

Universidade Federal de Uberlândia
Faculdade de Engenharia Elétrica
Graduação em Engenharia Elétrica

GABRIEL MASETE DA SILVA

**Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e
escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética**

**Uberlândia
2020**

GABRIEL MASETE DA SILVA

Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Orientador: Luciano Coutinho Gomes

Assinatura do orientador

Uberlândia
2020

GABRIEL MASETE DA SILVA

Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética

Trabalho apresentado como requisito parcial de avaliação na disciplina Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia.

Banca examinadora

Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes

Prof. Dr. Daniel Pereira de Carvalho

Profa. MsC. Ana Caroline Marques Costa

Uberlândia
2020

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus pela vida e por me conceder esta oportunidade.

Meus sinceros agradecimentos aos meus pais, Sinésio e Regina, que me ensinaram a lutar e nunca desistir, e sempre foram exemplo e inspiração para minha formação pessoal.

À minha irmã, Carolina, que me acompanhou em toda minha formação e me inspira a ser uma pessoa melhor e mais compreensiva a cada dia.

À minha namorada, Maria Inês, pela compreensão, ajuda e amor demonstrados durante toda minha graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luciano Coutinho Gomes, por ter me confiado o desenvolvimento deste trabalho, bem como por estar sempre disposto a me ajudar.

Agradeço a todos os meus colegas de turma, por todos esses anos de amizade e aprendizado; em especial aos meus amigos, Diogo, Lincoln, João Victor e Pedro Tonin que são para mim como uma segunda família.

E por fim, à minha família de Uberlândia, Comunidade Um do Caminho Neocatecumenal, que me acolheu e me deu os suportes necessários durante todos estes anos.

RESUMO

SILVA, G. M. **Análise dos métodos Prático e CEMA para correias transportadoras e escolha do seu conjunto de acionamento sob a luz da eficiência energética.** 2020. Monografia (Bacharelado em Engenharia Elétrica) - Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

As correias transportadoras são um dos meios de transporte mais encontrados no meio industrial. Quando utilizadas, ficam no centro de operações, e são a chave para a lucratividade. Este trabalho irá analisar diferentes métodos de cálculo da potência requerida por uma correia transportadora, a fim de mostrar o quanto é importante escolher um método que visa buscar, de forma mais detalhada, os esforços contidos neste tipo de transportador e dimensionar a potência sem que haja superdimensionamento. O principal objetivo é analisar e compreender o comportamento de carga de uma correia transportadora para diferentes tipos de aplicação e, por consequência, a importância de dimensionar de forma correta o sistema de acionamento a ser utilizado neste tipo de transportador, uma vez que a eficiência energética é um fator essencial para otimizar o uso das fontes de energia. O software MATLAB da companhia MathWorks, auxiliará nos cálculos para obter os resultados através dos diferentes métodos, e, por fim, utilizá-lo-á para definir o melhor método, juntamente com o sistema de acionamento a ser utilizado na correia transportadora.

Palavras-chave: Esteiras transportadoras, Motor de indução trifásico, Eficiência energética.

ABSTRACT

SILVA, G. M. Analysis of the Practical and CEMA methods for belt conveyors and choice of their drive set under the light of energy efficiency. 2020. Monography (Bachelor in Electrical Engineering) - Faculty of Electrical Engineering, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

Belts conveyors are one of the most common means of transport in the industrial environment. When used, they are at the operations center, and are key to profitability. This work will analyze different methods of calculating the function of factors by a belt conveyor, in order to show how important it is to choose a method that seeks, in more detail, the efforts contained in this type of conveyor and to dimension the power without there is oversizing. The main objective is to analyze and understand the loading behavior of a conveyor belt for different types of application and, consequently, an importance of correctly dimensioning the drive system to be used in this type of transport, since energy efficiency it is an essential factor to optimize the use of energy sources. The MATLAB software from the company MathWorks, helps in the calculations to obtain the results through the different methods, and, finally, it will use it to define the best method, together with the drive system to be used on the belt conveyor.

Keywords: belt conveyors, three phase induction motor, energy efficiency

Lista de Figuras

1	Visão geral de uma correia transportadora plana	15
2	Visão geral de uma correia transportadora abaulada	16
3	Componentes do transportador de correia	17
4	Arranjos de abraçamento da correia no tambor de acionamento	17
5	Largura da correia transportadora em função da granulometria do material	18
6	Sistema de apoio típicos de correias transportadoras	18
7	Evolução dos motores elétricos	27
8	Conjunto de acionamento	27
9	Características típicas de um motor de indução trifásico em função do percentual da potência fornecida	29
10	Partida Direta	32
11	Partida Estrela Triângulo	34
12	Chave Compensadora	35
13	Chave Soft-Starter WEG	35
14	Comparativo entre os métodos de partida	36
15	Esquema básico de um inversor de frequência	37
16	Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga	39
17	Tipos de cargas mecânicas	39
18	Conjugado de carga constante	40
19	Conjugado de carga linear	41
20	Conjugado de carga quadrática	41
21	Conjugado de carga inversa	42
22	Modelos de redutores	43
23	Representação da altura de elevação da correia	45
24	Curva de desempenho em carga - Motor WEG IR3 20cv	48
25	Curva de desempenho em carga - Motor WEG IR3 40cv	49

Lista de Tabelas

1	Capacidade volumétrica dos transportadores (C) . m ³ /h a 1.0m/s	19
2	Fator de correção para capacidade volumétrica real	20
3	Velocidades máximas recomendadas (V), em m/s, de materiais a granel	21
4	Largura da correia em função da granulometria do material transportado	21
5	Potência N_v (hp)	23
6	Potência N_1 (hp)	23
7	Potência N_h (hp)	23
8	Potência N_g (hp)	23
9	Fator C_s utilizado na eq. 7, para alguns materiais	25
10	Valores médios para peso linear da correia W_b (km/m)	25
11	Valores do coeficiente X	26
12	Valores do parâmetro K_y	26
13	Valores de rendimento mínimo para motores de projeto padronizado	30
14	Valores de rendimento mínimo para motores de alto rendimento	31
15	Configurações utilizadas para o projeto de correias transportadoras	46
16	Resultados para os métodos Prático e CEMA	46
17	Dados técnicos do motor WEG 20cv	48
18	Dados técnicos do motor WEG 40cv	49

ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CEMA	Conveyor Equipment Manufactures Assosiation
FEELT	Faculdade de Engenharia Elétrica
MIT	Motor de Indução Trifásico
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Sumário

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVOS	13
2	CORREIAS TRANSPORTADORAS	15
2.1	ABORDAGEM GERAL	15
2.2	CORREIAS PLANAS	15
2.3	CORREIAS DE SECÇÃO ABAULADA	16
2.4	COMPONENTES DAS CORREIAS TRANSPORTADORAS	16
2.5	CÁLCULO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS	19
2.6	CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ACIONAMENTO	21
2.6.1	MÉTODO PRÁTICO	22
2.6.2	MÉTODO CEMA	23
3	ACIONAMENTOS	27
3.1	MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO	28
3.2	PARTIDA DE MOTORES	32
3.2.1	PARTIDA DIRETA	32
3.2.2	PARTIDA ESTRELA TRIÂNGULO	34
3.2.3	CHAVE COMPENSADORA	34
3.2.4	CHAVE SOFT-STARTER	35
3.2.5	INVERSOR DE FREQUÊNCIA	36
3.3	CARACTERÍSTICAS DA CARGA ACOPLADA AO MIT	38
3.3.1	CARGAS CONSTANTES	40
3.3.2	CARGAS LINEARES	41
3.3.3	CARGAS QUADRÁTICAS	41
3.3.4	CARGAS INVERSAS	42
3.4	REDUTORES	43
4	DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ACIONAMENTO DE UMA CORREIA TRANSPORTADORA	45
4.1	ANÁLISE DA POTÊNCIA REQUERIDA	45
4.2	DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ACIONAMENTO	47
5	CONCLUSÃO	51
5.1	TRABALHOS FUTUROS	51
	REFERÊNCIAS	53
A	CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO MATLAB	54

1 INTRODUÇÃO

As correias transportadoras detêm uma posição dominante no transporte de materiais em indústrias, minas, portos, entre outros seguimentos, por conta de suas inerentes vantagens, como economia, segurança, confiabilidade, versatilidade e enorme gama de capacidade. Dependendo de sua configuração, as correias transportadoras possuem as características técnicas que permitem o uso em sistemas de transporte de materiais de diferentes portes (MALAGONI, 2013).

No setor minero-metalúrgico, pode-se observar que as correias transportadoras são o meio mais difundido de transporte para grandes quantidades de materiais a granel, reduzindo a quantidade de caminhões e o custo deste tipo de serviço.

As correias transportadoras constituem uma das partes mais importantes do manuseio de materiais devido à sua alta eficiência de transporte. Isto é significativo quando se trata de redução de consumo de energia no setor de manuseio de materiais. Esta tarefa depende, portanto, da melhoria da eficiência energética das correias transportadoras. Conseqüentemente, a eficiência energética torna-se um dos focos de desenvolvimento da tecnologia das correias transportadoras (ZHANG, 2011).

Destaca-se um equipamento essencial para o funcionamento dessas esteiras: O motor de indução trifásico. O motor de indução trifásico é uma máquina capaz de converter a energia elétrica em energia mecânica. A correia transportadora é um sistema típico de conversão de energia elétrica em energia mecânica. Sua eficiência energética pode geralmente ser melhorada em quatro níveis: desempenho, operação, equipamentos e tecnologia. Portanto, o dimensionamento correto do motor de indução trifásico, juntamente com o conjunto de acionamento, se faz essencial quando pensamos nestes quatro níveis de melhoria da correia transportadora, oferecendo a potência elétrica necessária para suprir os esforços mecânicos que necessita para realizar seu trabalho.

1.1 OBJETIVOS

O foco deste trabalho é a análise de como a correia transportadora se comporta como carga, e, por consequência, como o dimensionamento do motor de indução trifásico e dos seus meios de acionamento, podem ser adequados para uma maior eficiência energética em seu conjunto. O objetivo principal é entender como uma correia transportadora se comporta com diferentes cargas, e então dimensionar o motor de indução trifásico junto com seu sistema de acionamento que leve em consideração tais aspectos, afim de aumentar sua eficiência.

Para o cálculo computacional da potência requerida pela correia transportadora, utilizou-se o software MATLAB, produzido pela MathWorks. Nele, foi possível colocar o passo a passo dos cálculos necessários para os diferentes métodos de definição da potência de acionamento de uma correia transportadora.

Após a introdução, o trabalho desenvolvido está organizado como segue:

- O Capítulo 2, oferece um referencial teórico para melhor entendimento deste trabalho. De maneira geral e simplificada, explica-se como funcionam as correias transportadoras, alguns dos diferentes tipos existentes e como é feito o cálculo para chegar na potência necessária de acionamento.
- No Capítulo 3 é detalhado cada componente do sistema de acionamento de uma correia transportadora, bem como as considerações sobre eficiência energética.
- O Capítulo 4 traz o cálculo de projeto de uma correia transportadora para dois tipos de cargas.
- O Capítulo 5 está reservado para as conclusões finais deste trabalho, e algumas últimas considerações.

2 CORREIAS TRANSPORTADORAS

2.1 ABORDAGEM GERAL

De acordo com Indústria (2009), as correias transportadoras são máquinas usadas na manipulação de materiais e são utilizadas em vários processos com a finalidade de gerar um fluxo contínuo de materiais entre diversas operações.

Elas podem ser subdivididas em duas principais categorias, sendo elas:

- Correias Planas e;
- Correias Abauladas.

2.2 CORREIAS PLANAS

As correias transportadoras planas, representada na Figura 1, são utilizadas no transporte de sacas, caixas e também cargas a granel. Tais correias são formadas por uma estrutura normalmente treliçada, dois rolos com eixos e mancais, onde se apoia uma correia infinita. Normalmente, o funcionamento das correias planas é suave, apresentando metade da capacidade das correias abauladas – que serão abordadas a seguir – e funcionando bem a altas velocidades.

Figura 1: Visão geral de uma correia transportadora plana



Fonte: Mecânica... (2020)

2.3 CORREIAS DE SECÇÃO ABAULADA

Conforme visto em Indústria (2009), nestas correias transportadoras, a correia se move através de roletes que são dispostos em ângulo, como mostrado na Figura 2, que a fazem ter uma forma abaulada. Dos sistemas encontrados nas indústrias, este é um dos mais econômicos para transporte de material a granel, por conta de sua alta capacidade de carga, facilidade de carregar e descarregar e, também devido a facilidade na sua manutenção. Este tipo de correia pode transportar diversos tipos de materiais, com ressalva para materiais que são muito úmidos ou pegajosos.

Figura 2: Visão geral de uma correia transportadora abaulada



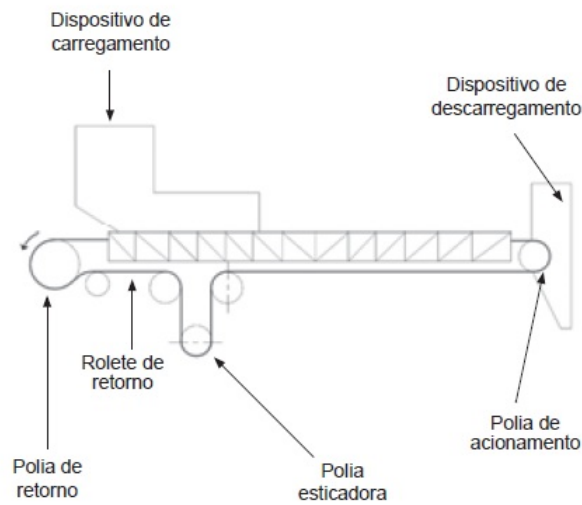
Fonte: Bormax (2020)

2.4 COMPONENTES DAS CORREIAS TRANSPORTADORAS

As correias transportadoras são formadas por elementos de máquinas, tais como mancais e polias, eixos, acoplamentos e motores elétricos, que, em conjunto, são responsáveis por garantir seu funcionamento com a confiabilidade necessária (INDÚSTRIA, 2009).

De forma geral, como observado na Figura 3, as correias apresentam os seguintes componentes:

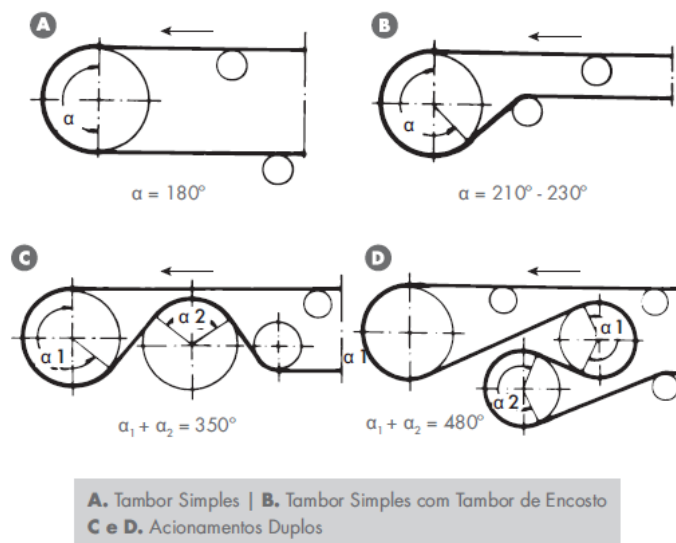
- dispositivos de carregamento e descarregamento;
- polias de acionamento, de retorno e esticadora;
- roletes de carga e de retorno;
- correia transportadora;
- estrutura de suporte de carga; e
- dispositivo de acionamento.

Figura 3: Componentes do transportador de correia

Fonte: Procel... (2009)

O sistema de acionamento é o responsável pela movimentação da correia transportadora e de sua carga. A força de movimentação é transmitida por atrito à correia ao abraçar o tambor de acionamento, que é girado por um motor (MERCÚRIO, 2019).

A Figura 4 mostra os tipos mais comuns de abraçamento da correia nos tambores de acionamento. A sequência A e B, mostram respectivamente, acionamentos simples com ângulos de abraçamento de 180° e 210° a 230° . Já a sequência C e D mostram acionamentos duplos feito com dois tambores, com ângulos de abraçamento de 350° e 480° , respectivamente.

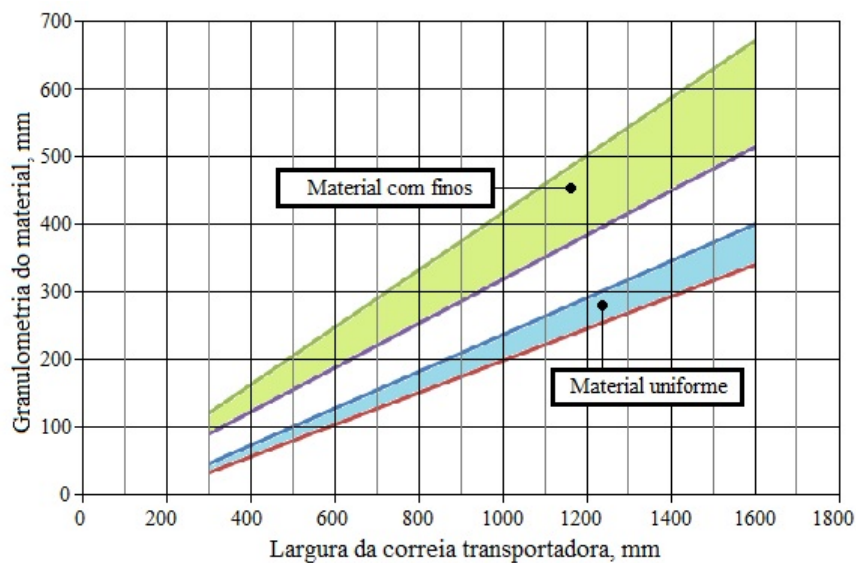
Figura 4: Arranjos de abraçamento da correia no tambor de acionamento

Fonte: Mercúrio (2019)

O ângulo de abraçamento da correia é de suma importância para o cálculo das tensões da correia transportadora, e conseqüentemente para o cálculo da potência do motor utilizado para o acionamento, que será abordado com mais detalhes no Capítulo 4.

A largura mínima de uma correia transportadora é dependente da granulometria do material a ser transportado. Como pode-se observar na Figura 5, a qual mostra larguras mínimas recomendadas para materiais de granulometria uniforme e materiais de formas irregulares ou misturados com partículas mais finas.

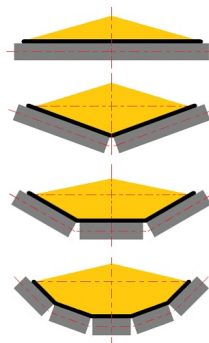
Figura 5: Largura da correia transportadora em função da granulometria do material



Fonte: CTB (2020)

Na Subseção 2.5, será abordado o passo a passo para o cálculo da potência necessária de acionamento de correias transportadoras, onde a quantidade de material transportado por hora depende do sistema de apoio da correia, que é geralmente constituído por um rolete, dois roletes, três roletes, ou até mesmo, cinco roletes (como se pode verificar na Figura 6).

Figura 6: Sistema de apoio típicos de correias transportadoras



Fonte: CTB (2020)

2.5 CÁLCULO DE CORREIAS TRANSPORTADORAS

Existem dois métodos que são empregados para o projeto de correias transportadoras: o Método Prático e o Método CEMA (Conveyor Equipment Manufacturers Association). Os dois métodos citados têm em comum a necessidade de parâmetros importantes de entrada no projeto de correias transportadoras, que dependem, basicamente, das características dos materiais que serão transportados (MALAGONI, 2013).

A capacidade volumétrica (C) de um transportador é calculada em função da área de sua seção transversal, do peso específico do material e também da velocidade (V) da correia. A área da seção transversal, como visto em FAÇO (1981), se dá em função da largura da correia, do número e da inclinação (β) dos roletes e do ângulo de acomodação do material na correia (α), que é uma característica do material quando está em movimento na correia, devido ao nivelamento do material causado pela trepidação da correia nos roletes. A seguir, na Tabela 1, pode-se visualizar, de forma resumida, as capacidades volumétricas de uma correia transportadora horizontal a uma velocidade de $1,0m/s$, composta por três roletes.

Tabela 1: Capacidade volumétrica dos transportadores (C) . m^3/h a $1.0m/s$

Rolos	Ângulo de Acomodação (α)	Largura da Correia								
		24"	30"	36"	42"	48"	54"	60"	72"	84"
Com 3 Rolos iguais (β)=20°	0°	58	95	141	197	261	335	418		
	5°	69	114	169	236	313	401	500		
	10°	82	134	199	277	367	470	586		
	15°	94	154	228	318	424	539	672		
	20°	107	174	258	359	476	609	759		
	25°	120	196	290	402	533	682	759		
	30°	133	217	321	445	590	755	849		
Com 3 Rolos iguais (β)=35°	0°	93	152	226	314	417	553	940	977	1341
	5°	103	169	250	348	462	592	666	1078	1486
	10°	114	156	276	384	509	652	738	1186	1631
	15°	125	204	302	419	556	711	812	1296	1779
	20°	135	221	328	455	603	772	885	1403	1929
	25°	147	240	355	492	652	835	961	1517	2083
	30°	158	258	382	530	702	898	1040	1631	2242
Com 3 Rolos iguais (β)=45°	0°	109	179	265	369	490	627	1118	1143	1572
	5°	118	194	287	399	529	678	782	1233	1697
	10°	128	209	309	430	570	729	909	1326	1822
	15°	137	224	331	480	610	780	972	1419	1950
	20°	147	239	364	492	651	833	1038	1514	2079
	25°	157	255	378	524	694	888	1106	1613	2212
	30°	166	271	401	556	737	942	1173	1711	2349

Fonte: FAÇO (1981).

Conhecendo-se a capacidade volumétrica da Tabela 1, é realizado, através de fatores de correção (ilustrado na Tabela 2), o cálculo da real capacidade volumétrica a uma velocidade a qual será projetada a correia transportadora (V) e também a qual inclinação irá trabalhar (λ) como na Equação 1.

$$C = C_{tab} \times V \times K \quad (1)$$

Onde:

- C = Capacidade volumétrica real;
- C_{tab} = Capacidade volumétrica tabelada;
- V = Velocidade desejada do transportador; e
- K = fator de correção da capacidade de um transportador.

Tabela 2: Fator de correção para capacidade volumétrica real

λ	0°	6°	10°	14°	18°	21°	23°
K	1	0,98	0,95	0,91	0,85	0,78	0,73

Fonte: MALAGONI (2013).

A velocidade da correia transportadora depende muito do tipo de material a ser carregado, pois, ao transportar materiais pesados e de grande granulometria e pontiagudos, como descrito em Indústria (2009), pode ocorrer abrasão nas calhas de descargas quando submetidos a altas velocidades. Já os materiais secos e muito finos, que são os materiais em forma de pó, quando submetidos a altas velocidades causam poeiras.

A seguir, na Tabela 3, é mostrado as velocidades máximas para o transportador em função das características dos materiais transportados.

Para a seleção da largura da correia transportadora, precisa-se, simultaneamente, da capacidade volumétrica desejada e da porcentagem de tamanho máximo do material (granulometria) – Tabela 4.

Tabela 3: Velocidades máximas recomendadas (V), em m/s, de materiais a granel

Largura da Correia pol	Cereais e outros materiais de Escoamento fácil não abrasivos	Carvão, terra, minérios desagregados, pedra brita fina pouco abrasivos	Minério e pedras duros, poteagudos, pesados e muito abrasivos
16	2,5	1,6	1,6
20	3,0	2,0	1,8
24	3,0	2,5	2,3
30	3,6	3,0	2,8
36	4,1	3,3	3,0
42	4,1	3,6	3,0
48	4,6	3,6	3,3
54	4,1	3,6	3,3
60	5,1	3,6	3,3
66	-	4,1	3,8
72	-	4,1	3,8

Fonte: FAÇO (1981)

Tabela 4: Largura da correia em função da granulometria do material transportado

Largura da correia (pol)	Tamanho máximo do material (m)					
	$\alpha = 10^\circ$ 90% pedaços e 10% finos	$\alpha = 10^\circ$ 100% pedaços	$\alpha = 20^\circ$ 90% pedaços e 10% finos	$\alpha = 20^\circ$ 100% pedaços	$\alpha = 30^\circ$ 90% pedaços e 10% finos	$\alpha = 30^\circ$ 100% pedaços
16	0,2	0,13	0,13	0,08	0,07	0,04
24	0,3	0,20	0,20	0,12	0,10	0,06
36	0,46	0,30	0,30	0,18	0,15	0,09
48	0,61	0,41	0,41	0,24	0,20	0,12
54	0,69	0,46	0,46	0,27	0,23	0,14

Fonte: MALAGONI (2013)

2.6 CÁLCULO DA POTÊNCIA DE ACIONAMENTO

Geralmente, o acionamento da correia transportadora é realizado através de um único tambor ou por dois tambores, que são, respectivamente os acionamentos simples e duplo. Como visto em Mercúrio (2019), a potência de acionamento da correia transportadora é composta de 4 importantes parcelas:

- Potência para mover a correia vazia (N_v);
- Potência para mover a carga na horizontal (N_1);
- Potência para elevar ou descer o material (N_h), existentes nos transportadores em aclave ou declive; e
- Potência para vencer o atrito de acessórios da correia, como: rapadores, limpadores, etc. (N_g).

A seguir, serão apresentados os dois métodos citados na seção 2.5: Método prático e método CEMA.

2.6.1 MÉTODO PRÁTICO

O método Prático, mais simplificado, dedica-se ao uso de transportadores simples e de pequena capacidade. Neste método, são usadas tabelas e gráficos para se calcular a potência do motor de acionamento da correia.

Primeiramente, é calculada a potência necessária para o transporte do material, e, em seguida, as tensões na correia. Essa potência, chamada de potência efetiva, é calculada através da Equação 2.

$$N_e = V(N_v + N_g) + \left(\frac{Q}{27,8}\right)(N_1 \pm N_h) \quad (2)$$

Onde:

- N_e representa a potência total efetiva;
- V representa a velocidade de projeto;
- N_v representa a potência para acionar o motor a vazio a uma velocidade de 1,0m/s;
- N_g representa a potência para vencer o atrito das guias laterais à velocidade de 1,0 m/s;
- Q representa a capacidade mássica (t/h);
- N_1 representa a potência para deslocar 27,8 kg/s de material de uma distância na horizontal; e
- N_h representa a potência para elevar ou descer 27,8kg de material a uma dada altura.

Calculada a potência efetiva N_e , obtém-se a tensão efetiva na correia, Equação 3, que é a força tangencial que movimentará a correia.

$$T_e = \frac{75N_e}{V} \quad (3)$$

Onde:

- T_e representa a tensão efetiva na correia.

Para se obter alguns dos parâmetros utilizados na equação 2, são dados, de uma forma resumida, pelas tabelas 5, 6, 7 e 8.

Tabela 5: Potência N_v (hp)

Largura da correia (m)	Comprimento total do transportador (m)												
	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
16	0,37	0,47	0,54	0,61	0,7	0,8	0,9	1,01	1,1	1,2	1,31	1,42	1,53
20	0,45	0,55	0,64	0,72	0,81	0,95	1,09	1,2	1,32	1,42	1,54	1,67	1,8
24	0,57	0,7	0,83	0,91	1,01	1,2	1,33	1,52	1,67	1,8	1,92	2,06	2,19
30	0,69	0,81	0,97	1,1	1,22	1,44	1,66	1,83	2,04	2,19	2,39	2,55	2,71

Fonte: MALAGONI (2013)

Tabela 6: Potência N_1 (hp)

Distância na horizontal (m)	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100	110
N_1 (hp)	0,5	0,6	0,74	0,81	0,95	1,1	1,25	1,4	1,5	1,64	1,75	1,87	2,1

Fonte: MALAGONI (2013)

Tabela 7: Potência N_h (hp)

Distância na vertical (m)	2	3	5	7,5	10	12,5	15	17,5	20	22,5	25	27,5	30
N_h (hp)	0,8	1,2	1,9	2,8	3,7	4,7	5,6	6,5	7,4	8,4	9,3	10,2	11,1

Fonte: MALAGONI (2013)

Tabela 8: Potência N_g (hp)

Comprimento das guias laterais (m)	5	10	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
N_g (hp)	0,6	1,26	2,52	3,18	3,84	4,56	5,28	6	6,72	7,4	8,1	8,9	9,6

Fonte: MALAGONI (2013)

2.6.2 MÉTODO CEMA

No método CEMA (ZHANG, 2011), as tensões são calculadas inicialmente em cada lance da correia transportadora através da equação 4.

$$T_e = L(K_x + k_y W_b + 0,015 W_b) \pm HW_m + T_a \quad (4)$$

Onde:

- T_e representa a tensão efetiva na correia;
- L representa o comprimento do transportador;
- K_x representa a resistência à rotação dos roletes e ao deslizamento da correia sobre os mesmos;
- K_y representa o fator relativo às resistências à flexão da correia e do material sobre os roletes;

- W_b representa o peso linear da correia;
- H representa a altura de elevação ou descida do material na correia;
- W_m representa o peso do material na correia; e
- T_a representa a tensão para vencer o atrito dos acessórios e para acelerar o material.

Após obter-se a tensão efetiva, é determinada a potência efetiva necessária para o transporte do material, através da equação 5.

$$N_e = \frac{T_e V}{75} \quad (5)$$

Através da soma das parcelas indicadas abaixo, obtém-se a tensão para vencer o atrito dos acessórios (Equação 6).

$$T_a = F_g + F_d + F_1 + F_a \quad (6)$$

Onde:

- F_g representa a força necessária para vencer o atrito do material com as guias laterais;
- F_d representa a força necessária para vencer o atrito dos desviadores. Para 100% de material desviado, o valor de F_d - que é dado em *kgf*) é de 0,55 vezes o valor da largura da correia B , enquanto que para 50%, o valor é de 0,36 vezes a largura da correia;
- F_1 representa a força necessária para vencer o atrito dos raspadores e limpadores. Seu valor é de 1,15 vezes a largura da correia, para cada raspador ou limpador; e
- F_a representa força necessária para acelerar o material.

Os parâmetros para o cálculo de F_g são dados através da Equação 7.

$$F_g = 0,01488C_s L_g B^2 + 8,92L_g \quad (7)$$

Sendo:

- C_s o fator devido ao atrito do material com as guias (Tabela 9);
- L_g o comprimento das guias laterais; e
- B a largura da correia.

Tabela 9: Fator C_s utilizado na eq. 7, para alguns materiais

C_s	Material
0,1378	Areia seca de aterro
0,1881	Bauxita, resíduos
0,1086	Rocha fosfática
0,276	Minério de ferro

Fonte: MALAGONI (2013)

O Cálculo de F_a é dado através da Equação 8.

$$F_a = \frac{Q(V^2 - V_c^2)}{36V} \quad (8)$$

Onde: V_c é a componente da velocidade do material na direção do deslocamento da correia.

Na equação 10, será calculado o valor de K_x , parâmetro da equação 4. Para isso, deve-se determinar o valor do peso linear da correia que é retirado da Tabela 10.

Tabela 10: Valores médios para peso linear da correia W_b (km/m)

Largura da correia (m)	Peso específico do material (kg/m^3)		
	570-1410	860-2450	2470-3800
18	5,2	6	6,7
24	6,7	8,2	9
30	9	10,4	12
36	13,4	15	17,86
42	16,4	17,86	21
48	20,8	22,3	25,3
83	37,2	44,6	49,1
96	44,6	52,1	56,6

Fonte: MALAGONI (2013)

Esses valores da Tabela 10 devem ser considerados como uma primeira aproximação, já que, após conhecida a correia, seu peso deverá ser recalculado. O peso linear W_m é dado através da Equação 9.

$$W_m = 0,277 \frac{Q}{V} \quad (9)$$

Portanto:

$$K_x = 0,00067(W_m + W_b) + \frac{X}{a} \quad (10)$$

Onde:

- X é o coeficiente função dos diâmetros do eixo do rolo e dos roletes (Tabela 11); e
- a é o espaçamento entre os roletes.

Tabela 11: Valores do coeficiente X

X	Diâmetro dos rolos (m)	Série dos rolos
1,5	0,15	CEMA C6, D6
1,8	0,13	CEMA B5, C5, D5
2,3	0,10	CEMA B4, C4
2,4	0,18	CEMA E7
2,8	0,15	CEMA E6

Fonte: MALAGONI (2013)

Por fim, o último parâmetro necessário para o cálculo da potência de acionamento da correia transportadora pelo método CEMA, o K_y , pode ser retirado da Tabela 12, a qual está colocada de forma resumida.

Tabela 12: Valores do parâmetro K_y

Comprimento total do transportador L (m)	$W_b + W_m$ (kg/m)	Ângulo de inclinação da correia, em graus.						
		0	2	3,5	5	7	14	18
76	30	0,035	0,035	0,034	0,031	0,031	0,031	0,031
	74,4	0,035	0,034	0,033	0,032	0,031	0,028	0,027
	111,6	0,035	0,034	0,032	0,032	0,03	0,027	0,025
	149	0,035	0,033	0,032	0,031	0,03	0,026	0,023
	223,2	0,035	0,035	0,034	0,033	0,031	0,025	0,021
	297,6	0,035	0,035	0,035	0,035	0,032	0,024	0,018
	372	0,035	0,035	0,035	0,035	0,033	0,021	0,018
	446,4	0,035	0,035	0,035	0,035	0,032	0,019	0,018
244	30	0,035	0,031	0,030	0,029	0,029	0,029	0,029
	74,4	0,032	0,029	0,028	0,026	0,025	0,021	0,018
	111,6	0,031	0,029	0,026	0,024	0,022	0,016	0,016
	149	0,031	0,028	0,025	0,022	0,02	0,016	0,016
	223,2	0,034	0,028	0,023	0,019	0,017	0,016	0,016
	297,6	0,035	0,027	0,021	0,016	0,016	0,016	0,016
	372	0,035	0,026	0,020	0,017	0,016	0,016	0,016
	446,4	0,035	0,025	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018
427	74	0,029	0,026	0,024	0,022	0,021	0,016	0,016
	111,6	0,028	0,024	0,021	0,019	0,016	0,016	0,016
	149	0,028	0,023	0,019	0,016	0,016	0,016	0,016
	223,2	0,029	0,02	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
	297,6	0,03	0,021	0,016	0,016	0,016	0,016	0,016
	372	0,03	0,02	0,017	0,016	0,016	0,016	0,016
	446,4	0,03	0,019	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018

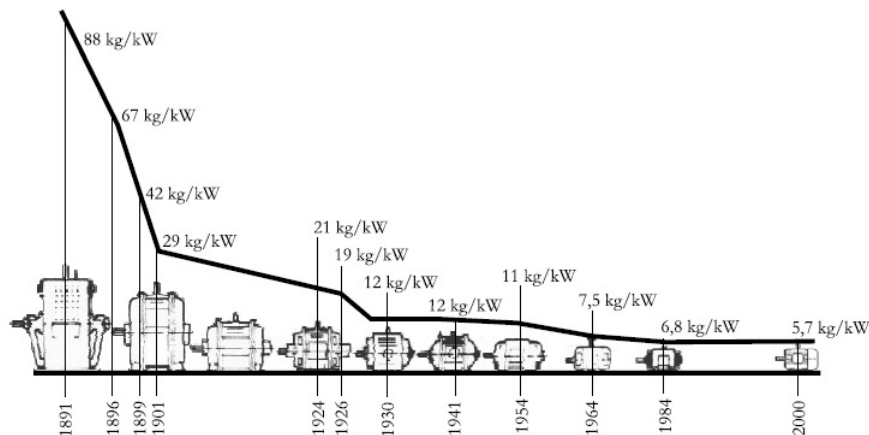
Fonte: MALAGONI (2013)

Exposto isso, fica evidente a importância do correto dimensionamento de um sistema de acionamentos que seja capaz por em funcionamento as correias transportadoras. Para tanto, fica reservado ao próximo capítulo o estudo dos diferentes métodos de acionamentos, bem como suas aplicações práticas.

3 ACIONAMENTOS

Para obter-se um bom dimensionamento de um motor elétrico, é necessário ter o conhecimento tanto das características mecânicas do motor, quanto da carga, do sistema de alimentação e do local de instalação (GOMES, 2018). O motor de indução que utiliza o campo girante, inventado por Nikola Tesla como visto em EDUCAÇÃO (2006), desenvolvido entre 1888 e 1890 é o mais semelhante aos motores atuais. Os motores elétricos, ao longo dos anos, têm passado por uma série de melhorias. Na Figura 7, pode-se visualizar a relação peso-potência de um motor de indução trifásico ao longo dos anos, que, por conta de sua evolução construtiva e avanços nas técnicas de isolamento, bem como a redução da secção dos condutores, é necessário cada vez menos espaço para um motor que atua com uma mesma potência de antigamente.

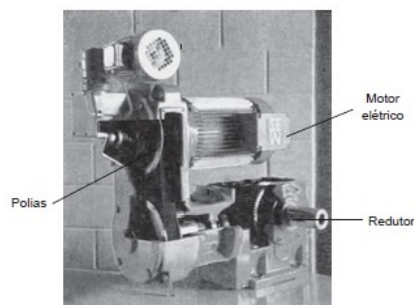
Figura 7: Evolução dos motores elétricos



Fonte:EDUCAÇÃO (2006)

O conjunto de acionamento de uma correia transportadora consiste em combinar um motor elétrico com acionamento por polias e correias em v, ou um redutor, dependendo da potência, velocidade (única ou múltipla) e condições econômicas. Na Figura 8 pode-se ver um exemplo de um sistema de acionamento contendo motor, polias e redutor.

Figura 8: Conjunto de acionamento



Fonte:Indústria (2009)

A escolha correta do motor é um fator decisivo para poder reduzir custos relacionados à energia elétrica em uma empresa. Neste capítulo será feita uma abordagem sobre classificação dos motores elétricos, diferentes regime de trabalho de cargas e os variados tipos de acionamentos, a fim de buscar o acerto na escolha para o acionamento de uma esteira transportadora.

3.1 MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO

Na engenharia de aplicação de motores é comum, em muitos casos práticos, comparar as exigências da carga com as características do motor. Com o advento dos computadores, os cálculos puderam ser aprimorados, obtendo-se assim, um resultado preciso, que resulta em um dimensionamento de máquinas de maneira mais econômica.

O meio mais adequado de reduzir os gastos de energia na atualidade é usar motores de alto rendimento, de linha *Premium* ou *Super Premium*, como visto em WEG (2014). Estes motores especiais tem até 30% a menos de perdas, o que significa uma real economia.

Vale ressaltar que esses motores não são a solução definitiva para todos os problemas relacionados à energia, pois também são suscetíveis a fatores como: condições do alimentador, método de acionamento, ambiente de trabalho, entre outros.

As perdas de potência de um motor (P), Equação 12, subtraídas da potência elétrica absorvida da rede (P_{el}), resultam na potência mecânica (P_m) disponível no eixo do motor. A relação entre a potência mecânica disponível no eixo e a potência elétrica absorvida da rede, é denominada o rendimento do motor (η), como demonstrado nas Equações 11 e 13 abaixo.

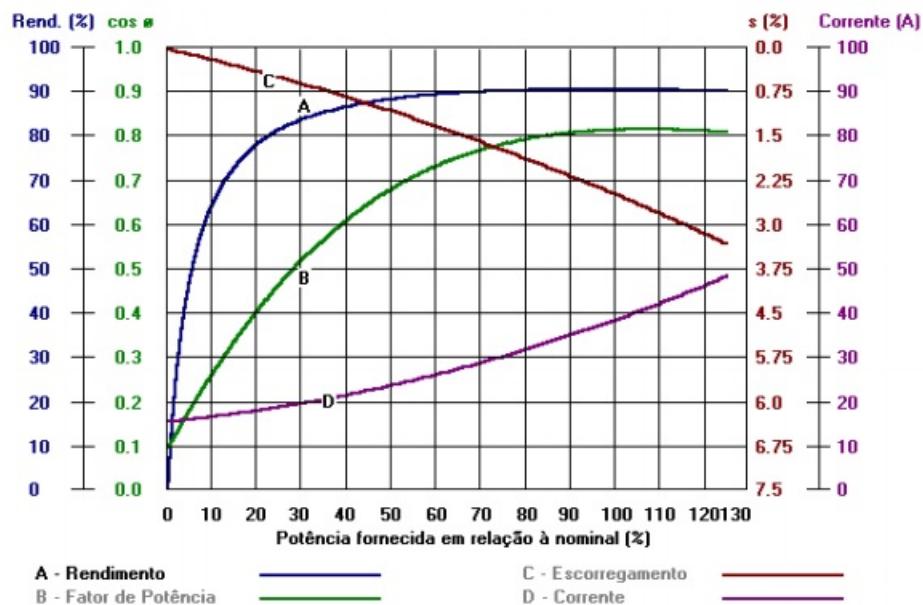
$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} \quad (11)$$

$$P_{el} = P_m + \sum P \quad (12)$$

$$\eta = \frac{P_m}{P_{el}} = \frac{P_m}{P_m + \sum P} = \frac{P_{el} - \sum P}{P_{el}} \quad (13)$$

A seguir, na Figura 9, é mostrado as características típicas de um motor de projeto padrão em função da potência mecânica. É importante notar que há um patamar onde cobre uma ampla faixa do percentual da potência fornecida com altos rendimentos.

Figura 9: Características típicas de um motor de indução trifásico em função do percentual da potência fornecida



Fonte: WEG (2020b)

A melhoria em pontos vitais onde se concentram a maioria das perdas em um motor elétrico, é a principal característica de um motor de alto rendimento (EDUCAÇÃO, 2006). Estes pontos vitais são:

- O aumento da quantidade de cobre nos enrolamentos do estator;
- Projeto otimizado das ranhuras;
- Superdimensionamento das barras do rotor para diminuir as perdas por efeito Joule;
- Diminuição da intensidade do campo magnético;
- Utilização de chapas magnéticas de boa qualidade para reduzir perdas no ferro e a corrente de magnetização;
- Instalação de rolamentos adequados;
- Otimização do projeto de ventiladores para diminuir as perdas por atrito e ventilação;
- Regularidade no entre-ferro;
- Melhoria no isolamento; e
- Tratamento térmico das chapas do estator e do rotor para reduzir as perdas adicionais.

Esses melhoramentos vistos acima acarretam em um aumento do custo do motor, porém, quando projetado para um acionamento, ambiente de trabalho, e condições adequados, trás resultados importantes para a economia de energia.

Abaixo, as Tabelas 13 e 14 mostram os rendimentos mínimos para motores de projeto padronizado e para os motores de alto rendimento, respectivamente, de forma resumida, que estão definidos através da Norma Técnicas (2018).

Tabela 13: Valores de rendimento mínimo para motores de projeto padronizado

Potência nominal		Número de polos			
		2	4	6	8
kW	cv	Rendimento nominal			
0,12	0,2	60	64	51	40
0,18	0,3	64	68	55	46
0,25	0,3	68	70	60	52
0,37	0,5	72	72	64	58
0,55	0,8	74	76	68	62
0,75	1	80	81	80	70
1,1	1,5	83	82	77	77
1,5	2	84	84	83	83
2,2	3	85	85	83	84
3	4	85	86	85	85
3,7	5	88	88	88	86
4,4	6	88	89	88	86
5,5	7,5	89	90	88	86
7,5	10	90	90	89	89
9,2	13	90	90	89	89
11	15	90	91	90	89
15	20	90	91	90	90
18,5	25	91	92	92	90
22	30	91	92	92	91
30	40	92	93	93	91
37	50	92	93	93	92
45	60	93	94	94	92
55	75	93	94	94	93
75	100	94	95	94	93
90	125	95	95	94	94
110	150	95	95	95	94
132	175	95	95	95	95
150	200	95	95	95	95
185	250	95	95	95	95
220	300	95	96	95	95
260	350	95	96	95	95
300	400	-	96	95	-
330	450	-	96	95	-
370	500	-	96	-	-

Fonte: Técnicas (2018)

Tabela 14: Valores de rendimento mínimo para motores de alto rendimento

Potência nominal		Número de polos			
		2	4	6	8
kW	cv	Rendimento nominal			
0,12	0,2	62	66	64	60
0,18	0,3	66	70	68	64
0,25	0,3	70	73	69	68
0,37	0,5	73	78	75	72
0,55	0,8	77	79	80	74
0,75	1	81	84	83	76
1,1	1,5	84	87	88	79
1,5	2	86	87	89	84
2,2	3	87	90	90	86
3	4	89	90	90	87
3,7	5	89	90	90	87
4,4	6	89	90	90	87
5,5	7,5	90	92	91	87
7,5	10	90	92	91	90
9,2	13	91	92	92	90
11	15	91	92	92	90
15	20	91	93	92	90
18,5	25	92	94	93	90
22	30	92	94	93	92
30	40	92	94	94	92
37	50	93	95	94	92
45	60	94	95	95	92
55	75	94	95	95	94
75	100	94	95	95	94
90	125	95	95	95	94
110	150	95	96	96	94
132	175	95	96	96	95
150	200	95	96	96	95
185	250	96	96	96	95
220	300	96	96	96	95
260	350	96	96	96	95
300	400	96	96	96	95
330	450	96	96	96	95
370	500	96	96	96	95

Fonte: Técnicas (2018)

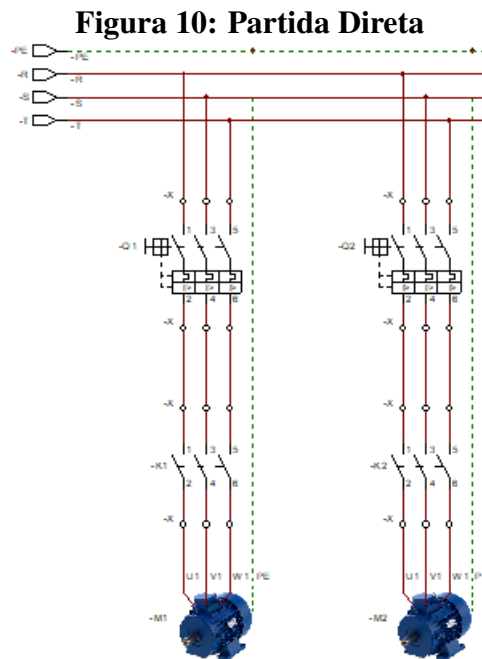
Em agosto de 2019, como visto em WEG (2020a), entrou em vigor uma nova lei que estabelece os níveis máximos de consumo de energia, ou os níveis mínimos de eficiência dos motores elétricos trifásicos de indução, a serem todos IR3. Seguindo assim, a Tabela 14 da NBR 17094-1.

3.2 PARTIDA DE MOTORES

Geralmente, no momento da partida de um Motor de Indução Trifásico (MIT), a sua corrente elétrica pode atingir picos de seis a sete vezes da sua corrente nominal (INDÚSTRIA, 2009). Na maioria das aplicações, industriais ou residenciais, pequenos motores podem partir com ligação direta, sem que haja quedas de tensão na rede e sem que demore para atingir sua velocidade nominal. Porém, em casos onde a corrente de partida é muito alta, é necessário recorrer a outros métodos de acionamento de motores (que serão vistos nessa seção), uma vez que picos de corrente tendem a causar quedas de tensões na rede de alimentação.

3.2.1 PARTIDA DIRETA

O esquema a seguir, representado na Figura 10, mostra como funciona uma partida direta. Tal técnica de acionamento é a mais simplória dentre os principais meios de acionamento, visto que consiste apenas em ligar o motor diretamente à rede, através de dispositivos de proteção e acionamento, como disjuntores e contatores.



Fonte: O Autor.

Os disjuntores e contatores deverão ser capazes de ligar e desligar o motor em qualquer situação: normal, partida e sobrecarga. Também terão que suportar o efeito térmico da corrente em regime permanente do motor (GOMES, 2018). Como tal método de acionamento não emprega nenhuma estratégia específica, é o que possui piores índices relacionados a corrente de partida (a corrente de partida não é reduzida de nenhuma fração, como acontece nos outros meios de acionamento). No entanto, destaca-se a vantagem econômica proporcionada por esse meio de acionamento – é o mais barato dentre todos.

Para o motor de indução trifásico, é escolhido contatores da categoria AC3, onde a corrente de ruptura (I_{rup}) deverá ser de 6 a 8 vezes o valor da corrente nominal do contator. As Equações 14, 15 e 16 representam os requisitos para o dimensionamento de um contator.

$$I_c \geq I_n \quad (14)$$

$$I_c \geq (I_{conexao})/6 \quad (15)$$

$$I_c \geq (I_{rup})/(6ou8) \quad (16)$$

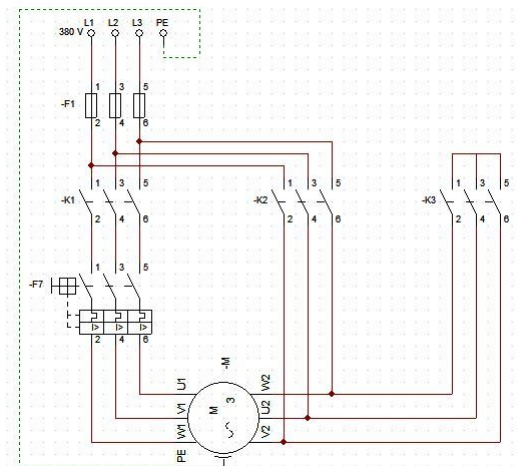
Onde:

- $I_{conexao}$ é a máxima corrente no instante da partida;
- I_{rup} é a máxima corrente a ser interrompida eventualmente; e
- I_n é a corrente nominal do motor.

3.2.2 PARTIDA ESTRELA TRIÂNGULO

Essa partida consiste em ligar os enrolamentos do motor em estrela na partida e, após o motor atingir uma velocidade próxima a síncrona, faz-se a comutação da ligação em estrela para a ligação em triângulo – Figura 11 (GOMES, 2018).

Figura 11: Partida Estrela Triângulo



Fonte: Partida... (2019).

Nota-se que a partida estrela triângulo é aplicada em motores dos quais os terminais dos enrolamentos estão disponíveis para ligação em triângulo (6 terminais).

Esse mecanismo de acionamento garante uma redução na corrente de partida à fração de $1/3$. No entanto, também provoca uma redução no torque de partida em $1/3$.

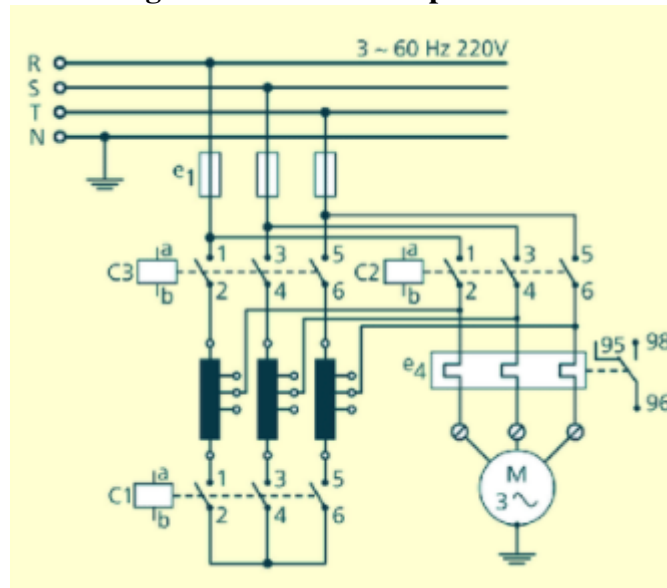
Durante muito tempo, pelo fato de atender bem as necessidades básicas e ser mais viável economicamente, tal chave de partida foi utilizada amplamente na indústria.

3.2.3 CHAVE COMPENSADORA

Este tipo de partida, representado na Figura 12, é recomendado a motores de altas potências, com grande inércia e partindo com carga. Sua realização se dá em dois tempos:

- **1º:** Acionamento do motor sob tensão reduzida, através de um autotransformador. Isso faz com que o pico de corrente e o conjugado na partida sejam reduzidos proporcionalmente ao quadrado da relação de transformação.
- **2º:** Abre-se o ponto neutro do autotransformador e é feita a conexão do motor sob tensão nominal, que retorna a suas características nominais.

As chaves compensadoras são geralmente projetadas para um pico de corrente e um conjugado na partida de 0,42 ou 0,64 dos valores nominais em partida direta, conforme o tap do autotransformador, como pode-se observar na Figura 12.

Figura 12: Chave Compensadora

Fonte: ResarchGate (2015).

Esse tipo de acionamento garante uma flexibilidade maior no sistema, uma vez que é possível definir o tap do autotransformador o qual a partida se iniciará.

Assim, a redução da corrente de partida – e consequentemente do conjugado do motor – pode ser mais brusca ou mais branda.

Destaca-se que uma clara desvantagem em tal método de acionamento é seu elevado custo de implementação.

3.2.4 CHAVE SOFT-STARTER

As chaves de partida estática conforme Gomes (2018), são dispositivos de manobra micro-processados. O intuito da Soft-Starter, Figura 13, é mitigar os altos conjugados de aceleração do motor e também os picos de corrente na partida.

Figura 13: Chave Soft-Starter WEG

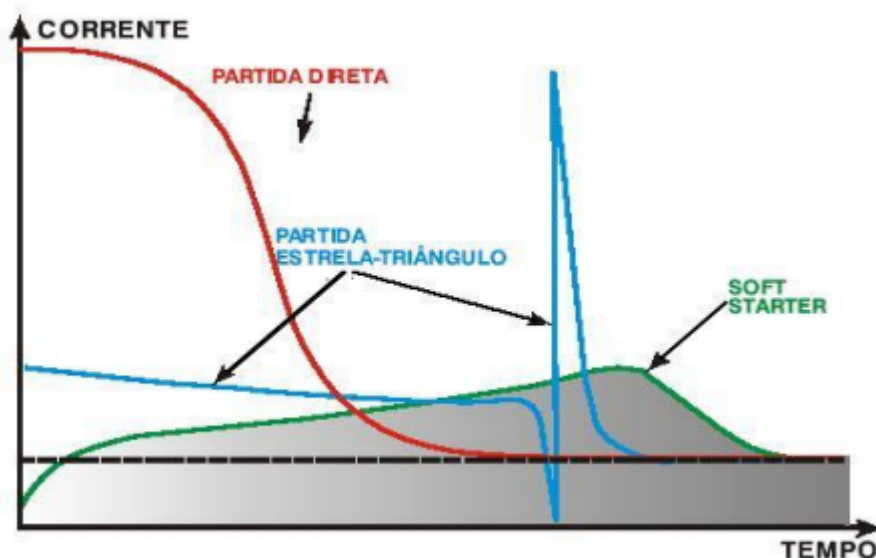
Fonte: WEG (2020c).

As Soft-Starters possuem diversas características e vantagens para o acionamento de motores, dentre elas:

- Ajuste da tensão de partida em um tempo pré-definido
- Proteção integrada, contra falta de fase, sobrecorrente, subcorrente, etc
- Proteção de sobre e subtensão no motor
- Redução acentuada dos esforços sobre os acoplamentos e dispositivos de transmissão (redutores, polias, engrenagens, correias, entre outros)
- Aumento da vida útil do motor e equipamentos mecânicos da máquina acionada
- Facilidade de operação, programação e manutenção via interface de operação
- Simplificação da instalação elétrica

Na Figura 14, pode-se perceber o quanto a corrente de partida de um motor é mais suave quando usada a Soft- Starter.

Figura 14: Comparativo entre os métodos de partida



Fonte: UNESP (2020).

3.2.5 INVERSOR DE FREQUÊNCIA

A utilização de inversores de frequência para acionamentos industriais tem aumentado de forma significativa nos últimos anos, por proporcionarem facilidade de controle e economia de energia (DIAS, 1988).

O inversor de frequência consegue, com sua configuração, partir grandes motores com carga acoplada ao eixo, sem que haja quedas de tensão e correntes elevadas, podendo assim, ser utilizado em processos que precisam de variação de velocidade ou até que possuam variados tipos de cargas.

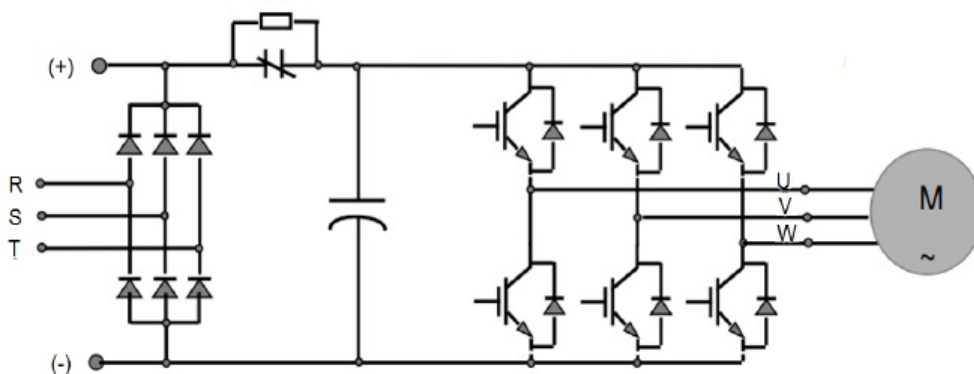
Os inversores são encontrados com dois tipos de controle a serem utilizados: o vetorial e o escalar.

Inversores com o controle escalar, apresentam ao motor uma determinada tensão e frequência, visando manter constante a relação "tensão / frequência", que é a responsável por manter a capacidade de torque do motor.

Já os inversores com controle vetorial, possuem a alta precisão do controle da velocidade e do torque do motor.

A seguir, na Figura 15, é mostrado o esquema básico de um inversor de frequência.

Figura 15: Esquema básico de um inversor de frequência



Fonte: Silva (2007).

Na seção retificadora, os seis diodos representados na Figura 15, que estão situados no circuito de entrada do inversor, retificam a tensão trifásica da rede de entrada (R, S e T), a tensão contínua resultante é filtrada pelo capacitor e utilizada como entrada para a seção inversora.

Na seção inversora, a tensão retificada é convertida novamente em trifásica e alternada. Os transistores chaveiam várias vezes por ciclo, gerando pulsos com largura que varia senoidalmente. Esta saída de tensão, irá gerar em um motor, uma forma de onda de corrente bem próxima da senoidal através do enrolamento do motor.

3.3 CARACTERÍSTICAS DA CARGA ACOPLADA AO MIT

Uma carga mecânica sempre requer uma determinada potência, como afirmado em Dias (1988). Isso implica que tal carga necessita de um determinado conjugado a uma dada velocidade de rotação. Ou seja, para um determinado sistema dotado de movimento de rotação, tem-se:

$$P = C \times \omega \quad (17)$$

Onde:

- P é a potência desenvolvida (KW);
- C é o conjugado (Nm); e
- ω é a velocidade angular de rotação (rad/s).

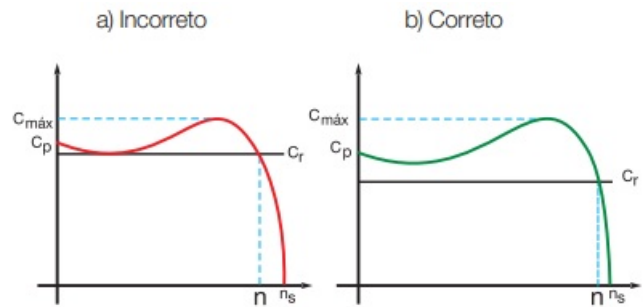
Na seleção correta dos motores, é importante considerar as características técnicas de aplicação e as características de carga, meio ambiente e alimentação no que se refere a aspectos mecânicos para calcular:

1) O Conjugado de partida

É o conjugado necessário para vencer a inércia estática e produzir movimento. Para que uma carga atinja sua velocidade nominal partindo do zero, é necessário que o conjugado do motor seja sempre superior ao conjugado da carga (WEG, 2014).

2) O Conjugado de aceleração

É o conjugado requerido para acelerar a carga à velocidade nominal. O conjugado da carga deve ser sempre menor que o conjugado do motor em todos os pontos entre zero e a rotação nominal (WEG, 2014). No ponto onde as curvas se interceptam, o conjugado de aceleração é nulo, isso significa que é atingido o ponto de equilíbrio a partir do qual a velocidade não varia mais, ou seja, permanece constante. Este ponto sempre deve corresponder a velocidade nominal. A Figura 16 mostra a forma correta e incorreta para seleção de um motor considerando o conjugado resistente da carga.

Figura 16: Seleção de motor considerando o conjugado resistente da carga

Fonte: WEG (2014).

Onde:

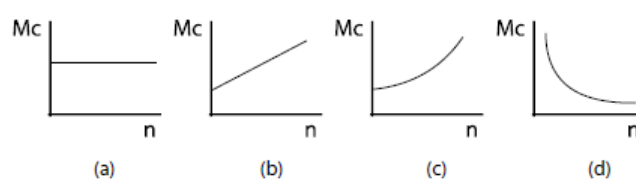
- C_{max} = Conjugado Máximo;
- C_p = Conjugado de Partida;
- C_r = Conjugado Resistente;
- n_s = Rotação Síncrona; e
- n = Rotação Nominal.

3) O Conjugado nominal

Este é o necessário para mover a carga em condições de funcionamento à velocidade específica (WEG, 2014). O conjugado nominal necessário para funcionamento de uma máquina pode ser constante ou variável entre amplos limites. Essas características de funcionamento de uma máquina, quanto ao conjugado, podem dividir-se em quatro classes que serão descritas abaixo.

A curva característica do conjugado e o momento e inércia da carga são necessários para o cálculo do tempo de partida de um motor (EDUCAÇÃO, 2006). O desconhecimento dessas características resultam em um dos principais fatores para o superdimensionamento de motores.

Os quatro tipos de cargas mecânicas representados na Figura 17 são praticamente os que existem nas indústrias. A esteira transportadora se enquadra na carga do tipo conjugado constante, 17(a).

Figura 17: Tipos de cargas mecânicas

Fonte: EDUCAÇÃO (2006).

Essas cargas podem ser representadas através da Equação 18.

$$C = k_1 + k_2 \times n^x \quad (18)$$

Onde:

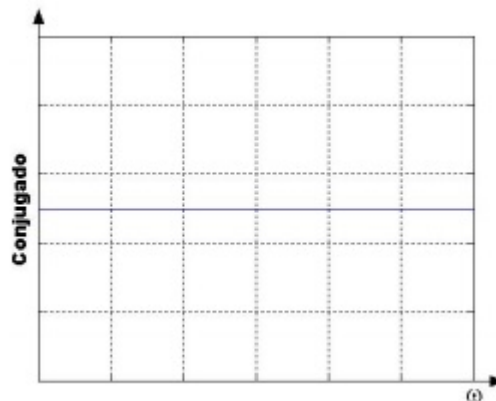
- n representa a rotação (*rpm*);
- K_1 e K_2 constantes a serem determinadas; e
- x representa o coeficiente de variação do conjugado.

3.3.1 CARGAS CONSTANTES

As cargas constantes praticamente independem da rotação. Apresentam pouca ou nenhuma variação de conjugado resistente exigido do motor. Sendo assim, o seu valor permanece constante com o aumento da velocidade. Como exemplos de carga constante, têm-se: guinchos, guindastes, correias transportadoras sob carga constante.

A Figura 18 representa o comportamento dessa carga.

Figura 18: Conjugado de carga constante



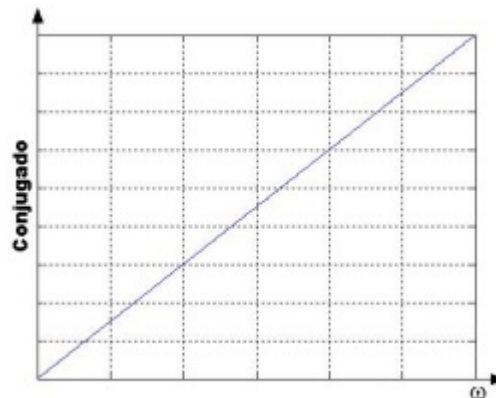
Fonte: Silva (2007).

3.3.2 CARGAS LINEARES

As cargas lineares variam, como o próprio nome diz, linearmente com a rotação. Este tipo de carga é encontrado em diversas aplicações, dentre elas: moinhos de rolos, bombas de pistão e serras para madeiras (DIAS, 1988).

A Figura 19 representa o comportamento do conjugado deste tipo de carga.

Figura 19: Conjugado de carga linear



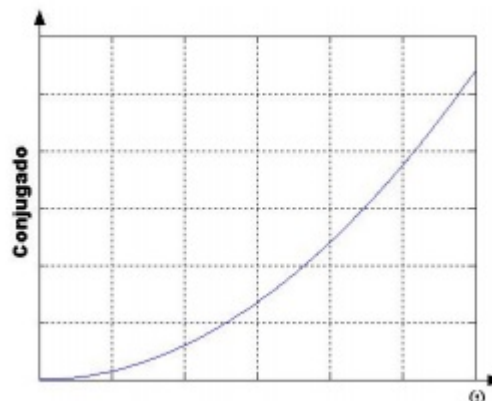
Fonte: Silva (2007).

3.3.3 CARGAS QUADRÁTICAS

As cargas quadráticas variam com o quadrado do movimento de rotação e são encontradas em aplicações como: ventiladores, centrífugas e exaustores.

A Figura 20 representa o seu comportamento.

Figura 20: Conjugado de carga quadrática



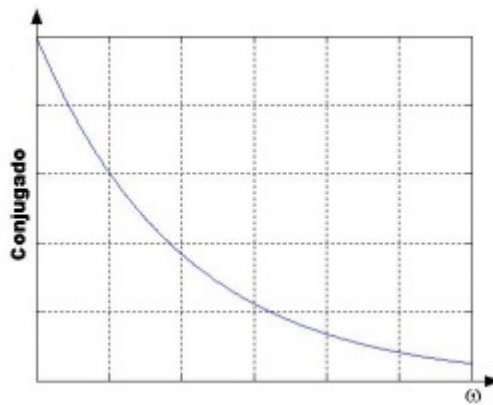
Fonte: Silva (2007).

3.3.4 CARGAS INVERSAS

A carga inversa é a carga cujo conjugado varia inversamente proporcional com o movimento de rotação, que resulta em uma potência constante, diminuindo assim o aumento da velocidade. São encontradas em aplicações como fresadoras e mandriladoras, que são as máquinas operatrizes.

A Figura 21 representa seu comportamento.

Figura 21: Conjugado de carga inversa



Fonte: Silva (2007).

3.4 REDUTORES

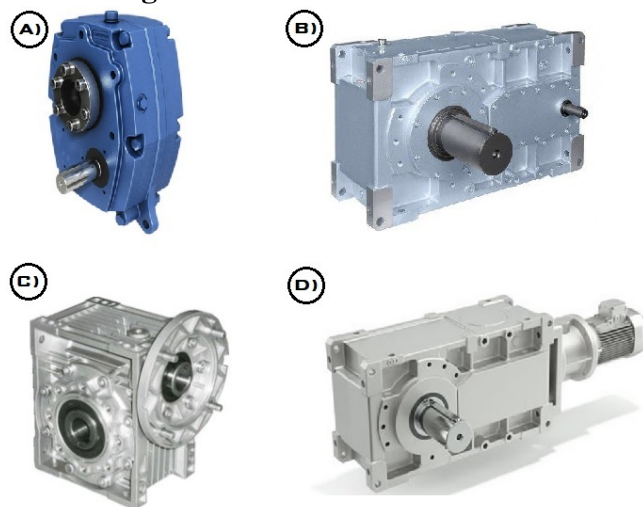
Redutores de velocidade são dispositivos mecânicos utilizados para reduzir a velocidade de rotação de um acionador. Geralmente são acionados por motores hidráulicos, combustão, turbina a vapor e motores elétricos. São comumente usados nas indústrias por possuírem alto desempenho de rotação nos equipamentos.

As correias transportadoras, devido o trabalho em baixa velocidade, utilizam em seu conjunto de acionamento redutores que auxiliam nesta redução da velocidade em rpm (rotação por minuto) para o funcionamento da esteira em relação a rotação do eixo do motor.

O redutor é constituído por eixos de entrada e de saída, mancais, rolamentos, engrenagens e carcaça (disponibilizada, geralmente, em alumínio ou ferro fundido). Para o acionamento de correias transportadoras, existem quatro principais tipos de redutores, os quais estão representados na Figura 22, são eles:

- Redutores Shaft-Mounted: são redutores menores e econômicos, para potências até 50HP.
- Redutores de eixos paralelos: São os mais utilizados, pois estão disponíveis em uma gama que atende todas as faixas de potências.
- Redutores de eixos perpendiculares: São redutores que possuem características a fim de ocuparem menor espaço em ambientes apertados.
- Redutores de rosca sem fim: São especiais para alguns casos onde a potência do sistema é pequena.

Figura 22: Modelos de redutores



A) REDUTOR SHAFT-MOUNTED

C) REDUTOR DE ROSCA SEM FIM

B) REDUTOR DE EIXOS PARALELOS

D) REDUTOR DE EIXOS PERPENDICULARES

Fonte: O Autor.

Delatados os diversos métodos e meios de acionamentos, resta ao próximo capítulo a exposição de uma análise casuística, onde um conjunto de acionamento será definido para um caso concreto.

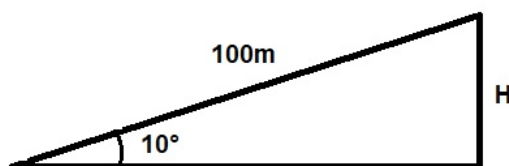
4 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ACIONAMENTO DE UMA CORREIA TRANSPORTADORA

4.1 ANÁLISE DA POTÊNCIA REQUERIDA

Os cálculos que vão resultar nos valores a seguir foram feitos através de uma série de características pré definidas das correias transportadoras, que serão descritas através deste capítulo. Considerou-se vários aspectos construtivos, como: o comprimento da correia (L), a quantidade de rolos de apoio da correia e sua inclinação, o ângulo de inclinação de aclave da correia (λ), entre outros.

Foi escolhido um comprimento (L) igual a 100 metros, com um ângulo de inclinação (λ) de 10° em aclave. Essa configuração, por meio da trigonometria, resultou na altura de elevação (H) da correia transportadora. A Figura 23 e a Equação 19, demonstram o valor de H .

Figura 23: Representação da altura de elevação da correia



Fonte: O Autor.

$$\text{sen}(10^\circ) = \frac{H}{100} \quad (19)$$

Resolvendo a Equação 19, encontra-se um valor de H de aproximadamente 17,4 metros.

Para a definição do conjunto de acionamento de uma correia transportadora, será utilizado a correia do tipo abaulada, descritas na Subseção 2.3, com três roletes de apoio dispostos em 35° .

Serão considerados, a fim de exemplificação, apenas dois diferentes materiais: algodão em caroço desfiado e seco e aço fragmentado com massas específicas de 600 e 2400 kg/m³, respectivamente. As duas configurações que envolverão esses materiais, são mostradas na Tabela 15.

Tabela 15: Configurações utilizadas para o projeto de correias transportadoras

Parâmetros	Configuração 1	Configuração 2
Material transportado	Algodão em caroço desfiado e seco	Aço fragmentado triturado
Granulometria		
Tamanho máximo (m)	0,025	0,2
Ângulo de acomodação (°)	30	30
Número de roletes	3	3
Inclinação dos roletes (°)	35	35
Velocidade de projeto (m/s)	80% da velocidade máxima	80% da velocidade máxima
Peso específico (kg/m ³)	600	2400
Comprimento das guias laterais (m)	10	10
Distância na horizontal (m)	100	100
Distância na vertical (m)	17,4	17,4
Capacidade de projeto (kg/s)	90% da capacidade máxima	90% da capacidade máxima

Fonte: O Autor.

Para o projeto das correias transportadoras, os métodos utilizados foram os métodos Prático e CEMA, que foram descritos nas Subseções 2.6.1 e 2.6.2, respectivamente.

A análise pelos dois métodos é feita justamente pra identificar o melhor método para escolher a potência do motor que irá acionar a correia transportadora.

Como pode-se observar, com os cálculos do Apêndice A, para os respectivos materiais, foram obtidos os seguintes resultados de potência requerida, em cavalos, mostrados na Tabela 16.

Tabela 16: Resultados para os métodos Prático e CEMA

	Algodão	Aço
Método Prático	22.93	55.90
Método CEMA	13.19	32.78

Fonte: O Autor.

Observou-se, pela Tabela 16, que, para as duas configurações, a potência do motor necessária para transportar o material calculada pelo método Prático foi de aproximadamente 70% maior do que a calculada pelo método CEMA, o que já era de se esperar, pois, como visto na subseção 2.6.1, o Método Prático é um método simplificado que dedica-se ao uso de transportadores simples e de pequena capacidade, utilizado para uma visão geral do projeto, ocasionando um superdimensionamento da potência requerida quando se trata de transportadores maiores.

Alguns dos valores utilizados para os cálculos, – largura da correia (B), velocidade de projeto da correia (V) e a capacidade mássica de projeto (Q) – dependem somente das características intrínsecas dos materiais a serem transportados, portanto, independem do método de projeto utilizado. Para as duas configurações, os valores utilizados foram os seguintes:

Algodão:

- $B = 0,71$ m;
- $V = 3,24$ m/s; e
- $Q = 38,69$ kg/s.

Aço Fragmentado:

- $B = 0,71$ m;
- $V = 2,52$ m/s; e
- $Q = 154,8$ kg/s.

Em relação aos materiais transportados e as diferentes configurações utilizadas, notou-se que a configuração 2 solicitou uma maior potência comparada à configuração 1. Isso ocorreu devido alguns fatores: a massa específica do Aço é maior que a massa específica do Algodão, a velocidade de projeto da configuração 1 foi maior que a da configuração 2.

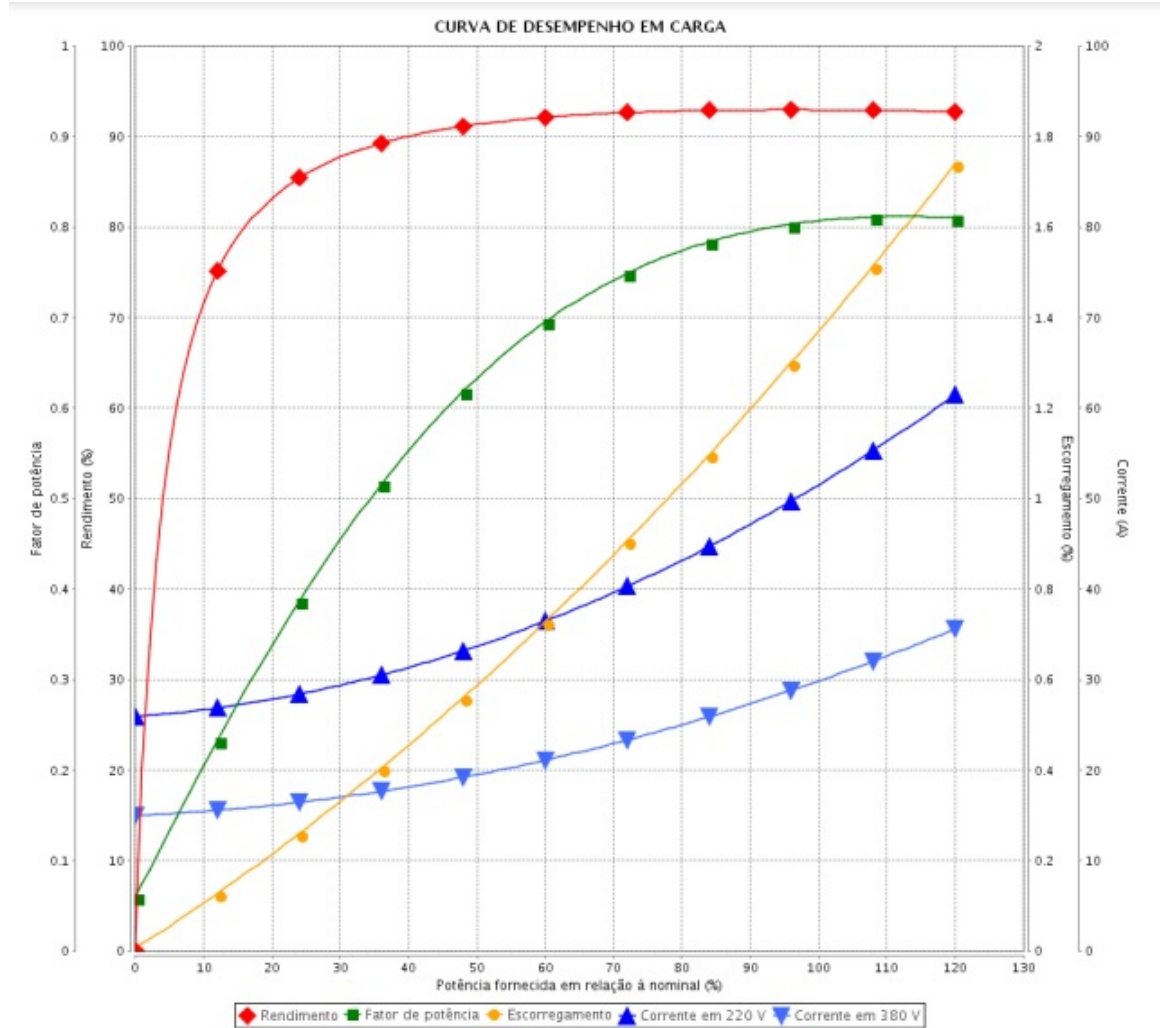
4.2 DEFINIÇÃO DO CONJUNTO DE ACIONAMENTO

Os motores que serão escolhidos para o acionamento da correia transportadora são os motores de alto rendimento mencionados na subseção 3.1, que são dados como uma alternativa vantajosa para as correias transportadoras devido suas características especiais, que permitem possuir um rendimento maior comparado aos motores *standard*. Como visto em Silva (2008), esses motores são de 20% a 30% mais caros que os motores convencionais, porém, sua utilização pode conduzir a vantagens econômicas importantes que serão obtidas ao longo da sua vida útil no trabalho com as correias transportadoras.

Tomando a Tabela 14, da subseção 3.1 e, considerando o método CEMA para a potência requerida, é escolhido para a configuração 1 e 2, os motores de alto rendimento de 20cv e de 40cv, respectivamente.

Para melhor ilustrar, foi escolhido dois motores WEG com essas características, cujas performances podem ser analisadas através dos gráficos a seguir nas Figuras 24 e 25, e também através das Tabelas 17 e 18.

Figura 24: Curva de desempenho em carga - Motor WEG IR3 20cv



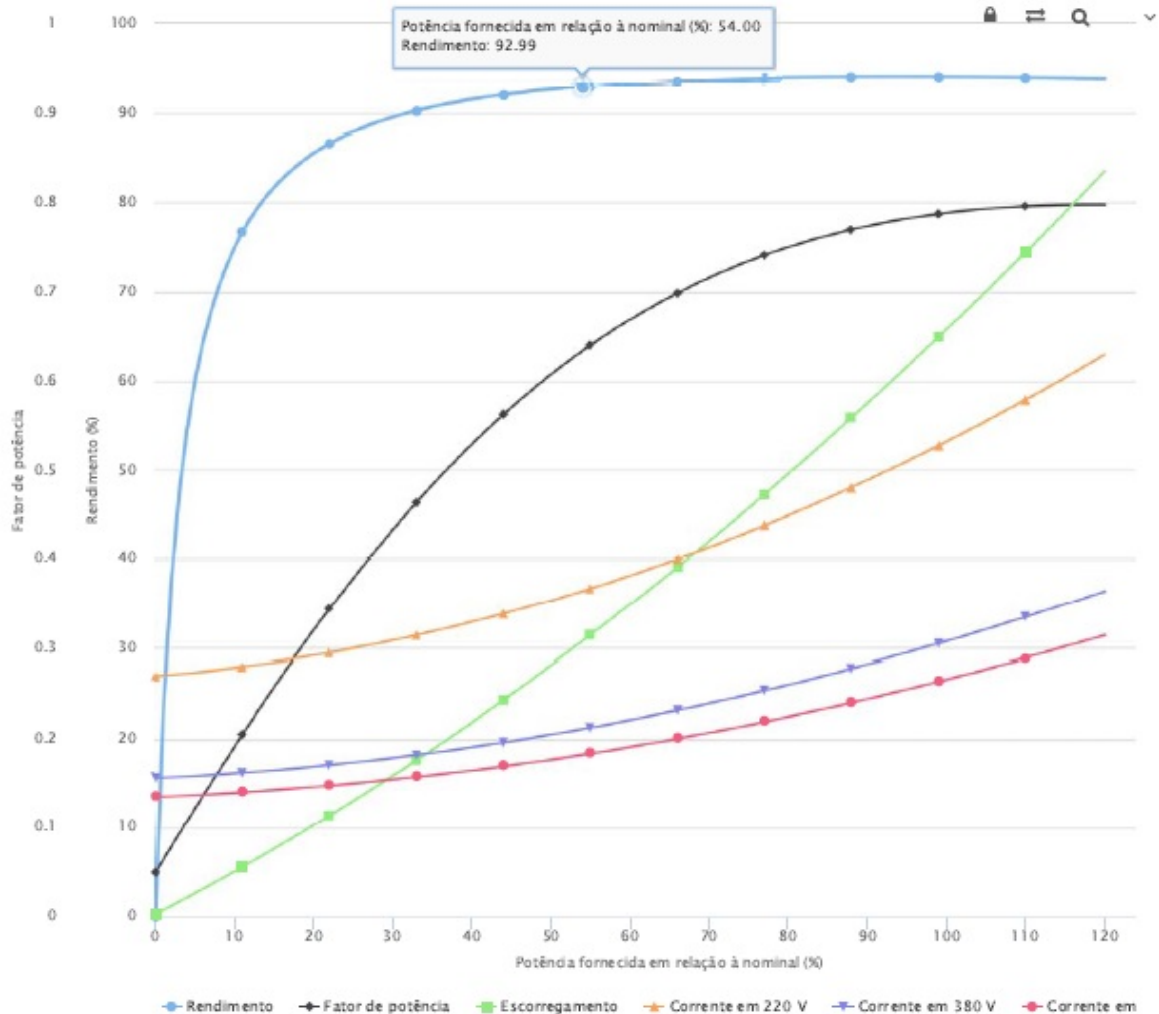
Fonte: WEG (2020d).

Tabela 17: Dados técnicos do motor WEG 20cv

Carcaça	160M
Potência	15 kW (20 HP-cv)
Número de polos	4
Frequência	60 Hz
Rotação nominal	1775 rpm
Escorregamento	1.39 %
Tensão nominal	220/380 V
Corrente nominal	52.2/30.2 A
Corrente de partida	470/272 A
Ip/In	9.0
Corrente a vazio	26.0/15.1 A
Conjugado nominal	8.23 kgfm
Conjugado de partida	320%
Conjugado máximo	340%

Fonte: WEG (2020d)

Figura 25: Curva de desempenho em carga - Motor WEG IR3 40cv



Fonte: WEG (2020e).

Tabela 18: Dados técnicos do motor WEG 40cv

Caixa	200L
Potência	30 kW (40 HP-cv)
Número de polos	6
Frequência	60 Hz
Rotação nominal	1180 rpm
Escorregamento	1.67 %
Tensão nominal	220/380/440 V
Corrente nominal	106/61.4/53.0 A
Corrente de partida	710/411/355 A
Ip/In	6.7
Corrente a vazio	54.0/31.3/27.0 A
Conjugado nominal	24.8 kgfm
Conjugado de partida	250%
Conjugado máximo	280%

Fonte: WEG (2020e)

As correias transportadoras, no caso das configurações estudadas, possuem velocidades de $3,24 \text{ m/s}$ e $2,52 \text{ m/s}$. Para atingir essa velocidade no sistema de acionamento é necessário o emprego de redutores, que devem ser dimensionados de forma a atender a velocidade máxima da correia transportadora. Contudo, é importante que esta correia consiga trabalhar em uma gama de velocidades que varia desde 0 m/s até sua velocidade máxima. Para isso, é necessário fazer a escolha certa do sistema de acionamento da correia.

Dos diferentes métodos de partidas de motores vistos na subseção 3.2, é escolhido o inversor de frequência. Considerando que o inversor de frequência tem como sua principal função alterar a frequência da rede que alimenta o motor, fazendo com que o motor siga frequências diferentes das fornecidas pela rede, que é sempre constante. Desta forma, pode-se alterar a velocidade de rotação do motor facilmente e de modo muito eficiente.

5 CONCLUSÃO

Obtendo-se os resultados dos métodos Prático e CEMA, foi possível verificar que o método Prático pode ser de grande valia em uma estimativa inicial de um projeto de correias transportadoras, porém o método CEMA se mostra necessário para um cálculo exato dos esforços da correia, e consequentemente um resultado que não fique superdimensionado. Apesar da maior complexidade, conclui-se que o método CEMA, portanto, é o mais indicado para o projeto final de correias transportadoras.

A eficiência energética do sistema de acionamento de uma correia transportadora já começa através da escolha do método de cálculo da potência requerida, uma vez que é conhecida a discrepância entre os dois métodos para correias transportadoras de grande uso.

Os motores de alto rendimento se mostraram motores que cumprem o nome que levam, trazendo um rendimento muito bom quando operado próximo à potência nominal. Acoplados com redutores também eficientes e o inversor de frequência como meio de acionamento para cargas do tipo correias transportadoras, podem garantir a eficiência do conjunto de acionamento e trazer benefícios às empresas que detem este tipo de transporte na economia de energia.

É importante lembrar também que, o desenvolvimento de métodos e materiais são cada vez mais precisos para as correias transportadoras, é de suma importância para sempre buscar essa maximização da eficiência e economia da energia, bem como a diminuição de materiais dispersos no meio ambiente.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O dimensionamento do conjunto de acionamento de uma correia transportadora analisado neste trabalho, foi realizado através de uma análise geral dos métodos de projeto e tipos de motores e acionamentos existentes. Com o desenvolvimento das tecnologias, é fato que vários outros meios de obter a eficiência energética vão surgindo a cada dia.

Em vista dos métodos de cálculo da potência requerida pelos sistema em si da correia transportadora, pode-se ressaltar a necessidade de sempre desenvolver métodos cada vez mais precisos para obter esta potência e, dentre outros fatores, obter a maximização da economia energética.

Sendo assim, é sugerido que, em trabalhos futuros, seja feita uma análise minuciosa do comportamento das correias transportadoras em seus diferentes tipos de projetos, sugerindo alterações que podem contribuir com esta otimização da potência requerida pelo sistema.

Referências

- BORMAX. 2020. Disponível em: <<https://www.correiasindustriais.com.br/correias-transportadoras>>. Acesso em: 19 nov. 2020.
- CTB. 2020. Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/aplicacoes/correias-transportadoras/calculo-e-selecao-de-correias-transportadoras/>>. Acesso em: 29 nov. 2020.
- DIAS, O. S. L. e José Luiz Pereira da C. *Seleção e Aplicação de Motores Elétricos*. 1. ed. Brasil: McGraw-Hill, 1988. 356 p.
- EDUCAÇÃO, E. . P. *Conservação de Energia: Eficiência energética de equipamentos e instalações*. 3. ed. Itajubá: Fupai, 2006. 621 p.
- FAÇO, F. D. A. P. S. *Manual de transportadores contínuos*. 3. ed. Brasil, 1981. 300 p.
- GOMES, L. C. *Material de Aula*. 2018.
- INDÚSTRIA, P. *Correias Transportadoras: Guia básico*. 1. ed. Brasil: IEL/NC, 2009. 180 p.
- MALAGONI, D. S. e R. Correias transportadoras: Um estudo computacional de comparação dos métodos cema e prático. *HOLOS*, Uberlândia, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.15628/holos.2014.1780>>. Acesso em: 19 nov. 2020.
- MECÂNICA Industrial. 2020. Disponível em: <<https://www.mecanicaindustrial.com.br/632-formacao-de-correias-transportadoras/>>. Acesso em: 19 nov. 2020.
- MERCÚRIO, C. *Mercurio: Manual técnico de correias transportadoras*. 3. ed. Brasil: Schoba, 2019. 348 p.
- PARTIDA Estrela Triângulo. 2019. Disponível em: <<https://blog.viewtech.ind.br/2019/07/15/estrela-triangulo/>>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- PROCEL Indústria. 2009. Acesso em: 19 nov. 2020.
- RESARCHGATE. 2015. Disponível em: <https://www.researchgate.net/figure/Figura-25-Partida-com-chave-compensadora-diagrama-principal-a-e-diagrama-de-comando_fig4_334534702>. Acesso em: 22 nov. 2020.
- SILVA, P. C. F. de Freitas e Victor de P. e. Comparação dos rendimentos dos motores da linha padrão e de alto rendimento sob o enfoque da eficiência energética. *CEEL*, Uberlândia, 2008. Disponível em: <https://www.peteletricaufu.com/static/ceel/doc/artigos/artigos2008/ceel2008_34.pdf>. Acesso em: 30 nov. 2020.
- SILVA, S. F. da. *Identificação de Torque de Carga em Motores de Indução Usando Abordagem em Sistemas Fuzzy*. 117 p. Monografia (Mestrado) — Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2007.
- TÉCNICAS, A. B. de N. *NBR 17094-1: Máquinas elétricas girantes: Parte 1: Motores de indução trifásicos*. [S.l.], 2018.
- UNESP. 2020. Disponível em: <<https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariaeletrica/softstarter.pdf>>. Acesso em: 22 nov. 2020.

WEG. *Motores Elétricos Guia de Especificação*. 1. ed. Jaraguá do Sul, 2014. 68 p.

WEG. *Eficiência Energética*. 2020. Disponível em: <<https://www.weg.net/institutional/BR/pt/solutions/energy-efficiency/efficiency-index>>. Acesso em: 17 dez. 2020.

WEG. 2020. Disponível em: <<http://www.weg.com.br>>. Acesso em: 22 nov. 2020.

WEG. 2020. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Automa%C3%A7%C3%A3o-e-Controle-Industrial/Controls/Partida-e-Prote%C3%A7%C3%A3o-de-Motores/Soft-Starters/Usos-gerais/Soft-Starter-SSW06/SOFT-STARTER-SSW060820T2257PSZ/p/10052075>>. Acesso em: 22 nov. 2020.

WEG. 2020. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-IR4-Super-Premium/W22-IR3-Premium-20-cv-2P-160M-3F-380-660-V-60-Hz-IC411---TFVE---B35D/p/11885100>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

WEG. 2020. Disponível em: <<https://www.weg.net/catalog/weg/BR/pt/Motores-El%C3%A9tricos/Trif%C3%A1sico---Baixa-Tens%C3%A3o/Usos-Gerais/W22/W22-IR4-Super-Premium/W22-IR3-Premium-40-cv-6P-200L-3F-220-380-440-V-60-Hz-IC411---TFVE---B35D/p/12216769>>. Acesso em: 30 nov. 2020.

ZHANG, X. X. S. Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors. *Elsevier*, Pretoria, 2011. Disponível em: <www.elsevier.com/locate/apenergy>. Acesso em: 19 nov. 2020.

A CÓDIGOS IMPLEMENTADOS NO MATLAB

• Método Prático - Algodão

```
Ctab = 0.071666; %capacidade volumétrica tabelada (m³/s)
Vmax = 3.6; % Velocidade máxima tabelada em (m/s)
V = Vmax*0.8; % Velocidade de projeto em (m/s)
L = 100; % Comprimento da esteira transportadora em (m)
H = 17.5; % Comprimento da distância vertical em (m)
k = 0.95; % Fator de correção para capacidade volumétrica real
C = Ctab*V*k; % Capacidade volumétrica real
Qa = 600*Ctab*0.9; %peso específico do material (kg/s)

% CÁLCULO DA POTÊNCIA

Nv = 2.55; % dado de tabela
Nh = 6.5; % dado da tabela
N1 = 1.87; % dado da tabela
Ng = 1.26; % dado da tabela

Ne = V*(Nv + Ng) + (Qa/27.8)*(N1 + Nh);

Ne = Ne * 1.01387;

display(Ne)
```

• Método CEMA - Algodão

```

dm = 0.6; % densidade do material (t/m³)
Vmax = 3.6;
V = Vmax*0.8;
B = 0.76; % largura da correia (m)
Lg = 10; % comprimento das guias laterais (m)
Q = 600*0.07166*0.9;
%capacidade de carga (kg/s)

Cs = (dm/2.3)*((1-0.5)/(1+0.5));
% fator devido ao atrito do material com as guias

Wm = 0.277*(Q/V); % peso do material (kgf/m)
Wb = 11.9; % valor definido em tabela

Kx = 0.909;
Ky = 0.027; %definido atraves da tabela

Fg = (0.01488*Cs*Lg*B^2)+(0.82*Lg);
% Força necessária para vencer o atrito do material com as guias (kgf)
Ft = 18.1; % considerando a posição do tambor no lado frouxo
Ftc = 63.4; % força para movimentar trippers (kgf)
Ftm = 22.7; %considerando um tambor apenas
Fd = 0; % Considerando que nao há desviadores
F1 = 0.9*B^2; % Considerando um raspador e um limpador
Vc = 0; %setado

Fa = (Q*(V - Vc^2))/(36*V);

Ta = Fg + Ft + Ftc + Ftm + Fd + F1 + Fa;

H = 17.5; % altura de elevação do material (m)
L = 100; %comprimento do transportador (m)
Te = L*(Kx + Ky*(Wm + Wb)+ 0.015*Wb) + H*Wm + Ta;
Ne = (Te*V)/75;
Ne = Ne*1.01387;
display(Ne)

```

• Método Prático - Aço

```
Ctab = 0.071666; %capacidade volumétrica tabelada (m³/s)

Vmax = 2.8; % Velocidade máxima tabelada em (m/s)
V = Vmax*0.8; % Velocidade de projeto em (m/s)
L = 100; % Comprimento da esteira transportadora em (m)
H = 17.5; % Comprimento da distância vertical em (m)
k = 0.95; % Fator de correção para capacidade volumétrica real
C = Ctab*V*k; % Capacidade volumétrica real
Qaco = 2400*Ctab*0.9; %peso específico do material (kg/s)
```

% CÁLCULO DA POTÊNCIA

```
Nv = 2.55; % dado de tabela
Nh = 6.5; % dado da tabela
N1 = 1.87; % dado da tabela
Ng = 1.26; % dado da tabela

Ne = V*(Nv + Ng) + (Qaco/27.8)*(N1 + Nh);

Ne = Ne * 1.01387;

display(Ne)
```

• Método CEMA - Aço

```

Ctab = 0.071666; %capacidade volumétrica tabelada (m³/s)
C = Ctab*V*k; % Capacidade volumétrica real
dm = 2.4; % densidade do material (t/m³)
Vmax = 2.8;
V = Vmax*0.8;
B = 0.76; % largura da correia (m)
Lg = 10; % comprimento das guias laterais (m)
Q = 2400*C*0.9; %capacidade de carga (kg/s)

Cs = (dm/2.3)*((1-0.5)/(1+0.5));
% atrito do material com as guias laterais

Wm = 0.277*(Q/V); % peso do material (kgf/m)
Wb = 11.9; % valor definido em tabela

Kx = 0.909;
Ky = 0.027; %definido através da tabela

Fg = (0.01488*Cs*Lg*B^2)+(0.82*Lg);
Ft = 18.1; % considerando a posição do tambor no lado frouxo
Ftc = 63.4; % força para movimentar trippers (kgf)
Ftm = 22.7; %considerando um tambor apenas
Fd = 0; % Considerando que nao há desviadores
F1 = 0.9*B^2; % Considerando um raspador e um limpador
Vc = 0;

Fa = (Q*(V - Vc^2))/(36*V);

Ta = Fg + Ft + Ftc + Ftm + Fd + F1 + Fa;
H = 17.5; % altura de elevação do material (m)
L = 100; %comprimento do transportador (m)
Te = L*(Kx + Ky*(Wm + Wb) + 0.015*Wb) + H*Wm + Ta;
Ne = (Te*V)/75;
display(Ne)
Ne = Ne*1.01387;
display(Ne)

```