pelos clientes não priorizassem a forma perfeita e bom acabamento superficial. Assim, qualquer leve dobramento ou encurvamento da chapa de aço recozido provocaria quebras em sua superfície. Para eliminar essa condição, dá-se ao aço uma laminação de encruamento. Um laminador de encruamento é uma unidade de terminação que processa o aço sob a forma de folha ou de uma placa, a fim de fornecer força e forma uniforme para a superfície.

A laminação feita superficialmente tem por finalidade uniformizar as condições da superfície do aço, dar maior rigidez à chapa e melhorar o aplainamento, dando a possibilidade de estampagem.

A figura 36 trata do supervisor de operação do LER com acionamentos de equipamentos periféricos, informações de velocidades, dados das bobinas etc.

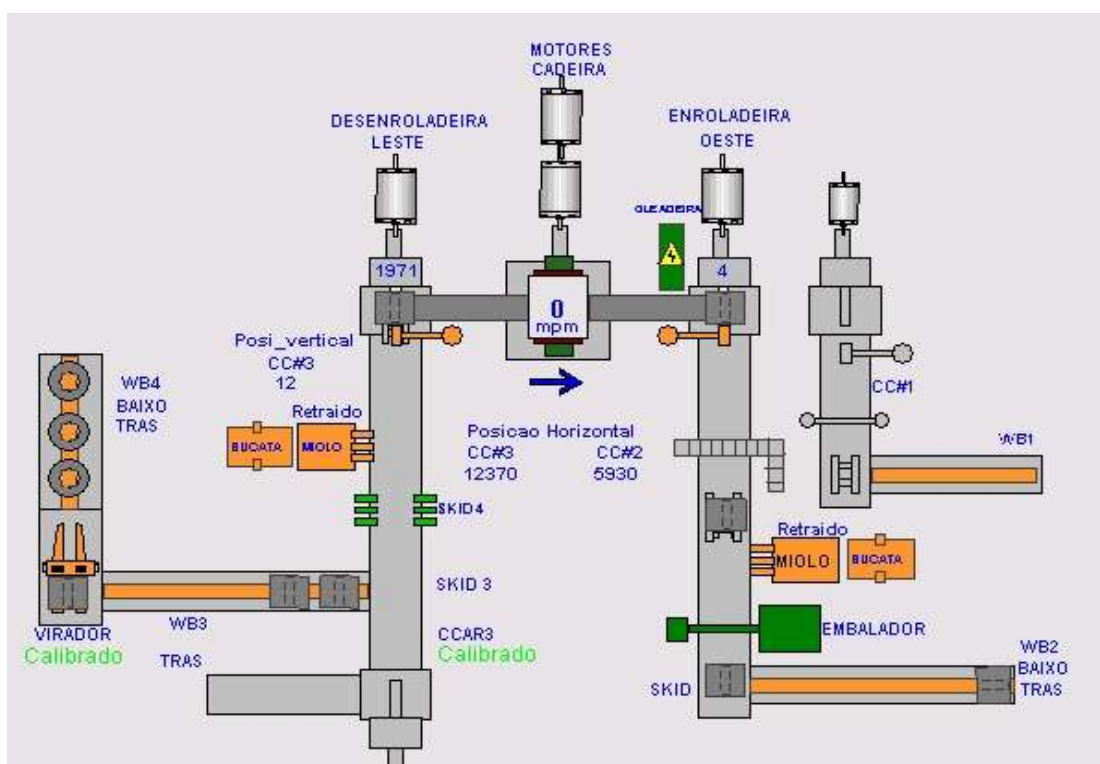


Figura 35 Supervisor de automação do LER

Fonte: GE Tollbox (2018), adaptado pelos autores

Todo o processo do LER é separado entre etapas, sendo cada uma delas executada de forma semiautomática, sendo dependente de que o operador dê o comando de início.

Tais etapas são separadas por setor, sendo elas distribuídas entre entrada, processo e saída, conforme exemplificado na figura 37 distinguindo cada etapa.

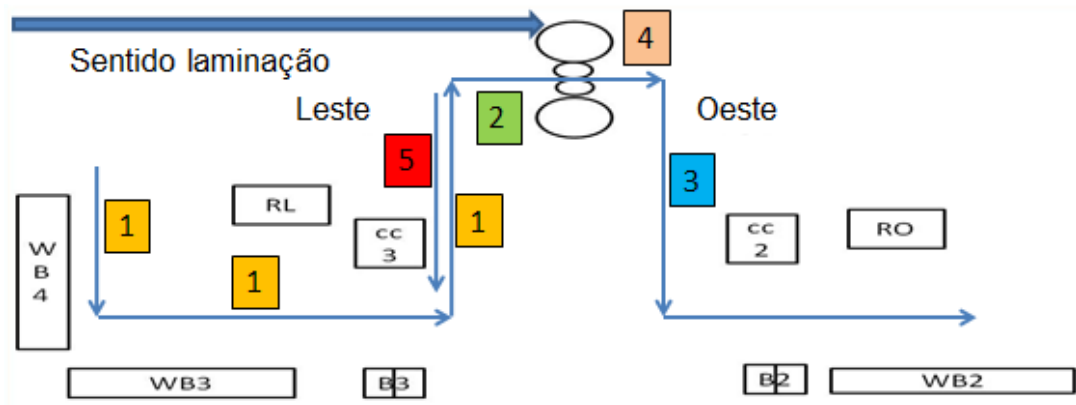


Figura 36 Etapas de processo do LER

Fonte: Autores

1. Carregamento: A bobina é conduzida até o mandril da desenroladeira onde se dá início à etapa de enfiamento da chapa;
2. Enfiamento: Momento em que a chapa é desenrolada até a outra extremidade do laminador;
3. Retirada de miolo na saída: Descarte de parte da bobina com alta variação de espessura
4. Processo: Conta com aceleração, regime e a desaceleração do laminador.
5. Remoção de miolo entrada: Descarte de chapa com alta variação de espessura na entrada do laminador

3.2.1 Componentes do laminador de encruamento

O processo do Laminador de Encruamento Reversível tem como objetivo principal eliminar o patamar de escoamento através do alongamento do material sendo este, na faixa de 0,4 a 4% conforme solicitação do cliente final (GM,FIAT, Multibras, etc). Nesta função a espessura do material não é alterada, possui peso máximo de entrada de 25 toneladas, por questões estruturais.

Na figura 38 é exemplificado um sistema de laminação de encruamento com seus principais componentes.

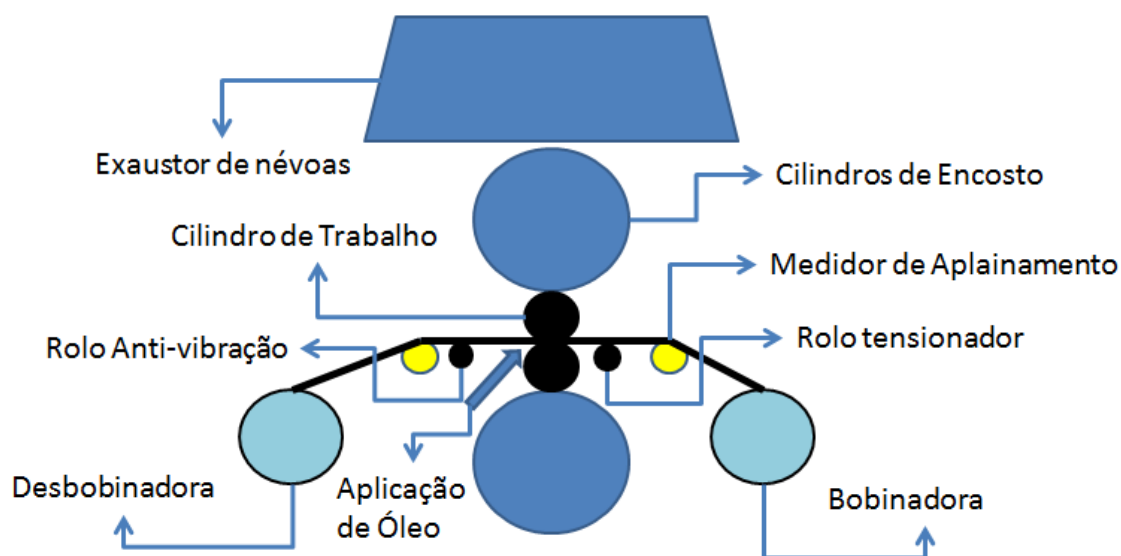


Figura 37 Layout básico de um Laminador de Encruamento

Fonte: (Grupo CIMM, 2018), adaptado pelos autores

De acordo com KRELLING (2014) os principais componentes do laminador de encruamento são:

- Desbobinadora já com o nome bem intuitivo, é onde a bobina é desenrolada para o processo. Oferece resistência reversa ao sentido de laminação e tem o objetivo de manter a “tensão de estiramento” na chapa.
- Bobinadora tem o mesmo princípio da desbobinadora, porém no sentido oposto. É o local onde a bobina, então encruada, é enrolada e direcionada ao consumidor final. Também exerce “tensão de estiramento” na chapa entre cadeira de cilindros e bobinadora.
- Cilindros de encosto são cilindros de diâmetro maior e resistência mecânica elevada, porém “macios”, de forma que absorva qualquer imperfeição do cilindro de trabalho, já que este está em contato direto com a chapa. Sua função é sustentar os cilindros de trabalho.
- Cilindros de trabalho estão em contato direto com a chapa plana, sendo sempre dois em cada cadeira e diâmetro menor que os cilindros de encosto. São trocados com maior frequência, pois têm maior desgaste por estarem em contato com o material a ser laminado, portanto mais sujeitos ao atrito e ao calor.

- Medidores de aplainamento são importantíssimos para a garantia da qualidade do material a ser processado. Se trata de um rolo dividido por seções, cada uma com uma célula de carga, conforme figura 39(a), que é tensionada para baixo quando flexionada pela chapa sobre o rolo, desta forma, tal informação é tratada e enviada para o supervisor da operação, conforme figura 39(b), indicando a necessidade ou não de alterar a “flexão” do cilindro, aumentar ou diminuir a força de laminação.

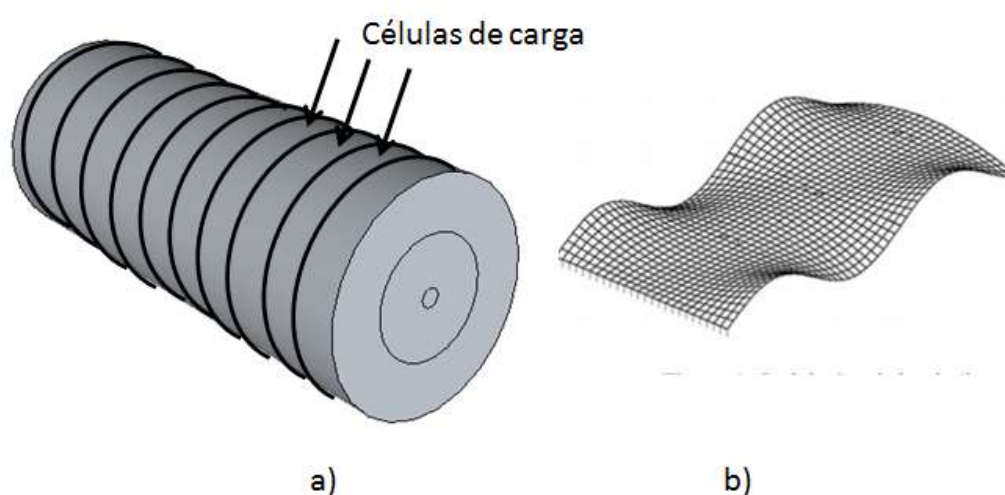


Figura 38 a) Rolo medidor de planicidade; b) Resultado gerado e tratado para exibição no supervisor

Fonte: KRELLING [2014] adaptado pelos autores (2018)

- Sistema de aplicação de óleo é responsável pela manutenibilidade dos cilindros reduzindo a sujidade, já que o processo de laminação e encruamento geram fumos e resíduos metálicos. Tem como principal objetivo, a proteção superficial da bobina, evitando a oxidação do aço.
- Exaustor de névoas e fumos metálicos é o responsável por exaurir o particulado metálico e o óleo pulverizado na bobina durante o processo.

3.2.2 Sistema de aplicação de óleo Protetivo

Conforme já citado anteriormente, o óleo protetivo tem o papel de prioritário de proteção da superfície da chapa.

Quando a bobina sofre o processo de recozimento, é aquecida a altas temperaturas de modo a retornar com as propriedades mecânicas perdidas no processo de laminação a frio e posteriormente resfriada.

Quando a bobina é resfriada, deve ser seguido os procedimentos para que não ultrapasse a temperatura mínima e ocorra o processo de oxidação, isso se dá quando a atmosfera do ambiente está úmida. Quando há uma temperatura mais elevada, a umidade presente em torno da bobina é evaporada.

A temperatura ideal para processo no Laminador deve estar entre 40 a 45°C, quando essa temperatura é reduzida após o processo no LER, o responsável por impedir esse fenômeno é o óleo protetivo. Podendo assim, a bobina, ser comercializada e enviada para locais com condições climáticas favoráveis ao fenômeno de oxidação.

Outra forma de processo de laminação e encruamento é o processo úmido, no qual tem como produto de proteção a emulsão que se resume em água e óleo.

A quantidade de óleo que é aplicado na bobina, depende da velocidade do processo e a largura da bobina. O cálculo é feito no CLP do LER e enviado ao controlador do sistema de óleo na faixa de miliampéres (mA), o controlador por sua vez recebe os dados e gera o sinal para ativar uma região de bicos injetores de óleo de acordo com a largura da bobina como mostrado na figura 40.

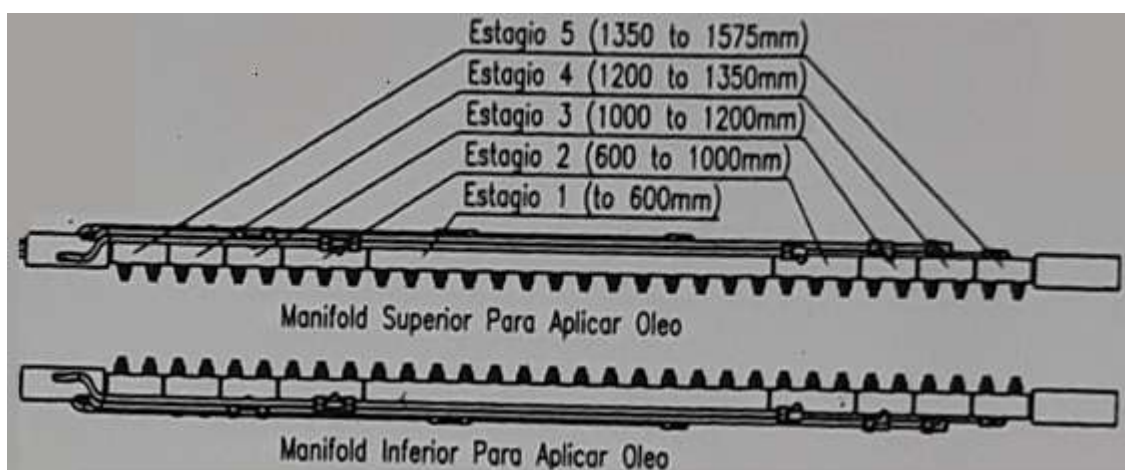


Figura 39 Manifold com bicos injetores de óleo

Fonte: Spray Systems do Brasil adaptada pelos autores (2000)

A figura 41 representa o bloco de funções do CLP para o cálculo e geração de sinal para o controle das válvulas.

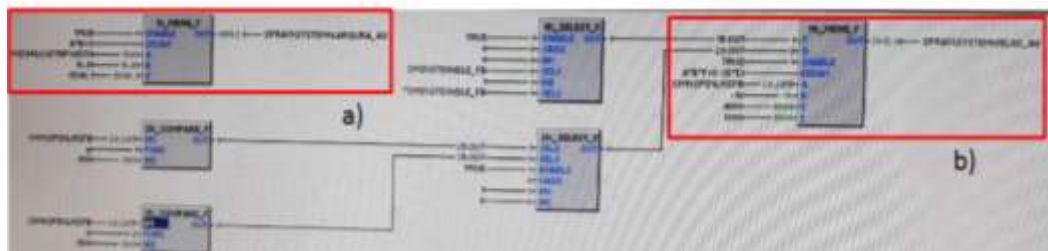


Figura 40 Diagrama em bloco de controle de: a) largura e b) velocidade de aplicação de óleo

Fonte: GE toolbox (1998) adaptado pelos autores

Na figura 41(a) representa o cálculo para seleção da faixa de largura, onde os operadores inserem a largura da bobina (620 a 1575mm) e o bloco faz a conversão para sinal de corrente em miliampéres utilizando a técnica de interpolação com valores embasados na tabela 4.

Tabela 4 Parâmetros para saída analógica

parametros para saída analogica		
	4 mA	20 mA
Largura	600 mm	1575 mm
velocidade	0 m/s	1000 m/s
Taxa de aplicação	0 g/m²	4 g/m²

Fonte: Spray systems do Brasil [2000]

Por exemplo, uma bobina com largura de 1000 mm para ser processada, qual deverá ser o valor de corrente necessária para que o controlador selecione os estágios corretos para processo?

$$\frac{1000 - 600}{1575 - 600} = \frac{x - 4}{20 - 4}$$

Portanto...

$$x = 10,56 \text{ mA}$$

O mesmo método será utilizado para a velocidade de aplicação de óleo na chapa. Porém a variável de entrada será a velocidade do laminador gerando o gráfico da figura 42 a seguir.

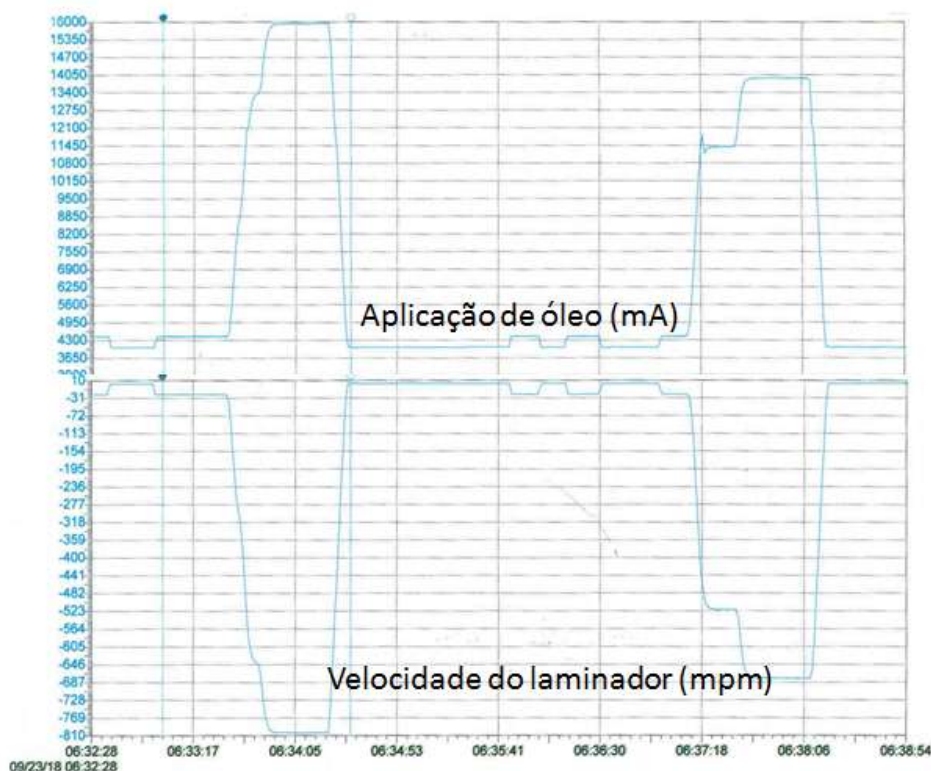


Figura 41 Resposta do controle de fluxo de óleo em relação à velocidade do laminador

Fonte: GE Toolbox (2018), adaptado pelos autores

Observa-se que a resposta da aplicação de óleo é imediatamente idêntica à variação de velocidade do laminador. No gráfico superior é demonstrado a variação de 4 a 20 mA, de acordo com a velocidade instantânea. No gráfico inferior observa-se a variação de velocidade do Laminador de 0 à -810 metros por minutos. O motivo do sinal negativo se dá por conta do sentido de processo do laminador. Historicamente o LER processava material em dois sentidos, sendo o “sentido positivo”, o sentido de laminação com foco na redução de espessura.

Com o tempo notou-se que não era viável logisticamente, mantendo seu funcionamento apenas para o encruamento de chapas de aço, sendo este o sentido atual.

4 IDENTIFICAÇÃO DOS PROBLEMAS

Neste trabalho será utilizado o método de solução de problemas como parte da necessidade de tornar competitiva uma determinada empresa siderúrgica da região sul fluminense. O objetivo é buscar melhores resultados com redução de custos através de investimento ou substituição de sistemas visando um menor custo de manutenção.

Assim, para a idealização desse projeto serão necessárias uma série de análises técnicas tendo como chave mestra o planejamento de cada etapa do projeto.

O principal objetivo no presente trabalho será identificar as oportunidades de redução de custos com energia elétrica, estratificar quais são os motores elétricos de maior potência, analisar os modos de funcionamentos para possível otimização no processo e por fim propor o maior retorno no investimento em caso de possibilidade de ganhos.

A fim de identificar os maiores consumidores do sistema, o gráfico da figura 43 mostra o consumo em Kwh das cargas do laminador.

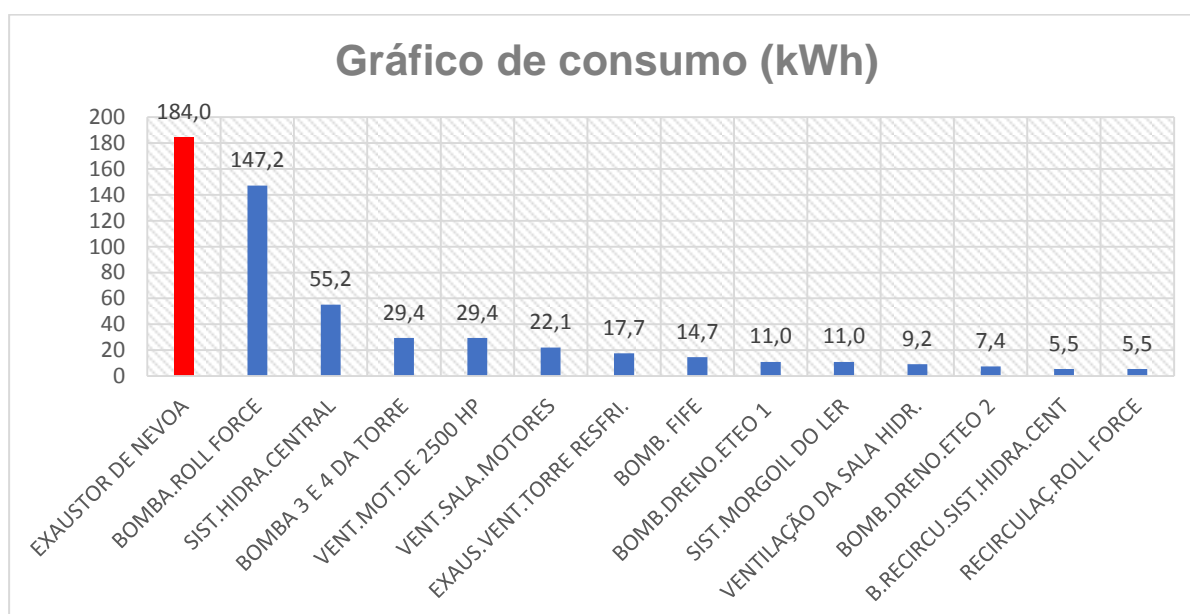


Figura 42 Gráfico do consumo de energia dos motores AC do LER

Fonte: Autores

Utilizando a metodologia MSP (Método de Solução de Problemas), a etapa de análise do problema deve-se investigar mais a fundo as causas prováveis que impactam no consumo de energia.

O diagrama demonstrado na figura 44, tem como objetivo estabelecer uma ordenação das causas dos problemas mais significativos, sendo estratificado as causas prováveis do problema de consumo de energia.

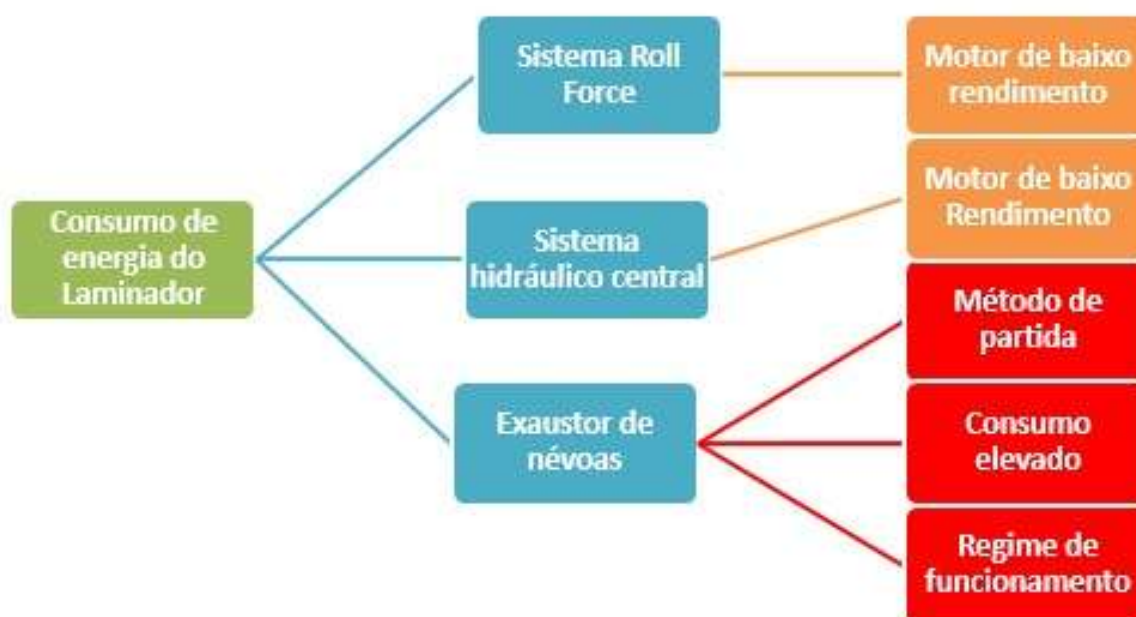


Figura 43 Diagrama de Pareto do LER

Fonte: Autores

A análise de Pareto afirma que, para muitos eventos, aproximadamente 80% dos efeitos vêm de 20% das causas. Observamos então que os maiores consumidores do LER, conforme identificado na figura 44 são: o exaustor de névoas, o Sistema Roll Force e o Sistema hidráulico Central, respectivamente.

O motor do sistema Roll force, mostrado na figura 45 é responsável de pressão hidráulica utilizada nas cadeiras do laminador com a finalidade de atuar na força de laminação.



Figura 44 Motor do Sistema Roll Force.

Fonte: Autores

Foi citado como uma das causas do problema de alto consumo de energia pelo fato do sistema ser composto por motor de 147,2 kW (200 cv).

O sistema hidráulico central é responsável por manter a pressão da linha hidráulica constante, responsável pelos acionamentos mecânicos em todo o equipamento (LER). Para isso é utilizado um motor de 55,2 kW (75 cv) conforme figura 46.



Figura 45 Motor do sistema hidráulico central

Fonte: Autores

Os motores do Roll Force e do Sistema hidráulico Central, trabalham com cargas fixas não sendo aconselhável variar sua velocidade, pelo fato de o sistema impactar diretamente no produto gerado pelo Laminador.

Outro aspecto que deve ser levado em consideração é o fato dos motores serem de baixo rendimento. A solução para esta causa seria a substituição dos motores atuais por motores com alto rendimento.

Como maior causador do elevado consumo de energia do LER, foi identificado o exaustor de névoas, representado na figura 47. No próximo capítulo serão levantadas as causas mais prováveis.



Figura 46 Sistema de exaustor do LER.

Fonte: Autores

4.1 Instrumento para análise das variáveis

Através do Analisador de Qualidade de Energia Power Pad III Modelo 8336 – AEMC demonstrado na figura 48, foi possível mensurar em tempo real todas as variáveis de processo necessárias para elaboração da justificativa e necessidade da implementação do controle de velocidade do exaustor, visando a redução do consumo e picos de energia.



Figura 47 Analisador de qualidade Power Pad III Modelo 8336

Fonte: Gonçalves [2016] adaptado pelos Autores

O equipamento é capaz de gerar gráficos e relatórios, com facilidade de manuseio e leitura. Sendo possível também exportá-los para uma planilha em Excel, conforme figura 49.

1	Recording	V1-2 rms	A3 rms	PFT	PT (W)	Cos ϕ T (DPF)	Tan ϕ T
20	06/09/2018 14:37:15	469,6	246,7	0,845	171192	0,841	0,643
21	06/09/2018 14:37:20	469,4	247,1	0,845	171474	0,842	0,642
22	06/09/2018 14:37:25	469,3	246,6	0,845	170721	0,842	0,641
23	06/09/2018 14:37:30	468,1	246,8	0,846	170960	0,842	0,641
24	06/09/2018 14:37:35	469	246,4	0,845	170773	0,841	0,642
25	06/09/2018 14:37:40	469,4	246,5	0,845	170908	0,841	0,643
26	06/09/2018 14:37:45	469,1	245,8	0,844	170434	0,841	0,644
27	06/09/2018 14:37:50	471,4	245,5	0,843	170826	0,84	0,647
28	06/09/2018 14:37:55	474,4	244,4	0,841	170787	0,837	0,653
29	06/09/2018 14:38:00	475,5	244,4	0,84	171243	0,837	0,654
30	06/09/2018 14:38:05	474,6	244,6	0,841	170862	0,838	0,653
31	06/09/2018 14:38:10	473,2	245,5	0,842	170992	0,838	0,651
32	06/09/2018 14:38:15	473,5	245,1	0,842	171026	0,838	0,651
33	06/09/2018 14:38:20	473,6	245,1	0,841	171042	0,838	0,651
34	06/09/2018 14:38:25	474,7	244,6	0,841	170990	0,837	0,653
35	06/09/2018 14:38:30	475,2	244,6	0,84	171145	0,837	0,654
36	06/09/2018 14:38:35	476,2	244,1	0,839	170809	0,836	0,657
37	06/09/2018 14:38:40	476,2	244,2	0,839	170990	0,836	0,656
38	06/09/2018 14:38:45	472,5	245,1	0,842	170784	0,839	0,649
39	06/09/2018 14:38:50	471,2	245,6	0,843	170710	0,84	0,647
40	06/09/2018 14:38:55	471,4	245,5	0,843	170687	0,839	0,648
41	06/09/2018 14:39:00	471,8	245,7	0,843	170956	0,839	0,648
42	06/09/2018 14:39:05	471,6	245,3	0,843	170720	0,839	0,648
43	06/09/2018 14:39:10	471,3	245,4	0,843	170700	0,839	0,647
44	06/09/2018 14:39:15	469,9	246,2	0,844	170790	0,84	0,645
45	06/09/2018 14:39:20	469,6	246	0,844	170497	0,84	0,645
46	06/09/2018 14:39:25	467,7	246,4	0,845	170443	0,842	0,641
47	06/09/2018 14:39:30	465,6	247,2	0,847	170379	0,843	0,638
48	06/09/2018 14:39:35	466,2	247	0,846	170404	0,842	0,639
49	06/09/2018 14:39:40	466,4	247,1	0,846	170470	0,843	0,639
50	06/09/2018 14:39:45	464,7	247,5	0,847	170358	0,844	0,636
51	06/09/2018 14:39:50	464,4	247,7	0,847	170291	0,844	0,636
52	06/09/2018 14:39:55	463,4	248,0	0,848	170222	0,845	0,633

Figura 48 Modelo de geração de arquivo em Excel pelo analisador de qualidade.

Fonte: Autores

4.2 Problemas com o método de partida

A figura 50 demonstra o pico de corrente que é gerado no momento da partida do exaustor.

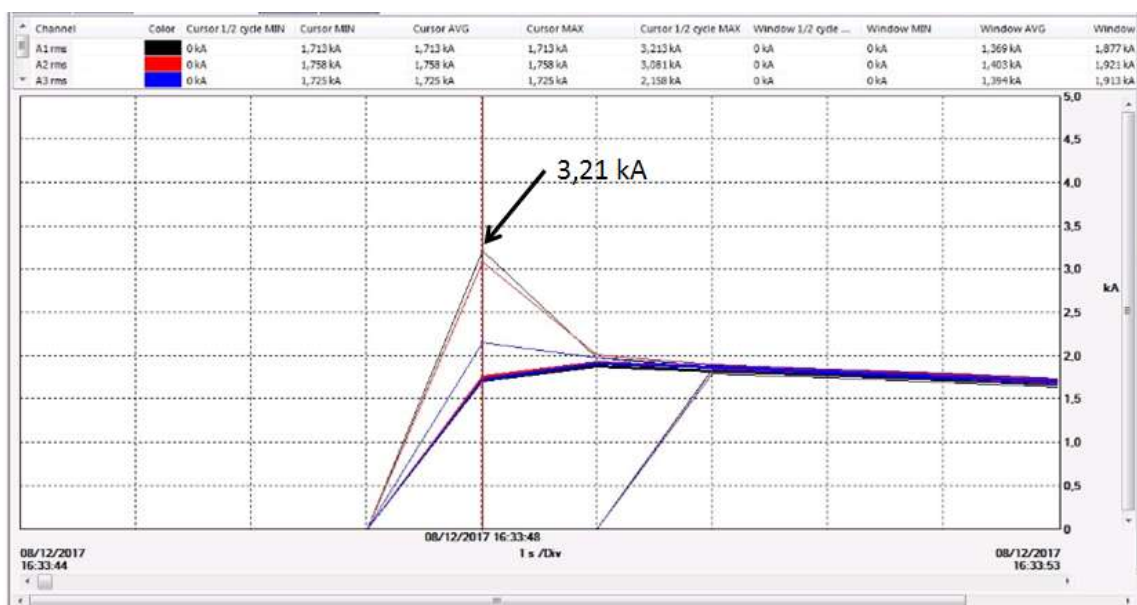


Figura 49 Corrente de Pico do Exaustor de Névoas

Fonte: Autores

O método de partida atual do sistema gera problemas como a alta corrente de partida chegando a grandezas de 3 kA, provocando afundamento de tensão na rede de alimentação além de provocar interferências em equipamentos ligados na mesma instalação, pelo fato de se utilizar os CCM's para a distribuição da alimentação entre os motores ligados a instalação.

O fato de haver um pico de corrente elevado obriga o gestor de energia local, contratar um elevado valor de demanda de energia elétrica, gerando custos adicionais. Atualmente o desligamento e partida do sistema são efetuados poucas vezes durante o mês, só acontecem durante eventos de manutenção preventiva.

Na figura 51 é demonstrado o diagrama unifilar de alimentação elétrica do LER. Nela podemos identificar a seguinte configuração: Todo sistema é alimentado com 13,8 kV através de duas barras A e B, podendo ser interligadas através do disjuntor de interligação. Ainda na barra A sendo evidenciada a linha de alimentação da subestação unitária, faz a transformação de 13,8 kV para 0,46 kV, posteriormente alimentando um motor CC de 500 HP e os CCM's 1,2 e 3.

O exaustor de névoas se encontra instalado no CCM 3 e por vezes se faz necessário que se desligue as outras cargas para ligar apenas o exaustor, gerando manobras desnecessárias em motores adjacentes.

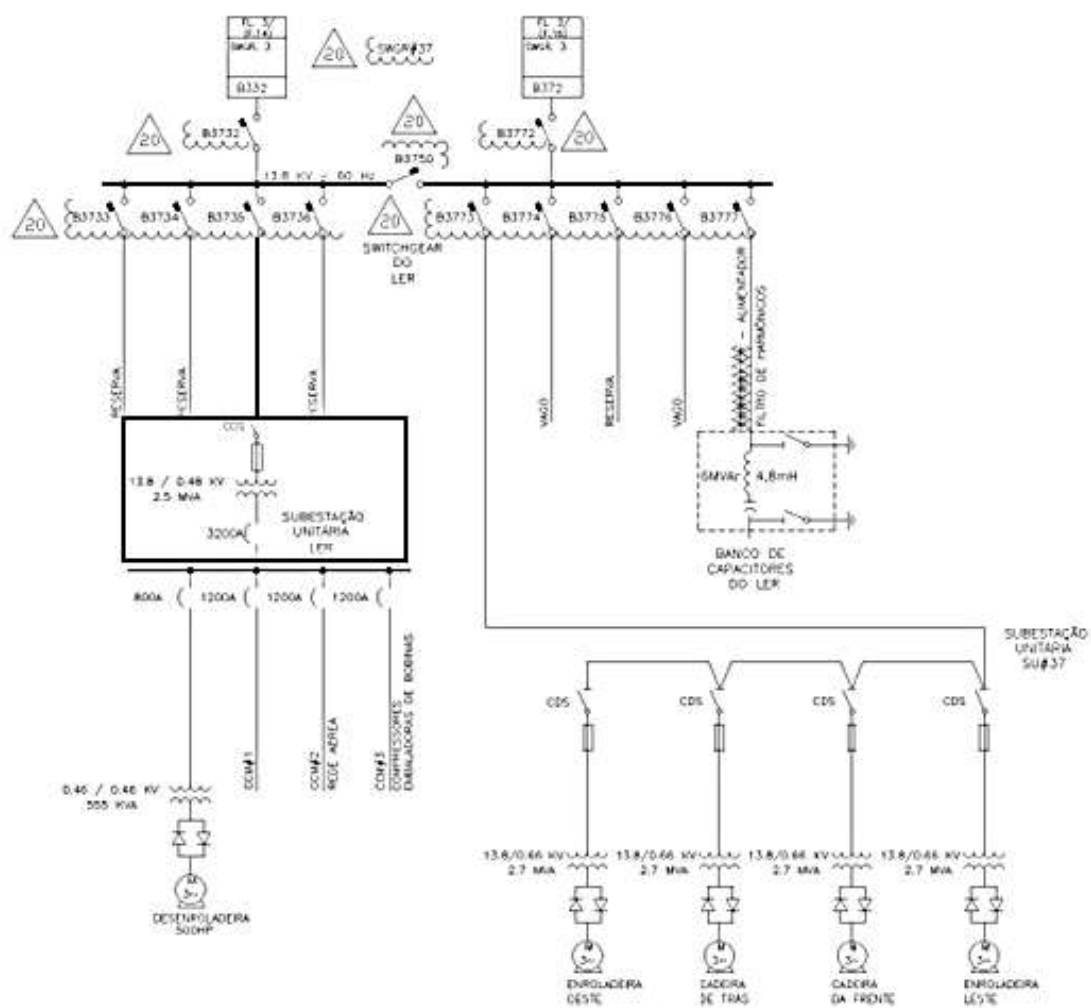


Figura 50 Diagrama unifilar de alimentação elétrica do LER

Fonte: Utc Projetos e Consultoria S.A. (1998) Adaptado por Autores

4.3 Consumo elevado de energia no exaustor

No intervalo entre os dias 6/09/2018 até o dia 13/09/2018 foi instalado o analisador de qualidade, na qual foi possível apurar o consumo de energia e possíveis variações no processo, obtemos então o gráfico da figura 52.

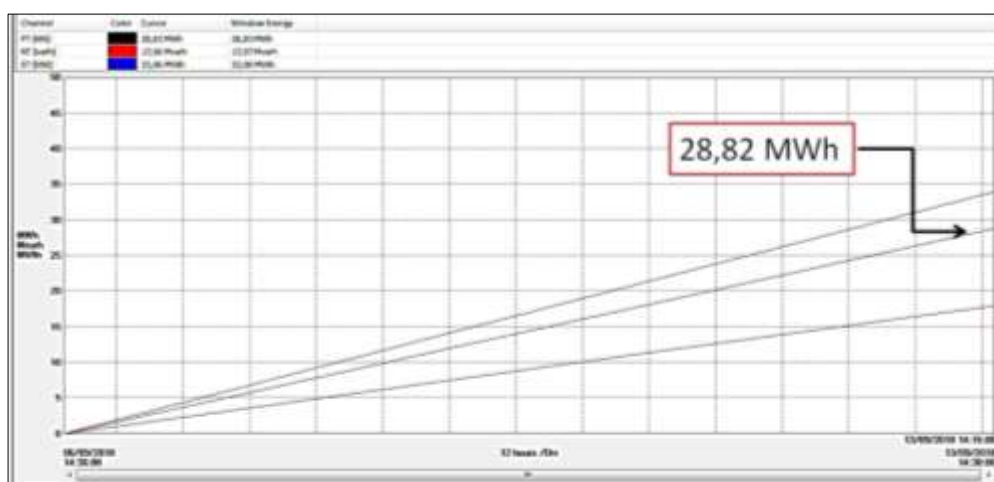


Figura 51 Consumo de energia do exaustor em sete dias

Fonte: Autores

Conforme identificado na figura 52, foi mensurado o consumo de energia total de 28,82 MW, ou seja 4,11 MW consumidos diariamente. Atualmente o exaustor tem uma carga horária de funcionamento de 8400 horas anuais, levando em consideração que o sistema trabalha durante 350 dias, sendo 15 dias anuais parados para manutenção preventiva.

Através da medição da potência de entrada para o exaustor, foi identificado que o motor consome da rede 171,78 kWh, sendo este 88% da sua potência nominal.

A tabela 5 demonstra a estimativa de gasto anual do exaustor, levando em consideração uma tarifa R\$/kWh 0,16 (valor médio tarifado pelo setor).

Tabela 5 Consumo atual de energia do exaustor

CONSUMO DO EXAUSTOR DE NÉVOA		
Quantidade de motor	1	
Potência nominal do motor	250	Cv
Preço do kWh	0,16	R\$/kWh
Consumo Atual kWh	171,78	
Gasto Mensal (R\$)	19.789,05	
Gasto Anual (R\$)	237.468,67	

Fonte: Autores

Nota-se que para o cálculo do consumo mensal está sendo considerado trinta dias e o consumo anual trezentos e sessenta dias.

4.4 Regime de funcionamento do exaustor

Quando comparado o consumo de energia linear do exaustor ao funcionamento intermitente do laminador, pode-se observar claramente a ociosidade do recurso em alguns momentos.

A figura 53 demonstra a condição normal de processo de uma bobina com as etapas desde o carregamento do laminador, com velocidade zero, passando pelo processo onde realmente há geração de névoa, até a retirada do produto final. Todo esse tempo o exaustor permanece ligado, consumindo energia constantemente.

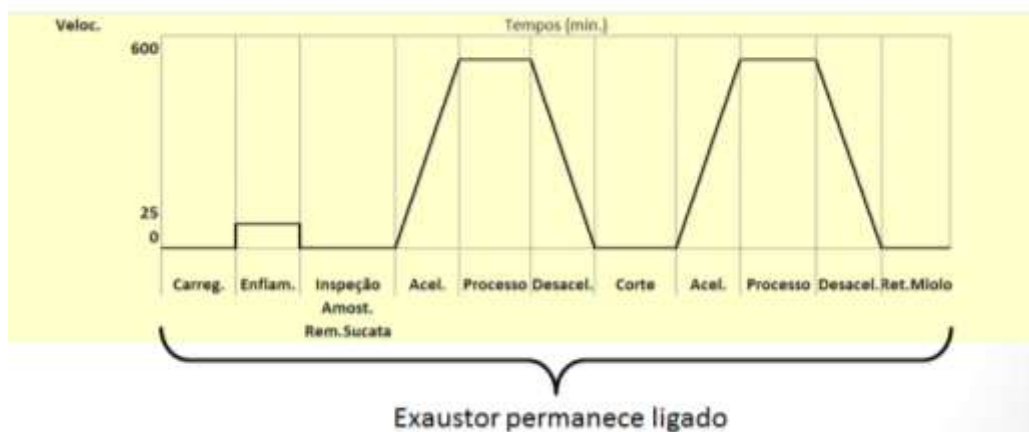


Figura 52 Regime de funcionamento do laminador (m/min).

Fonte: Autores

5 ESTIMANDO A TAXA DE UTILIZAÇÃO DO EXAUSTOR

Conforme o método MSP, esta etapa deverá ser feita no próprio local da ocorrência para coleta de informações suplementares mais específicas do problema.

Com o intuito de estimar a redução do uso do exaustor, foi utilizado o monitoramento do tempo de processo através de um horímetro (já existente no equipamento), no qual é somado o tempo de cada etapa do processo por meio da automação no CLP através de diagrama de estado conforme figura 54.

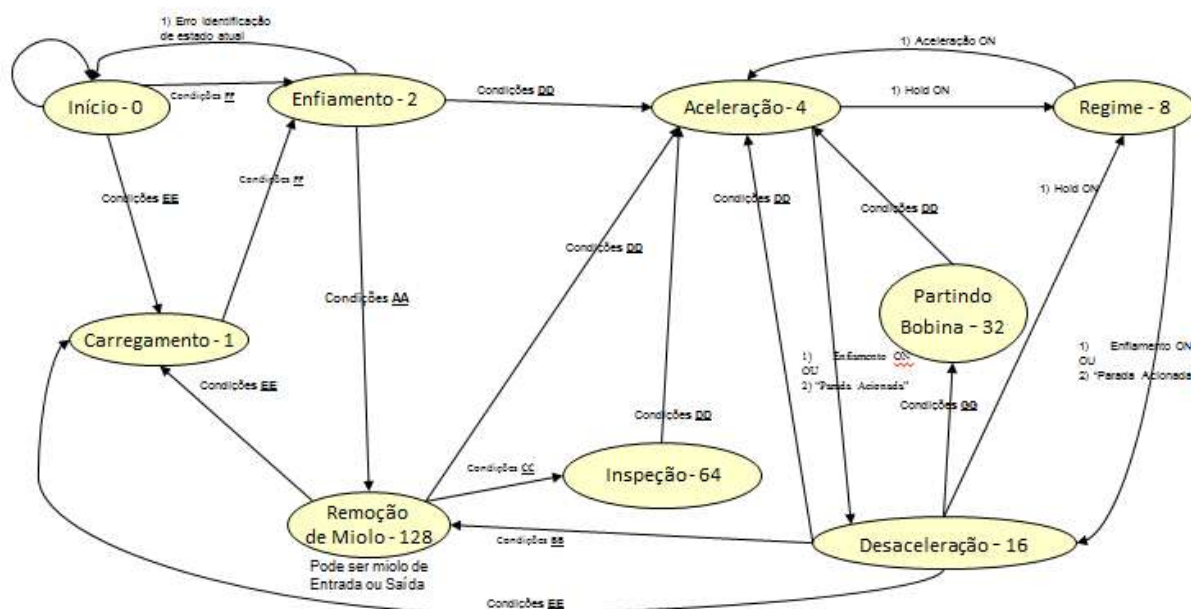


Figura 53 Diagrama de estados para transferência de etapas de processo
Fonte: Autores

A geração de amostras de tempo foram feitas durante o mês de maio, contemplando o tempo médio de cada etapa em cada turno de operação. Esses valores foram estratificados gerando os dados representados na tabela 6.

Para o cálculo da taxa de utilização, foi utilizada a equação 2.30.

$$\text{Taxa de utilização \%} = \frac{\text{Enfiamento} + \text{processo} + \text{divisão}}{\Sigma \text{Tempo Total}} * 100 \quad (2.30)$$

$$\text{Taxa de utilização \%} = \frac{3,62 + 5,75 + 2,13}{28,45} * 100$$

Taxa de utilização % = 40,42

A taxa de utilização representa o tempo médio no processo de uma bobina em que haja realmente a necessidade do sistema de exaustão.

Tabela 6 Tempo médio por etapa de cada turno (min,%min)

ETAPAS	A	B	C	D	MÉDIA
Carregamento	5,63	6,16	6,90	6,96	6,41
Enfiamento	3,68	3,38	4,32	3,11	3,62
Processo	6,05	5,67	5,97	5,30	5,75
Divisão	2,11	2,07	2,25	2,08	2,13
Inspeção	0,65	0,09	0,31	0,29	0,33
Miolo Entrada	4,87	4,64	4,63	5,24	4,84
Miolo Saída	3,80	3,24	4,52	2,97	3,63
Troca de cilindro	2,32	1,48	1,42	1,66	1,72
Tempo Total	29,11	26,74	30,31	27,60	28,45
Utilização do Exaustor	40,69%	41,60%	41,37%	38,00%	40,42%
Taxa de utilização do exaustor	40,42%				

Fonte: Autores

Os resultados apontaram a possibilidade de redução do tempo de funcionamento do exaustor em aproximadamente 60%, sendo evidenciado em vermelho as etapas onde realmente necessitam do exaustor.

6 ESTUDO DA SOLUÇÃO

Para a implementação de uma nova tecnologia do sistema será necessário um investimento inicial, mão de obra qualificada, equipamentos, análise financeira e de viabilidade. Contudo, buscando um retorno vantajoso financeiramente e proporcionando um avanço tecnológico para a empresa.

Diante desta necessidade, foi percebido que o aproveitamento de elementos já pertencentes a área contribuiria para reduzir o custo do projeto, tais como: cabos de alimentação do motor e CLP para controle das variáveis.

Estudos apontaram resultados dos tempos de operação do exaustor, conforme identificado no item 3.2.3 evidenciando que o mesmo poderia permanecer inoperante ou consumindo uma pequena parte de sua potência nominal nas etapas em que o exaustor não seria necessário, ou seja, na ausência da névoa de óleo.

Surge então o interesse na Implementação do controle de velocidade do exaustor que atrelado ao fato de que a potência absorvida pelo exaustor varia ao cubo da rotação (Grupo WEG, 2016 p. 25), conforme ilustra a equação 2.31.

$$\frac{P1}{P2} = \left(\frac{N1}{N2}\right)^3 \quad (2.31)$$

Onde:

P1= potência nominal

P2= potência nova

N1= rotação nominal

N2= rotação nova

Em análise preliminar foi verificado também a possibilidade de substituição do motor do sistema de exaustão por um motor de alto rendimento, pois o motor em uso atualmente possui mais de vinte anos de fabricação e baixo rendimento, que segundo a norma atual prevê um valor mínimo de 95,8% para motores com potência de 250 cv ((Ministério de Minas e Energia, 2001)

6.1 Escopo do projeto

A partir do estudo feito anteriormente, foi visto que a melhor opção será a utilização de um inversor de frequência por conta da possibilidade de variação de velocidade no qual impactam diretamente no consumo de energia, também serão descritos os investimentos e os ganhos possíveis para a substituição do motor.

Na primeira fase, o principal procedimento a ser feito é o dimensionamento para o controle de velocidade do sistema de exaustão.

Para o dimensionamento de um inversor de frequência, são utilizados os dados de placa do motor a ser controlado conforme apresentados na tabela 7.

Tabela 7 Dados de placa do motor de exaustão

TIPO	ASSINCRONO DE INDUCAO
ROTOR	GAIOLA
NÚMERO DE FASES	3 ~
GRAU DE PROTEÇÃO	IPW55
CLASSE ISOLAÇÃO	F
CATEGORIA	H
FATOR DE POTÊNCIA	0,85
FATOR SERVICO	1,15
TENSÃO DE ALIMENTAÇÃO	460V
FRÉQUENCIA	60 HZ
MÉTODO DE RESFRIAMENTO	IC0141
REGIME TRABALHO	S1
APLICAÇÃO	Exaustor
PADRÃO	ABNT NBR 17094
FORMA CONSTRUTIVA	B3E
CARCACA	280H
NÚMERO DE POLOS	6 POLOS
POTÊNCIA NOMINAL	250 CV

Fonte: Autores

A partir dos dados nominais do motor, foi possível calcular o rendimento nominal do motor através da equação 2.32, conforme mostrado na tabela 8

Tabela 8 Cálculo do rendimento com dados de placa do motor

Dados nominais			
V (nominal)	P nominal (kW)	I nominal (A)	FP nominal
460	184	282,00	0,86
Rendimento nominal	95,22%		

Fonte: Autores

Da seguinte forma:

$$n_{nominal} = \frac{P(saída)}{\sqrt{3} * V * I * \cos\theta} * 100 \quad (2.32)$$

$$n_{nominal} = \frac{184kW}{\sqrt{3} * 460 * 282 * 0,86} * 100$$

$$n_{nominal} = 95,22$$

Com o auxílio do analisador de qualidade citado no item 3.1, foi possível mensurar os valores em tempo real que são consumidos pelo sistema. Esses valores foram planejados, resultando assim a tabela 9.

Tabela 9 Cálculo da potência fornecida à carga

Dados do exaustor coletados			
V (média)	P média (kW)	I média (A)	FP médio
461,74	171,78	250,52	0,845387588
P saída (kW) com $n_{nominal}$			163,58

Fonte: Autores

Os dados da tabela 9 foram obtidos através de valores médios, medidos ao longo de sete dias (6/10/2018 à 13/10/2018), período em que o analisador de qualidade ficou instalado.

A partir dos dados efetivos do sistema em mãos e o valor do rendimento nominal, será possível calcular qual a potência está sendo entregue à carga através da equação 2.33

$$n_{nominal} = \frac{P_{saída}}{P_{entrada}} \quad (2.33)$$

$$P_{saída} = n_{nominal} * P_{entrada}$$

$$P_{saída} = 0,9522 * 171,78kW$$

$$P_{saída} = 163,58 kW$$

Da mesma maneira os dados da carga deverão ser levantados, no qual os mesmos foram adquiridos a partir do manual técnico do equipamento, representado na figura 55.

FAN INFORMATION									
QUANTITY	:	1							
FAN TYPE	:	Class IV PLR							
FAN SIZE	:	60							
FAN CLASS	:	IV							
ROTATION	:	CCW							
DISCHARGE	:	TH							
ARRANGEMENT	:	1							
FAN PERFORMANCE DATA									
MAX SAFE SPEED : 1305 RPM at 70 Deg.									
WHEEL WIDTH : 71.5 "									
CAP	TYPE	CFM	SP	RPM	BHP	TEMP	ALT	DENSITY	
1	STD.	75000.0	12.70	1175	227.67	70	0.0	0.0750	

Figura 54 Dados de placa do exaustor

Fonte: Bliss Salen (1997), adaptado por Autores

Feito estudo com fornecedores de inversores de frequência, obtendo a estimativa de preços para a instalação e comissionamento do sistema de controle de velocidade. Essa estimativa foi planejada, resultando assim a tabela 10.

Tabela 10 Proposta comercial para inversor G120 e componentes periféricos

Qtde	Descrição Técnica	Código	Fabricante
PAINEL DE ACIONAMENTO DE INVERSOR 186 kW/380-480V			
1	Chave Seccionadora com Porta-Fusível NH, 3P, 630A	3NP1163-1DA10	SIEMENS
3	Fusível Ultra-Rápido, 630A, Tamanho 3	3NE1436-0	SIEMENS
1	Módulo de Potência Trifásico, 250KW, 380~480V - PM240 - G120	6SL3224-0XE42-0UAD	SIEMENS
1	Unidade de Controle para PM240, com 6 DI, 3 DO, 2 AI e 2 AO, Comunicação Profibus DP	6SL3244-0BB12-1PA1	SIEMENS
1	Painel de Operação Básico BOP-2 para PM240	6SL3255-01100-4CA1	SIEMENS
1	Kit de Montagem da IHM na Porta do Painel	6SL3256-0AP00-0JA	SIEMENS
1	Filtro RFI Classe A para PM240	6SL3000-0BE36-0AAO	SIEMENS
1	Reator de Entrada para PM240	6SL3000-0CE35-1AAO	SIEMENS
1	Reator de Saída para PM240	6SL3000-2BE35-0AAO	SIEMENS
2	Minidisjuntor, 2P, 06A, Curva C	5SX1206-7	SIEMENS
1	Transformador de Comando, 150VA, 380/480 - 120V	4AM3895-0AQ10-0C	SIEMENS
1	Contator Auxiliar, 2NA+2NF, Bob. 220Vac	3RH1122-1AN10	SIEMENS
1	Sinaleiro Vermelho, 220Vac	3SB6216-6AA20-1AAO	SIEMENS
Custo equipamentos:		R\$ 208.500,00	
Custo serviços:		R\$ 87.800,00	
Total		R\$ 296.300	

Fonte: Autores

O inversor deverá permitir operar o motor através do método de controle vetorial por se tratar de um sistema mais sofisticado que pode atender as expectativas de controle de velocidade com respostas rápidas e de alta precisão. Podendo ser com realimentação de informação de velocidade tornando o sistema mais preciso e robusto conforme citado no item 2.5.5.4.

Quanto à automação que será utilizada para controle da velocidade, serão adotadas duas alternativas: A primeira alternativa será manter o exaustor desligado quando não houver produção de névoa, resultando na utilização de 40,42% de energia conforme identificado na tabela 6 no qual o método será identificado como método controle de velocidade *ON/OFF*.

Outra alternativa será o exaustor ficar ligado a 20% de sua velocidade nominal, aproximadamente 240 rpm, nas etapas em que não haja produção de nevoa. A Pior situação de funcionamento deste motor autoventilado quanto à elevação de temperatura ocorre na rotação de 120 rpm, na qual a frequência é apenas 6 Hz e a ventilação é mínima (Grupo WEG, 2016).

Para as condições citadas acima, foi então gerada a lógica de controle de velocidade representada na tabela 11.

Tabela 11 Lógica para controle de velocidade do Exaustor.

Etapas	Lógica de controle velocidade		
	0%	20%	100%
Carregamento	0	1	0
Enfiamento	0	1	0
Inspeção	0	1	0
Retirada de miolo na saída	0	1	0
Processo	0	0	1
Retirada de miolo na entrada	0	1	0
> 30 minutos	1	0	0

Fonte: Autores

Para a alternativa de 20%, deve haver uma função que desligue completamente o sistema quando o tempo de inatividade do processo ultrapassar trinta minutos, pois esse é o tempo médio em que a operação leva para preparar a linha quando houver bobina que necessita de certa medida de limpeza e qualidade

do equipamento, chamada de “setup”. Qualquer tempo além de trinta minutos será considerado que a equipe de operação está em horário de refeição.

6.2 Método controle de velocidade stand-by

Nesse método serão levadas em consideração todas etapas do processo, ou seja, o exaustor permanecerá ligado nas etapas em que não há produção de névoa, porém com velocidade reduzida a 20%, gerando a tabela 12.

Tabela 12 Percentual de energia com velocidade stand-by

ETAPAS	A	B	C	D	MÉDIA	Equivalência	Potencia /etapa	MÉDIA PONDERADA
Carregamento	5,63	6,16	6,9	6,96	6,41	22,54%	20%	4,51%
Enfiamento	3,68	3,38	4,32	3,11	3,62	12,73%	100%	12,73%
Processo	6,05	5,67	5,97	5,3	5,75	20,22%	100%	20,22%
Divisão	2,11	2,07	2,25	2,08	2,13	7,49%	100%	7,49%
Inspeção	0,65	0,09	0,31	0,29	0,33	1,16%	20%	0,23%
Miolo Entrada	4,87	4,64	4,63	5,24	4,84	17,02%	20%	3,40%
Miolo Saída	3,8	3,24	4,52	2,97	3,63	12,76%	20%	2,55%
Troca de cilindro	2,32	1,48	1,42	1,66	1,72	6,05%	20%	1,21%
Total	29,11	26,74	30,31	27,6	28,44	100%	-	-
Utilização do Exaustor	40,69%	41,60%	41,37%	38,00%	40,42%	-	-	-
Média	40,42%					-	-	52,34%

Fonte: Autores

$$Média_{ponderada} = \left(\frac{T. etapa}{T. total} * 100 \right) * \frac{P(W)}{etapa} \quad (2.34)$$

A equação 2.34 faz uma média ponderada, onde o percentual que cada etapa representa no tempo total do processo é multiplicada pelo percentual de potência que será aplicado em cada uma delas.

A soma da média ponderada será o gasto de energia com o motor, ou seja 52,34%.

7 RESULTADOS ESPERADOS

É evidente a redução no uso do sistema do exaustor entre as etapas em que não há produção. Com isso serão calculados os ganhos com a instalação do inversor de frequência para as duas hipóteses de controle, bem como o cálculo dos ganhos de uma possível substituição do motor atual por motor de maior rendimento.

Para os cálculos de viabilidade econômica do projeto serão utilizados os dados importados da tabela 15 e uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 8,29%. O campo “saída” corresponde ao investimento médio anual com manutenções do sistema de exaustão. Nas tabelas 13 e 14 é apresentada a planilha de estudo de viabilidade econômica para os métodos de controle de velocidade respectivamente.

Tabela 13 Análise de investimento para o método controle de velocidade ON/OFF (hipótese 1)

MÉTODODO 1					
Período	Retorno	Saída	Fluxo de caixa	Valor Presente	Payback
0			-R\$ 296.300,00		
1	R\$ 137.552,95	R\$ 2.782,56	R\$ 134.770,39	R\$ 124.453,22	-R\$ 161.529,61
2	R\$ 141.610,76	R\$ 2.864,65	R\$ 138.746,11	R\$ 118.316,17	-R\$ 22.783,50
3	R\$ 145.788,28	R\$ 2.949,15	R\$ 142.839,12	R\$ 112.481,76	R\$ 120.055,62
4	R\$ 150.089,03	R\$ 3.036,15	R\$ 147.052,88	R\$ 106.935,06	R\$ 267.108,50
5	R\$ 154.516,66	R\$ 3.125,72	R\$ 151.390,94	R\$ 101.661,87	R\$ 418.499,44
VPL	R\$ 267.548,09			R\$ 563.848,09	
TIR	38%				

Tabela 14 Análise de investimento para o método controle de velocidade stand-by (hipótese 2)

MÉTODODO 2					
Período	Retorno	Saída	Fluxo de Caixa	Valor Presente	Payback
0			-R\$ 296.300,00		
1	R\$ 110.029,03	R\$ 2.782,56	R\$ 107.246,47	R\$ 99.036,36	-R\$ 189.053,53
2	R\$ 113.274,89	R\$ 2.864,65	R\$ 110.410,24	R\$ 94.152,67	-R\$ 78.643,29
3	R\$ 116.616,50	R\$ 2.949,15	R\$ 113.667,34	R\$ 89.509,81	R\$ 35.024,06
4	R\$ 120.056,68	R\$ 3.036,15	R\$ 117.020,53	R\$ 85.095,90	R\$ 152.044,59
5	R\$ 123.598,36	R\$ 3.125,72	R\$ 120.472,64	R\$ 80.899,65	R\$ 272.517,23
VPL	R\$152.394,40			R\$ 448.694,40	
TIR	26%				

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (2.35)$$

Onde:

VPL = Valor presente líquido;

TIR = Taxa interna de retorno

O resumo do estudo pode ser compreendido melhor, quando analisado o quadro representado na Tabela 15 que apresenta os valores das possibilidades e resultados esperados.

Para base de cálculo dos ganhos, foi estipulado uma tarifa de R\$ 0,16 o kWh, sendo este o valor médio tarifado na empresa no qual ocorre o estudo de caso.

Tabela 15 Retorno para cada investimento

RESUMO DAS PROPOSTAS				
Indicadores	Sistema atual	Com motor de maior rendimento	Com inversor de frequência	
Tarifa (R\$/kWh)	0,16			
Dias operação / ano	350 (8.400h)			
Horas de operação / dia	24			
Alternativas propostas	n=95,22%	n= 95,8%	Inversor SINAMICS G120	
	Processo atual	Hipótese 3	Hipótese 2	Hipótese 1
			52,34%	40,42%
kWh consumido	171,78	170,75	89,91	69,43
Consumo anual (MWh)	1.442,94	1.434,33	755,26	583,24
Consumo anual (R\$)	R\$ 230.871,01	R\$ 229.492,47	R\$ 120.841,98	R\$ 93.318,06
Economia de energia (MWh/ano)	-	8,62	687,68	859,71
Economia com energia (R\$/ano)	-	R\$1.378,54	R\$ 110.029,03	R\$ 137.552,95
Investimento previsto	-	R\$48.000,00	R\$ 296.300,00	R\$ 296.300,00
Retorno de investimento (anos)	-	34,82	2,69	2,15

Fonte: Autores

8 CONCLUSÃO

Em razão dos avanços tecnológicos, os inversores de frequência em conjunto com o CLP estão se tornando cada vez mais comuns no ambiente industrial, principalmente por aumentarem a precisão dos processos. Os ganhos do projeto em estudo resultarão em melhorias como um todo, por exemplo:

- Aumento da confiabilidade do equipamento através da tecnologia implementada;
- Redução do pico de corrente na partida do sistema de exaustão, resultando na diminuição da demanda contratada;
- Controle de velocidade do sistema de exaustão, reduzindo então o consumo de energia;
- Redução no tempo de uso diário do sistema de exaustão, aumentando substancialmente a vida útil do equipamento.

Sendo assim, a implementação do sistema de controle de velocidade do exaustor de névoas foi considerado satisfatório, visto a possibilidade do tempo de retorno de investimento de aproximadamente 2 anos e dois meses. Cabe ressaltar que, o uso do controle de velocidade poderá ser alterado entre os dois métodos citados nesse trabalho, sendo evidente o ganho em ambos os métodos.

Foram realizados cálculos também para uma possível substituição do motor em uso atualmente, porém seu resultado quanto a redução no consumo de energia foi considerado pequeno quando comparados aos dois métodos de controle de velocidade do inversor de frequência.

Como proposta de melhorias futuras ainda no contexto de eficiência energética, poderão ser mencionados um estudo para a instalação de soft-starters nos motores do sistema hidráulico central e Roll force tendo em vista a redução do pico de corrente. Foi verificado também que uma pequena redução da velocidade das bombas geram grandes efeitos na redução de potência consumida, sendo esta uma nova proposta de melhorias futuras.

9 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEEL **Agência Nacional de Energia Elétrica - ANEEL** [Online] // A Tarifa de Energia Elétrica. - 24 de 02 de 2016. - 29 de 10 de 2018. - <http://www.aneel.gov.br/tarifas>.

Chapman Stephen J. **Fundamentos de Máquinas** [Livro] / trad. Laschuk Anatólio. - Confirmar : AMGH Editora Ltda., 2013.

Companhia Siderurgica Nacional **Documento de apresentação CSN**. - Volta Redonda : [s.n.], 2005.

Copel **Manual de Eficiência Energética na indústria** [Periódico]. - 2005. - p. 155.

Franchi Claiton M. **Acionamentos elétricos** [Livro]. - São Paulo : Érica, 2008.

Grupo CIMM **Laminadores** [Online] // <https://www.cimm.com.br>. - 18 de setembro de 2018. - https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6476-laminadores#.W6EID85KgdW.

Grupo WEG **Motores de indução alimentados por inversores de frequência**. - Jaraguá do Sul : [s.n.], 01 de 2016.

M. Eng. Mascheroni José M., M. Eng. Lichtblau Marcos e M. Eng. Gerardi Denise **GUIA DE APLICAÇÃO DE INVERSORES DE FREQUÊNCIA**. - Florianópolis : [s.n.], 12 de 2005.

Ministério de Minas e Energia **Programa de metas para motores elétricos trifásicos de indução rotor gaiola de esquilo**. - 24 de 08 de 2001.

Moraes Everton www.saladaeletrica.com.br [Online] // Sala da Elétrica. - 20 de outubro de 2013. - 15 de agosto de 2018. - <https://www.saladaeletrica.com.br/potencia-eletrica-podcast-002/>.

Nascimento Adilson **Comandos Elétricos** - Básico [Periódico] // Teoria Básica. - 2015. - p. 45.

Pamplona Edson de Oliveira e Montevechi José Arnaldo Barra Engenharia **Econômica I** [Periódico] // Engenharia Econômica. - 2006. - p. 103.

Sinocem **Hangzhou Sinocem Building Material Co LTD** [Online] // <http://www.sinocem.cn>. - 2010. - 17 de 09 de 2018. - <http://www.sinocem.cn/steel-tec.asp?Language=4&id=29>.

Thies Eduardo e Zanomi Cícero **Eficiência energética em sistema eletromotriz de ventilação** [Periódico] // rica. - 2016. - Vol. II. - pp. 16-29.

UFG diariodegoias.com.br [Online] // Diário de Goiás. - 19 de Janeiro de 2016. - 20 de Agosto de 2018. - <https://diariodegoias.com.br/cidades/21819-39-da-energia-eletrica-produzida-no-brasil-e-utilizada-por-industrias-aponta-pesquisa-da-ufg>.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. **Motores elétricos assíncronos -especificação, características e manutenção** [Periódico] // DT-6. - 2015. - p. 77.

WEG Equipamentos Elétricos S.A. **DT-6 Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão** – [Artigo]. - julho de 2015. - p. 166.

SILVEIRA, Cristiano Bertulucci. **Citisystems: O que é PWM e para que serve?**. 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em: 20 set. 2018.

AMERICO, Marcio. **EFICIÊNCIA ENERGÉTICA INDUSTRIAL: ACIONAMENTO ELETRÔNICO**. Rio de Janeiro: Procel Indústria, 2004. 83 p.

GONÇALVES, Comercial. **Comercial Gonçalves Equipamentos de Medição**: Analisador de qualidade de energia. [2016]. Disponível em: <<http://www.comercialgoncalves.com.br/Produto-c-1-Analisador-de-Qualidade-de-Energia-Power-Pad-III-Modelo-8336---AEMC-versao-187-187.aspx>>. Acesso em: 13 out. 2018.

UTC PROJETOS E CONSULTORIA S.A.. **SWGR/LER**: Diagrama unifilar Geral. 20. ed. Volta Redonda: Utc, 1998. 1 p.