

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

OTIMIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
POR CORRENTES ATRAVÉS DA ADIÇÃO DO FATOR CUSTO

por

Jair Glaucio Gonzatti Vidaletti

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Novembro de 2015

OTIMIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO DE SELEÇÃO DE SISTEMAS DE TRANSMISSÃO
POR CORRENTES ATRAVÉS DA ADIÇÃO DO FATOR CUSTO

por

Jair Glaucio Gonzatti Vidaletti

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Alcy Rodolfo dos Santos Carrara
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação.**

Orientador: Prof. Ney Francisco Ferreira

Comissão de Avaliação:

Prof. Fabiano Disconzi Wildner

Prof. Mario Roland Sobczyk Sobrinho

Prof. Patric Daniel Neis

Porto Alegre, 27 de Novembro de 2015.

VIDALETTI, J. G. G. **Otimização do procedimento de seleção de sistemas de transmissão por correntes através da adição do fator custo.** 2015. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

RESUMO

A adição do fator custo no procedimento de seleção de sistemas de transmissão por correntes é de suma importância para que se possa restringir ainda mais as opções e reduzir o tempo utilizado em cálculos de sistemas não viáveis economicamente. O procedimento atual apresenta alternativas de sistemas capazes para quase todos os passos de correntes com diferentes multiplicidades, o que motiva a necessidade de reduzir a faixa de opções na qual o projetista deverá focar seu tempo. Para tanto, foram obtidos valores com fornecedores de correntes, rodas dentadas e sistemas de lubrificação e levantados os motivos de variação nos preços ao alterar-se características do sistema. Adicionando-se o fator custo foi possível restringir as opções tecnicamente viáveis. O principal motivo de elevação dos custos de correntes é a dificuldade de montagem do pino causada pela adição de fileiras. A roda dentada tem seu custo elevado principalmente em função do seu processo de fabricação, que se torna mais complexo ao aumentar-se passo, multiplicidade ou número de dentes. Cada tipo de sistema de lubrificação possui uma faixa de preços, tendo em vista o grande número de variáveis na sua seleção, e eles são determinantes na seleção em aplicações com potência de projeto inferior a 60 HP ou rotação de entrada superior a 2000 rpm. Além disso, desenvolveu-se um programa computacional para a realização da seleção, já com o fator custo, que apresenta as opções de sistemas de transmissão mais atrativas economicamente com e sem lubrificação.

PALAVRAS-CHAVE: correntes de transmissão de potência, análise de custos, programa de seleção de correntes

VIDALETTI, J. G. G. **Optimization of transmission chains systems selection procedure through cost factor addition**. 2015. 20. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

ABSTRACT

The addition of the cost factor in the transmission chains systems selection procedure is of utmost importance for restricting even more the options and reducing the time spent in calculations of not economically viable systems. The current procedure presents alternatives of capable systems for almost all chain pitches with different multiplicities, which motivates the necessity of reducing the range in which the draftsman ought to focus his time. For this purpose, values were obtained with suppliers of chains, sprockets and lubrication systems and were raised the reasons of prices variation due to changes in the system characteristics. By adding the cost factor, it was possible to narrow the technically viable options. The main reason for the rise in the chains costs is the pin assembly difficulty caused by the addition of strands. The sprocket has its cost increased mainly due to its manufacturing process, which becomes more complex by increasing pitch, multiplicity or number of teeth. Each type of lubrication has a range of prices, given the large number of variables in its selection, and they are decisive in the selection for applications with design power inferior to 60 HP or input rotation superior to 2000 rpm. In addition, a computer program to perform the selection was developed, already with the cost factor, capable of presenting the most economically attractive options with and without lubrication.

KEYWORDS: power transmission chains, costs analysis, chains selection program

ÍNDICE

1.	INTRODUÇÃO	1
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	1
2.1.	Partes de uma corrente e modo de falha	1
2.2.	Transmissão mecânica	4
2.3.	Lubrificação	5
2.4.	Nomenclatura das correntes	6
2.5.	Capacidade	6
2.6.	Procedimento de seleção	7
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1.	Levantamento de custos	8
3.2.	Desenvolvimento do programa de seleção de correntes	8
4.	RESULTADOS	9
4.1.	Preços de correntes	9
4.2.	Preços de rodas dentadas	11
4.3.	Custos de lubrificação	12
4.4.	Custo do sistema de transmissão	12
4.5.	Programa de seleção	12
4.6.	Estudos de caso	13
5.	CONCLUSÕES	15
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

1. INTRODUÇÃO

Segundo definição de Otoshi, 1997, corrente é um componente que transmite potência por meio de forças de tração e é utilizado principalmente para transmissão de potência e sistemas de transporte. Correntes de transmissão são mais adequadas para sistemas com poucas paradas e transmissões de potência com flutuação de torque limitada. Normalmente, corrente é uma opção econômica para máquinas de transmissão de potência para baixas velocidades e grandes cargas, porém, também é possível utilizá-la em condições de alta velocidade, através de métodos de operação e lubrificação adequados.

Em decorrência do uso generalizado ao redor do mundo, certas normas internacionais são estabelecidas para assegurar que as principais características de correntes e rodas dentadas sejam padronizadas [Wright, 2005]. Nos Estados Unidos, correntes de transmissão devem atender à norma ANSI B29.1, sendo chamadas de correntes ANSI. Correntes BS/DIN são reguladas por padrões internacionais (ISO 606B) e são utilizadas principalmente na Europa e no Japão. Conforme observado por Otoshi, 1997, comparando com uma corrente ANSI do mesmo tamanho, os valores de potência de correntes BS/DIN são um pouco menores. Por se tratar da corrente mais utilizada no Brasil, este trabalho abordará correntes padrão ANSI.

O procedimento de seleção de correntes de transmissão utiliza características do conjunto desejado, como potência e rotação de entrada, para encontrar um sistema suficientemente capaz de operar nessas condições. Para a mesma aplicação em particular, várias combinações de correntes e rodas dentadas diferentes podem ser encontradas [Wright, 2005]. O procedimento em questão não leva em conta aspectos econômicos, apenas técnicos, ou seja, o projetista encontra um sistema tecnicamente viável, mas não necessariamente economicamente atrativo.

O objetivo deste trabalho é fazer um levantamento junto a fornecedores de custos dos sistemas de transmissão por corrente, mais especificamente de correntes, rodas dentadas e sistemas de lubrificação. Além disso, pretende-se desenvolver um programa em Excel utilizando linguagem VBA (Visual Basic for Applications) que, a partir dos dados técnicos e econômicos, apresente ao projetista as opções mais atrativas de sistemas que sejam suficientemente capazes de atender às especificações de projeto. Dessa forma, o trabalho objetiva contribuir para o procedimento de seleção desse tipo de componente através da inclusão do parâmetro custo.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Partes de uma corrente e modo de falha

Conforme descrito por Wright, 2005, uma corrente de rolo de fileira única é um conjunto de elos alternados, como pode ser visto na Figura 2.1. Esses elos podem ser externos, compostos por pino e placas externas, e internos, compostos por rolo, bucha e placas internas. Os pinos ficam livres para articular na bucha e os elos estão dispostos de maneira que os rolos possam engatar nos dentes de uma roda dentada e transmitir movimento e força [Otoshi, 1997].

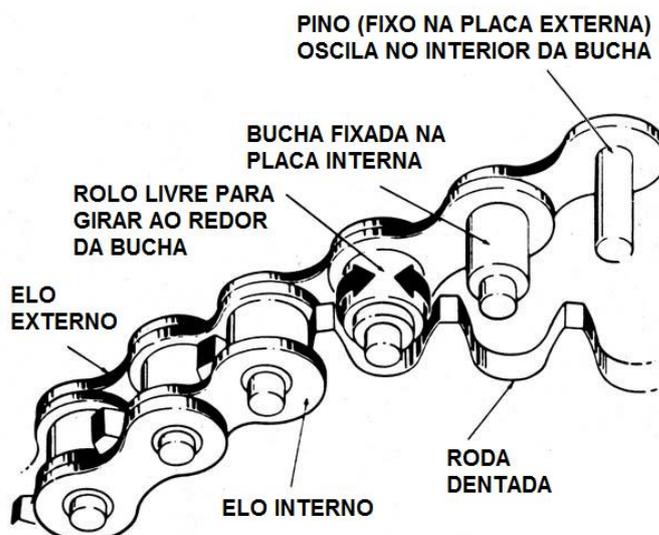


Figura 2.1 - Partes de uma transmissão por corrente [adaptado de Wright, 2005].

A força é transferida primeiramente das faces de trabalho da roda dentada para o exterior das correntes de rolo, ou vice-versa. De acordo com Wright, 2005, pode haver uma grande força de impacto quando os dentes da roda dentada entram em contato com os rolos da corrente. Sendo assim, rolos devem ser suficientemente resistentes para suportar essas grandes forças sem se deformar ou quebrar, e suficientemente duros para resistir ao desgaste do engate nos dentes das rodas dentadas. Em adição a isso, Otoshi, 1991, afirma que eles devem ser dúcteis o suficiente para absorver grandes forças de impacto sem rachar ou quebrar.

A força é transferida do interior dos rolos para o exterior das buchas, junto com quaisquer forças de impacto que não foram absorvidas por eles. Quanto melhor a lubrificação, mais impacto é absorvido. As buchas, por sua vez, transferem a força para placas e pinos. Wright, 2005, afirma que buchas devem ser suficientemente resistentes e rígidas para transferir a força para as placas que estão montadas em cada uma das suas extremidades. Ainda, devem conseguir resistir às tensões do encaixe nas placas internas sem rachar. Por transferirem a força para os pinos enquanto esses giram no interior delas, é necessário que as buchas possuam alta dureza superficial a fim de resistir ao desgaste quando a junta gira.

Após receberem a força das buchas, os pinos transferem-na para as placas externas, e eles devem fazê-lo enquanto giram no interior das buchas. Buchas agem como mancais de escorregamento em uma corrente. Segundo Wright, 2005, os pinos necessitam de alta dureza superficial pelo mesmo motivo que as buchas, porém, devem possuir ductilidade suficiente para suportar consideráveis flexões sem rachar ou quebrar. Ainda, as extremidades dos pinos devem ser suficientemente dúcteis para que eles não rachem ou lasquem quando suas extremidades forem remançadas. Pinos podem ser remançados ou contrapinos nas placas externas, como pode ser visto na Figura 2.2.



Figura 2.2 - Elos com pinos (a) contrapinos e (b) remançados [adaptado de Wright, 2005].

A força é transmitida para as placas externas através dos pinos montados em seus furos. As tensões no entorno desses orifícios podem ser elevadas devido aos concentradores de tensões. Conforme descrito por Otoshi, 1997, placas externas devem possuir resistência suficiente para suportar a força sem deformar ou quebrar, além de serem suficientemente dúcteis para resistir à flexão e à fadiga.

Nas placas internas, a força é aplicada pelas buchas montadas em seus furos. Assim como nas placas externas, os orifícios são concentradores de tensão, mas nesse caso essa concentração é mais grave, visto que o diâmetro da bucha é maior que o diâmetro do pino. As placas internas devem possuir as mesmas características estruturais das externas: resistência contra a força e ductilidade contra flexão e fadiga [Otoshi, 1997].

Correntes podem possuir uma ou mais fileiras. Nos casos em que não é possível atender às especificações de projeto com uma corrente de fileira única, como quando a potência transmitida ou a velocidade são muito altas, o projetista deve optar pelo uso de correntes múltiplas. Wright, 2005, assegura que correntes múltiplas podem transmitir mais potência em altas velocidades do que correntes simples de passo maior com igual ou maior capacidade de carga. Nelas, duas ou mais correntes são montadas lado a lado utilizando pinos comuns que mantêm o alinhamento dos rolos nas diversas fileiras. Na Figura 2.3 pode ser vista uma corrente de multiplicidade 2.



Figura 2.3 – Corrente com duas fileiras [Wright, 2005].

Em sistemas de transmissão com correntes múltiplas, o carregamento não é uniforme ao longo da largura da corrente, logo, a capacidade de transmissão não é um múltiplo direto do número de correntes [Otoshi, 1997]. Nesses casos deve ser utilizado um fator de correção, chamado fator de multiplicidade, apresentado na Tabela 2.1. Dessa forma, uma corrente dupla apresenta uma capacidade 1,7 vezes maior que a mesma corrente simples.

Tabela 2.1 - Fator de multiplicidade por número de fileiras [Otoshi, 1997].

Número de fileiras	Fator de Multiplicidade
2	1,7
3	2,5
4	3,3
5	3,9
6	4,6

O desgaste é o critério de falha mais importante na concepção de correntes de rolo. Correntes de rolo são normalmente mais afetadas pelo desgaste entre pino e bucha e dos rolos com os dentes das rodas dentadas [Wright, 2005]. O desgaste entre pino e bucha ocorre na superfície de contato entre eles, fazendo com que a corrente fique mais longa ao longo do tempo de uso. Segundo Otoshi, 1997, essa é provavelmente a maior preocupação no desenvolvimento de correntes. As rodas dentadas são projetadas para aceitar até 3% de alongamento decorrente do desgaste. Wright, 2005, relata que, quando a corrente se alonga além desse valor, ela deixa de acoplar em todos os dentes da roda dentada que deveria e passa a não funcionar corretamente.

2.2. Transmissão mecânica

Segundo Low, 1995, o equacionamento matemático que define a capacidade de potência que pode ser transmitida por fileira, limitado pelos diversos modos de falha, é baseado nas seguintes premissas: o sistema de transmissão por correntes está devidamente lubrificado; o sistema está operando em condições ideais (fator de serviço igual a 1); a corrente possui expectativa de vida de aproximadamente 15.000 h; o arranjo do sistema possui duas rodas dentadas alinhadas posicionadas em eixos horizontais paralelos, conforme exemplificado na Figura 2.4.

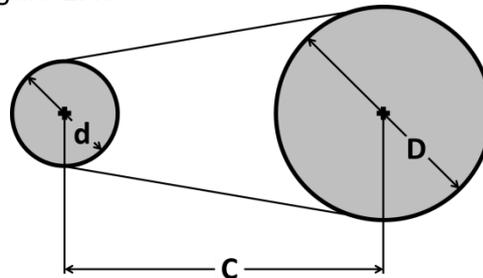


Figura 2.4 - Geometria de uma transmissão por corrente.

O comprimento da corrente é função da distância entre centros e do número de dentes em cada uma das rodas dentadas [Otoshi, 1997]. Conforme descrito por Shigley et al., 1996, o comprimento deve ser um número integral de passos, e preferencialmente um número par, para que o número de elos externos e internos sejam iguais. O comprimento aproximado da corrente, em mm, pode ser calculado utilizando a Equação 2.1.

$$L' = 2 \cdot C' + \frac{(N + n) \cdot P}{2} + \frac{(N - n)^2 \cdot P^2}{4 \cdot \pi^2 \cdot C} \quad (2.1)$$

Onde L' é o comprimento aproximado da corrente em mm, C' é a distância entre centros desejada em mm, N é o número de dentes da roda dentada maior, n é o número de dentes da roda dentada menor e P é o passo da corrente em mm.

Para verificar a quantidade de passos do comprimento da corrente, utiliza-se a Equação 2.2. Após a obtenção do número de elos fracionário da corrente, realiza-se o arredondamento para o primeiro número par superior a ele, a fim de obter uma corrente conforme as características descritas por Shigley et al., 1996.

$$X' = \frac{L'}{P} \quad (2.2)$$

Onde X' é o número de elos fracionário da corrente.

Calculado o comprimento, é possível calcular a distância entre centros a partir da Equação 2.3.

$$C = \frac{P}{4} \left[\frac{L}{P} + \frac{N + n}{2} + \sqrt{\left(\frac{N + n}{2} - \frac{L}{P} \right)^2 - 8 \cdot \left(\frac{N - n}{2 \cdot \pi} \right)^2} \right] \quad (2.3)$$

Onde C é a distância entre centros em mm e L é o comprimento da corrente em mm.

Nos casos em que a distância entre centros não é especificada em projeto, utiliza-se a distância entre centros mínima para o cálculo do comprimento aproximado da corrente. Segundo Wright, 2005, para evitar interferência entre os dentes, a distância de centro mínima é metade da soma dos diâmetros externos das duas rodas dentadas. Porém, a American Chain Association sugere que, para garantir um abraçamento adequado da

corrente na roda dentada menor, a distância mínima de centro deve ser igual à soma do diâmetro externo da roda dentada maior com metade do diâmetro externo da roda dentada menor.

Wright, 2005, expõe que, à medida que a corrente envolve uma roda dentada, ela forma efetivamente um polígono regular. Isso faz com que a fileira da corrente suba e desça cada vez que um dente da roda dentada é envolto por uma articulação. Esse movimento é chamado ação cordal, e o efeito é ilustrado na Figura 2.5. A ação cordal faz com que a velocidade da corrente aumente e diminua sempre que uma articulação engata em um dente das rodas dentadas. Naturalmente, a tensão na corrente varia sempre que a velocidade da corrente varia.

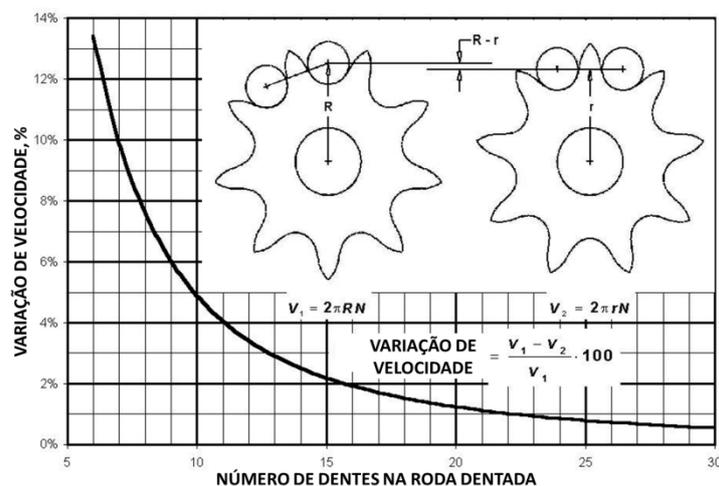


Figura 2.5 - Ação cordal [adaptado de Wright, 2005].

A ação cordal influencia diretamente no número de dentes na roda dentada menor, que é limitado pelos seus efeitos [Wright, 2005]. Como pode ser visto na Figura 2.5, quanto mais dentes na roda dentada menor, menor é a variação de velocidade.

2.3. Lubrificação

Correntes de transmissão e rodas dentadas são normalmente pré-lubrificadas com óleo protetivo contra ferrugem antes do envio ao cliente. Todavia, é essencial lubrificar a corrente durante sua operação. Otoshi, 1997, afirma que uma corrente devidamente lubrificada possui maior vida útil e é menos propensa a enferrujar.

A lubrificação é classificada em três tipos: Tipo A (manual ou por gotejamento), Tipo B (por imersão) e Tipo C (forçada). Os componentes comuns de cada tipo podem ser vistos na Figura 2.6.

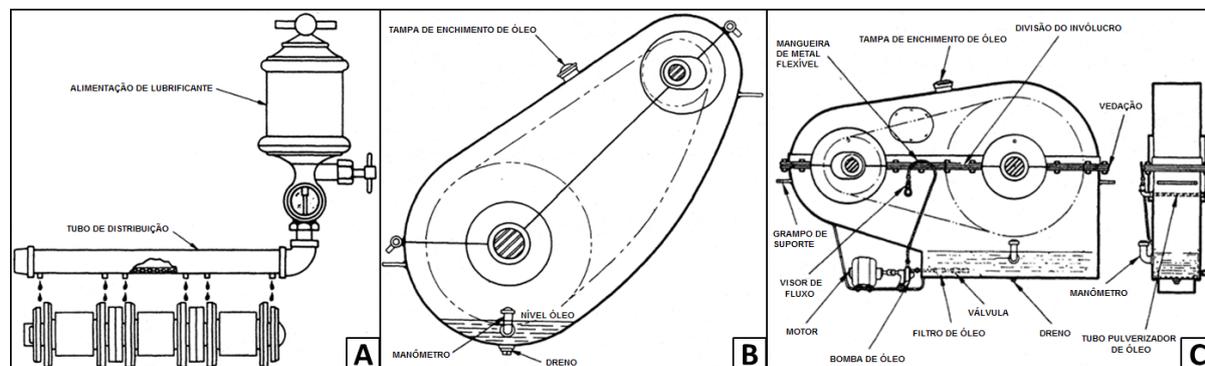


Figura 2.6 - Composição dos sistemas de lubrificação por tipo [adaptado de Wright, 2005].

O tipo de lubrificação recomendado pela norma depende da rotação e da capacidade do sistema. O tipo de lubrificação obtido das tabelas é o mínimo necessário. Sendo assim, Wright, 2005, assegura que utilizar um tipo superior de lubrificação normalmente aumentará a vida útil da corrente, da mesma forma que utilizar um inferior a diminuirá.

2.4. Nomenclatura das correntes

As dimensões nominais da norma ANSI são proporcionais ao passo da corrente. Segundo Otoshi, 1997, o objetivo da padronização é permitir a intercambiabilidade de correntes e rodas dentadas.

O número de uma corrente padronizada fornece a identificação completa da mesma. O número mais à direita é "0" para rolos com proporções padrão, "1" para correntes leves e "5" para correntes sem rolo. Os números à esquerda denotam o número de 1/8 de polegadas no passo, como descrito por Budynas, 2010. Por exemplo, uma corrente ANSI 50 possui um passo de 5/8 polegadas e rolo com proporções padrão. O sufixo hifenizado, que segue o número básico da corrente, indica o número de fileiras em uma corrente múltipla [Wright, 2005]. Por exemplo, ANSI 100-2 é a nomenclatura dada a uma corrente com rolo padrão, com passo de 10/8 polegadas e duas fileiras.

2.5. Capacidade

Para cada corrente da norma americana existe uma tabela como a Tabela 2.2, que apresenta as capacidades para a corrente ANSI 50.

Tabela 2.2 – Capacidade corrente ANSI 50 [adaptado de Wright, 2005].

Nº DE DENTES RODA DENTADA MENOR	REVOLUÇÕES POR MINUTO - RODA DENTADA MENOR																											
	10	25	50	100	200	300	400	500	700	900	1000	1200	1400	1600	1800	2100	2400	2700	3000	3500	4000	4500	5000	5500	6000			
9	0.09	0.19	0.36	0.67	1.26	1.81	2.35	2.87	3.89	4.88	5.36	6.32	6.02	4.92	4.13	3.27	2.68	2.25	1.92	1.52	1.25	1.04	0.89	0.77	0.58			
10	0.10	0.22	0.41	0.76	1.41	2.03	2.63	3.22	4.36	5.46	6.01	7.08	7.05	5.77	4.83	3.84	3.14	2.63	2.25	1.78	1.46	1.22	1.04	0.90	0.79			
11	0.11	0.24	0.45	0.84	1.56	2.25	2.92	3.57	4.83	6.06	6.66	7.85	8.13	6.65	5.58	4.42	3.62	3.04	2.59	2.06	1.68	1.41	1.20	1.04	0.92			
12	0.12	0.26	0.49	0.92	1.72	2.47	3.21	3.92	5.31	6.65	7.31	8.62	9.26	7.58	6.35	5.04	4.13	3.46	2.95	2.34	1.92	1.61	1.37	1.19	1.04			
13	0.13	0.29	0.54	1.00	1.87	2.70	3.50	4.27	5.78	7.25	7.97	9.40	10.40	8.55	7.16	5.69	4.65	3.90	3.33	2.64	2.16	1.81	1.55	1.34	0			
14	0.14	0.31	0.58	1.09	2.03	2.92	3.79	4.63	6.27	7.86	8.64	10.20	11.70	9.55	8.01	6.35	5.20	4.36	3.72	2.95	2.42	2.03	1.73	1.50	0			
15	0.15	0.34	0.63	1.17	2.19	3.15	4.08	4.99	6.75	8.47	9.31	11.00	12.60	10.60	8.88	7.05	5.77	4.83	4.13	3.27	2.68	2.25	1.92	1.66	0			
16	0.16	0.36	0.67	1.26	2.34	3.38	4.37	5.35	7.24	9.08	9.98	11.80	13.50	11.70	9.78	7.76	6.35	5.32	4.55	3.61	2.95	2.47	2.11	1.83	0			
17	0.17	0.39	0.72	1.34	2.50	3.61	4.67	5.71	7.73	9.69	10.70	12.60	14.40	12.80	10.70	8.50	6.96	5.83	4.98	3.95	3.23	2.71	2.31	2.01	0			
18	0.18	0.41	0.76	1.43	2.66	3.83	4.97	6.07	8.22	10.30	11.30	13.40	15.30	13.90	11.70	9.26	7.58	6.35	5.42	4.30	3.52	2.95	2.52	0	0			
19	0.19	0.43	0.81	1.51	2.82	4.07	5.27	6.44	8.72	10.90	12.00	14.20	16.30	15.10	12.70	10.00	8.22	6.89	5.88	4.67	3.82	3.20	2.73	0	0			
20	0.20	0.46	0.86	1.60	2.98	4.30	5.57	6.80	9.21	11.50	12.70	15.00	17.20	16.30	13.70	10.80	8.88	7.44	6.35	5.04	4.13	3.46	2.95	0	0			
21	0.21	0.48	0.90	1.69	3.14	4.53	5.87	7.17	9.71	12.20	13.40	15.80	18.10	17.60	14.70	11.70	9.55	8.01	6.84	5.42	4.44	3.72	3.18	0	0			
22	0.22	0.51	0.95	1.77	3.31	4.76	6.17	7.54	10.20	12.80	14.10	16.60	19.10	18.80	15.80	12.50	10.20	8.59	7.33	5.82	4.76	3.99	3.41	0	0			
23	0.23	0.53	1.00	1.86	3.47	5.00	6.47	7.91	10.70	13.40	14.80	17.40	20.00	20.10	16.90	13.40	11.00	9.18	7.84	6.22	5.09	4.27	0	0	0			
24	0.25	0.56	1.04	1.95	3.63	5.23	6.78	8.29	11.20	14.10	15.50	18.20	20.90	21.40	18.00	14.30	11.70	9.78	8.35	6.63	5.42	4.55	0	0	0			
25	0.26	0.58	1.09	2.03	3.80	5.47	7.08	8.66	11.70	14.70	16.20	19.00	21.90	22.80	19.10	15.20	12.40	10.40	8.88	7.05	5.77	4.83	0	0	0			
26	0.27	0.61	1.14	2.12	3.96	5.70	7.39	9.03	12.20	15.30	16.90	19.90	22.80	24.20	20.30	16.10	13.20	11.00	9.42	7.47	6.12	5.13	0	0	0			
28	0.29	0.66	1.23	2.30	4.29	6.18	8.01	9.79	13.20	16.60	18.30	21.50	24.70	27.00	22.60	18.00	14.70	12.30	10.50	8.35	6.84	5.73	0	0	0			
30	0.31	0.71	1.33	2.49	4.62	6.66	8.63	10.50	14.30	17.90	19.70	23.20	26.60	30.00	25.10	19.90	16.30	13.70	11.70	9.26	7.58	0	0	0	0			
32	0.33	0.76	1.42	2.66	4.96	7.14	9.25	11.30	15.30	19.20	21.10	24.90	28.60	32.20	27.70	22.00	18.00	15.10	12.90	10.20	8.35	0	0	0	0			
35	0.37	0.84	1.57	2.93	5.46	7.86	10.20	12.50	16.90	21.10	23.20	27.40	31.50	35.50	31.60	25.10	20.60	17.20	14.70	11.70	9.55	0	0	0	0			
40	0.43	0.97	1.81	3.38	6.31	9.08	11.80	14.40	19.50	24.40	26.80	31.60	36.30	41.00	38.70	30.70	25.10	21.00	18.00	14.30	0	0	0	0	0			
45	0.48	1.10	2.06	3.84	7.16	10.30	13.40	16.30	22.10	27.70	30.50	35.90	41.30	46.50	46.10	36.60	30.00	24.10	21.40	0	0	0	0	0	0			

Tipo A

Tipo B

Tipo C

←Lubrificação

Os valores dessa tabela são regidos principalmente por dois efeitos: a ação cordal e as forças centrífugas. A ação cordal faz com que a capacidade de transmissão de potência aumente com o aumento do número de dentes da roda dentada menor, como pode ser visto na Figura 2.7. Por exemplo, para rotação da roda dentada menor igual a 1000 rpm, ocorre um aumento de 112% na capacidade ao alterar-se o número de dentes de 15 para 30. Esse aumento ocorre porque a velocidade da corrente passa a variar menos durante o engate com os dentes da roda dentada, fazendo com que as variações de tensão também diminuam, por fim diminuindo a fração de tensão proveniente da ação cordal que é adicionada à tensão nominal de operação.

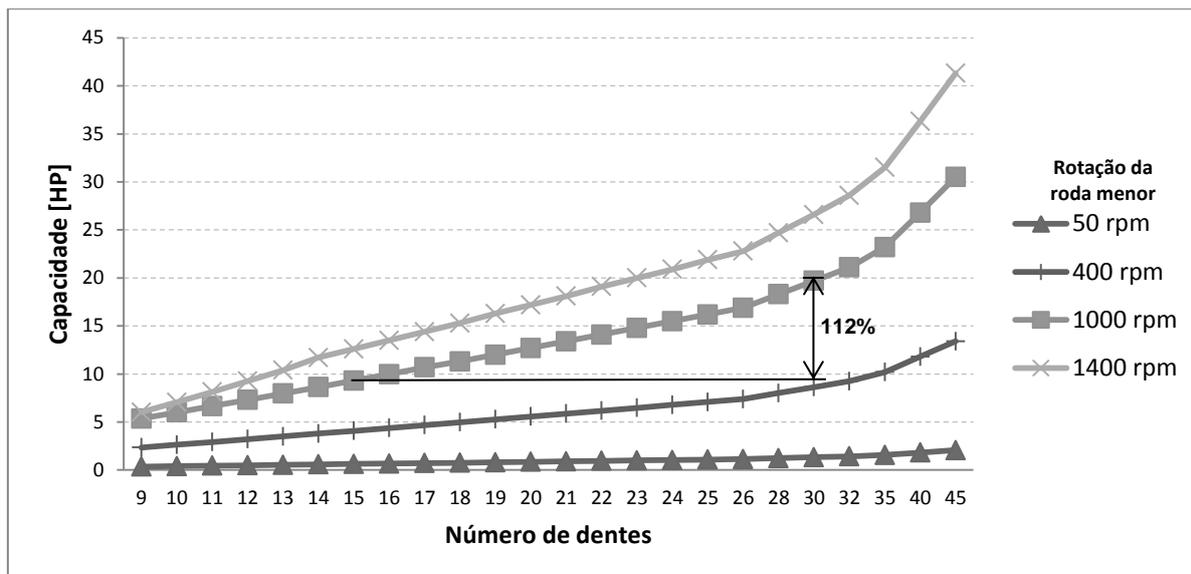


Figura 2.7 – Variação da capacidade da corrente ANSI 50 em relação ao número de dentes da roda dentada menor e rotação.

A redução da capacidade da corrente em rotações elevadas ocorre porque as forças centrífugas aumentam com o aumento da rotação. Na Figura 2.8 é possível observar que a capacidade aumenta até chegar no ponto em que a ação das forças centrífugas consegue superar o ganho de capacidade decorrente do aumento da rotação, passando então a reduzir.

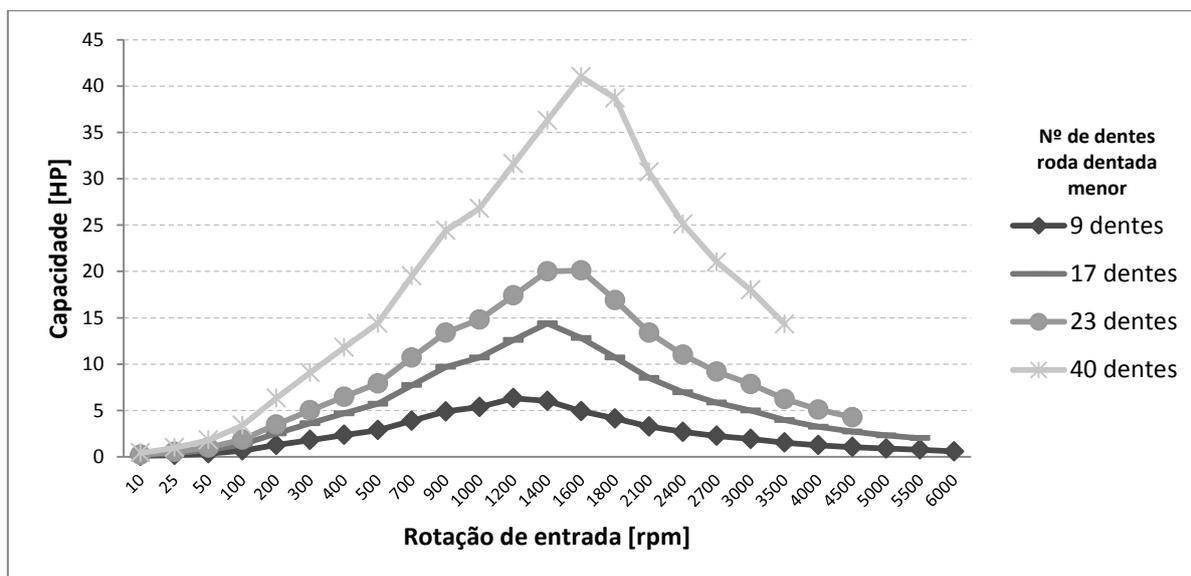


Figura 2.8 – Ação das forças centrífugas sobre a capacidade do sistema.

2.6. Procedimento de seleção

A capacidade de uma corrente é reduzida se existem flutuações de carga frequentes ou severas [Otoshi, 1997]. Nesses casos, um fator de serviço apropriado deve ser aplicado, utilizando a Tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Valores usuais de fator de serviço [adaptada de Otoshi, 1997].

Tipo de carga	Motor de combustão interna com acionamento hidráulico	Motor elétrico ou turbina	Motor de combustão interna sem acionamento hidráulico
Suave	1	1	1,2
Choques moderados	1,2	1,3	1,4
Choques pesados	1,4	1,5	1,7

A potência de projeto é o dado que será buscado nas tabelas de capacidade de corrente da norma, como a Tabela 2.2. Ela é obtida dividindo o produto da potência necessária nominal, ou potência de entrada, e do fator de serviço, obtido da Tabela 2.3, pelo fator de multiplicidade retirado da Tabela 2.1.

$$P_p = \frac{P_e \cdot FS}{FM} \quad (2.4)$$

Onde P_p é a potência de projeto, P_e é a potência de entrada, FS é o fator de serviço e FM é o fator de multiplicidade.

Para a seleção, primeiramente devem ser estabelecidos rotação dos eixos motor e movido, potência transmitida, fator de serviço apropriado, distância de centro desejada e limitações de espaço. Em seguida, procura-se nas tabelas das capacidades qual o passo de corrente que pode ser utilizado e qual a quantidade de dentes mínima para a roda dentada menor. Por fim, ainda nas tabelas de capacidade, é verificado o tipo de lubrificação adequado. Essa verificação é realizada analisando em qual das três áreas da tabela de capacidade se encontra a aplicação, pois é sua localização no interior delas que define seu tipo mínimo de lubrificação.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Levantamento de custos

Foi realizada uma coleta de valores de correntes e rodas dentadas com o engenheiro projetista da empresa Unipeças Correntes e Acessórios Ltda., fornecedora nacional desses componentes, com sede em Canoas, RS. Todos os valores foram cotados em dólar, tendo em vista a estabilidade dessa moeda em relação à moeda nacional no período em que o trabalho foi desenvolvido.

Os dados obtidos foram analisados através de gráficos no Excel. Buscou-se identificar como se comportavam os preços em virtude da alteração de características dos componentes, como passo e multiplicidade. Justificativas para esses comportamentos foram adquiridas com o engenheiro projetista da Unipeças Correntes e Acessórios Ltda.

O levantamento de preços de sistemas de lubrificação foi realizado com a ajuda de representantes das empresas SKF do Brasil Ltda, DM Brasil Consultoria e Representações Ltda e Interbrasil Ltda. Foram obtidas faixas de valores para os três tipos de lubrificação: gotejamento, imersão e forçada.

3.2. Desenvolvimento do programa de seleção de correntes

Foi desenvolvido um *software* em Excel utilizando linguagem VBA (Visual Basic for Applications) que executa as operações do método tradicional de seleção e que calcula o custo acumulado dos componentes dos sistemas encontrados com capacidade suficiente de atender às especificações de projeto, apresentando as opções com maior atratividade financeira ao operador.

O software foi programado para apresentar duas tabelas de resultados para os dados de entrada. Uma com os três sistemas de transmissão mais atrativos economicamente com

lubrificação e outra sem lubrificação. O fluxograma elaborado para o desenvolvimento do *software* pode ser visto na Figura 3.1.

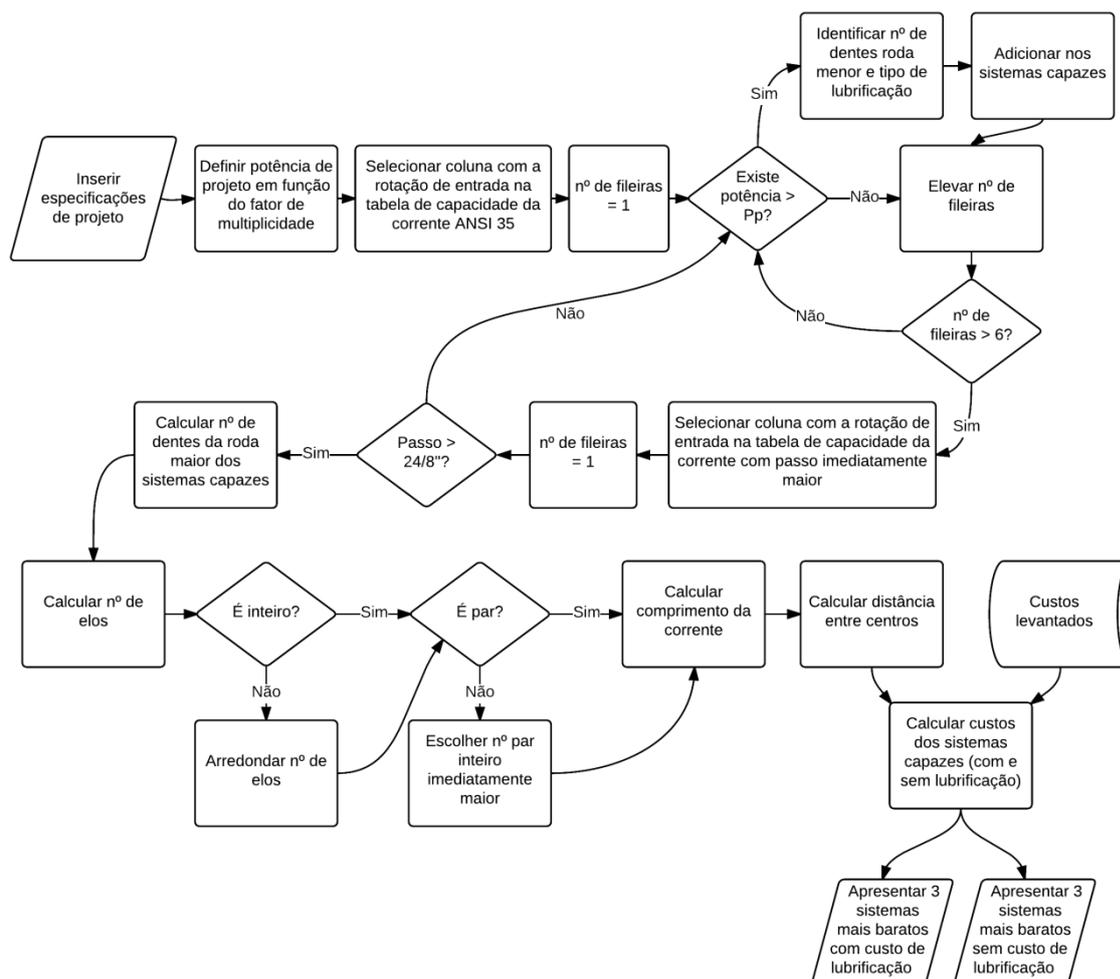


Figura 3.1 – Fluxograma do programa de seleção de correntes com fator custo.

As correntes, cujas tabelas de capacidade foram inseridas no programa, são ANSI 35, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 140, 160, 180, 200 e 240, sendo o passo da ANSI 240 igual a $24/8''$, o que, com número de fileiras igual a 6, define a última etapa da seleção de sistemas tecnicamente viáveis e o início do cálculo das características dos sistemas. O cálculo dos custos consiste em uma procura dentro do banco de dados do custo de cada componente utilizado e a soma desses. Nos custos sem lubrificação, soma-se apenas os custos da roda dentada menor, da roda dentada maior e o custo referente à quantidade de metros de corrente utilizados. Para a seleção dos três sistemas mais baratos, realiza-se uma comparação par a par entre os custos totais dos sistemas capazes.

4. RESULTADOS

4.1. Preços de correntes

Existem dois fatores que influenciam os valores das correntes de transmissão: passo e multiplicidade. Na Figura 4.1 é possível ver a variação do valor por metro das correntes em função da multiplicidade.

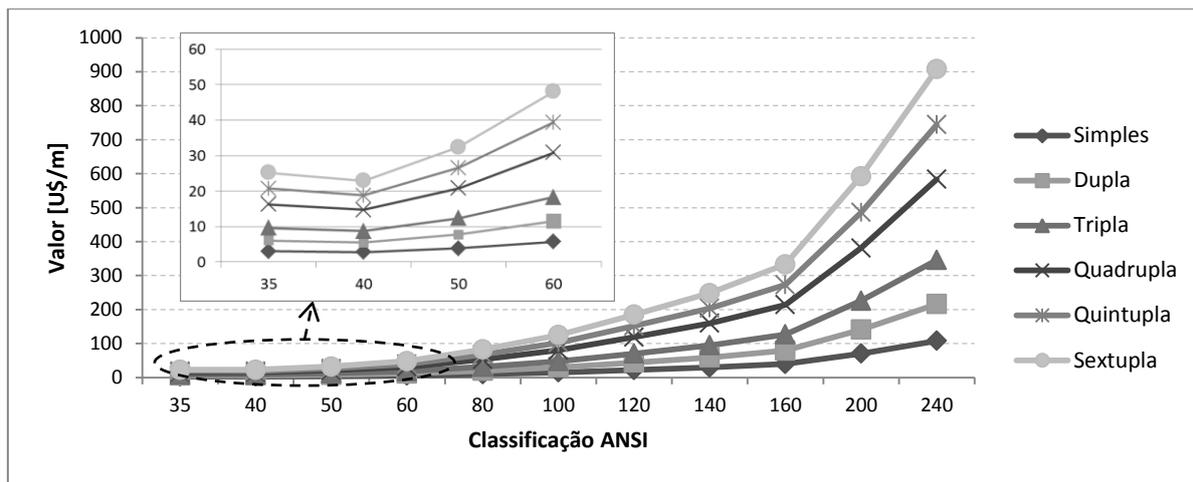


Figura 4.1 – Valor de correntes de transmissão em função da multiplicidade.

Nota-se que, em passos até 6/8” (corrente ANSI 60), a variação dos custos das correntes é inferior a dez dólares por fileira adicionada, ou seja, nesses casos, a multiplicidade não tem muita influência na viabilidade econômica. Porém, nas correntes de passo maior, percebe-se grande influência dessa característica na seleção em função do custo. Por exemplo, um metro da corrente ANSI 240-6 custa aproximadamente oitocentos dólares a mais que um metro da ANSI 240-1, diferença que pesa na tomada de decisão do projetista.

Ainda na Figura 4.1, observa-se que a corrente ANSI 40 apresenta um custo inferior à corrente ANSI 35, mesmo possuindo passo maior. Isso se dá porque em correntes como a ANSI 35, ou de passos menores, são utilizados mais componentes em um metro de corrente, e esses de tamanhos menores, o que dificulta a montagem e eleva o custo. Dito isso, os fornecedores consideram a corrente ANSI 40 a com melhor custo-benefício, visto que, ao avançar-se para passos maiores, ocorre um aumento no preço, por passo, de aproximadamente 50% decorrente do incremento na quantidade de material utilizado.

A Figura 4.2 mostra a evolução da capacidade e do valor das correntes em função da quantidade de fileiras. É possível perceber que o valor unitário das correntes aumenta mais do que a capacidade com o aumento do número de fileiras. A região com maior diferença de variação do custo se encontra entre as multiplicidades 3 e 4, pois, a partir da corrente quádrupla, o pino é preso nas placas externas utilizando contra-pino ao invés de remanche. Essa alteração se faz necessária porque, com o aumento do passo, ocorre o aumento do comprimento do pino, elevando as chances do pino flambar enquanto é remanchado ou empenar no processo de têmpera. A utilização de contra-pinos causa um aumento adicional de 20% no custo das correntes, tornando a montagem do pino o fator mais crítico nos preços de correntes.

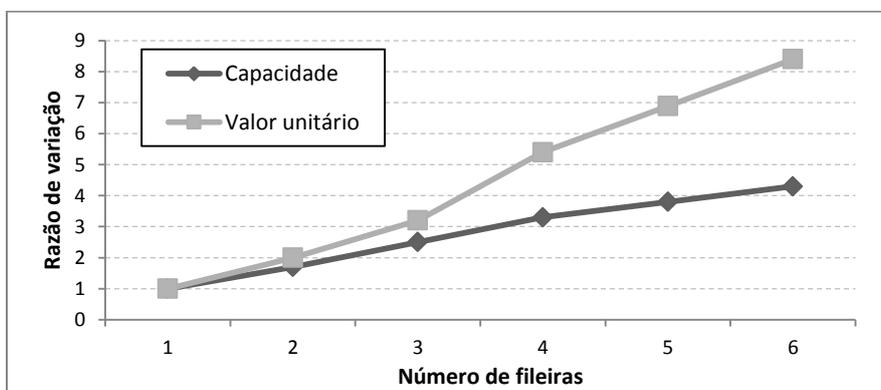


Figura 4.2 – Variação do preço e da capacidade com relação à multiplicidade.

4.2. Preços de rodas dentadas

Nas rodas dentadas, averiguou-se que os preços são regidos por três fatores dominantes: multiplicidade, passo e número de dentes.

Verificou-se que, assim como ocorre nos preços das correntes, o aumento do passo causa uma elevação contínua no custo das rodas dentadas (aproximadamente 65%) e a multiplicidade tem mais influência na viabilidade econômica quanto maior o passo. Esse fenômeno, que pode ser visto na Figura 4.3 para rodas dentadas com 40 dentes, é explicado pelo fato de que, quanto maior o passo, mais material é utilizado, maior é o diâmetro da roda dentada e mais é exigido das máquinas utilizadas no processo. Por ser fruto do processo de usinagem por geração, quanto maior a multiplicidade, mais material deve ser retirado e mais tempo leva a fabricação, acarretando em aumento no preço.

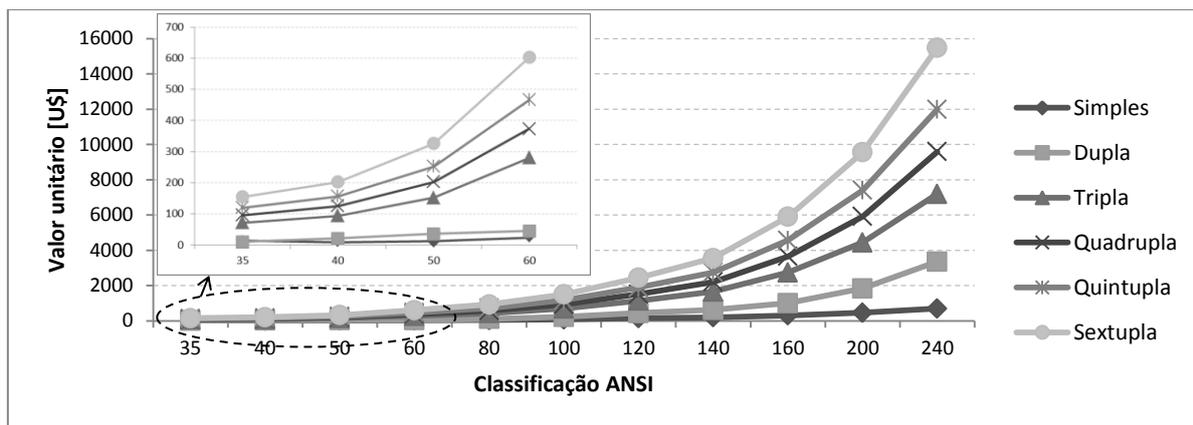


Figura 4.3 – Valor das rodas dentadas de 40 dentes em relação ao aumento do número de fileiras.

O fato da roda dentada ser fabricada por geração se relaciona diretamente com a elevação do custo decorrente do aumento do número de dentes. Quanto mais dentes possuir, maior o custo de fabricação, visto que serão necessárias mais passadas na geradora para que seja obtido o produto almejado.

Na Figura 4.4, observa-se que o aumento decorrente do incremento no número de dentes é amplificado pelo aumento do passo. Isso se dá pelo mesmo motivo da multiplicidade: com o aumento da quantidade de material e das dimensões da roda dentada, o processo de geração se torna mais complexo, elevando o custo.

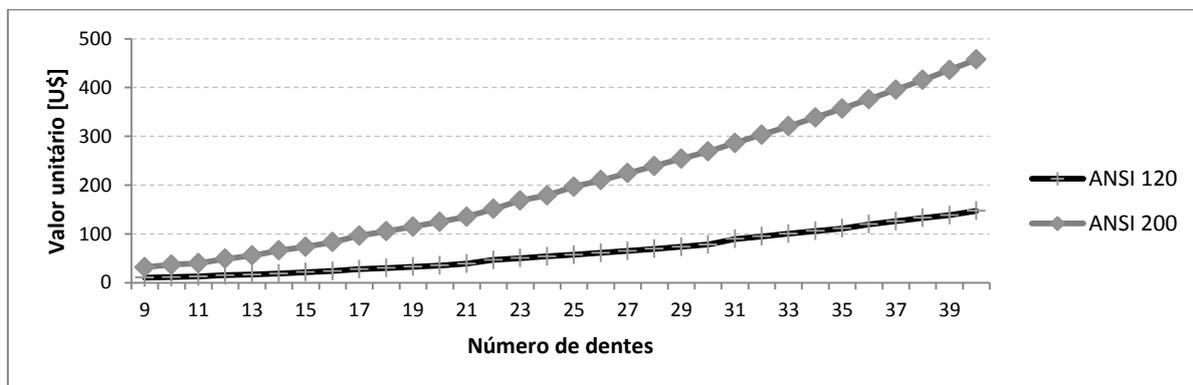


Figura 4.4 – Variação do custo das rodas dentadas com o aumento do número de dentes.

4.3. Custos de lubrificação

Os preços dos sistemas de lubrificação são calculados por aplicação, ou seja, não são tabelados. Logo, na pesquisa de mercado realizada só foram obtidas faixas por tipo. Não existem tabelas com esses preços por se tratar de uma junção de componentes selecionados que, como o procedimento estudado nesse trabalho, possui muitas variáveis. O que pode ser afirmado é que o elemento que mais afeta os preços é o invólucro, devido à variação de tamanho do sistema, seguido do conjunto motor e bomba de óleo na lubrificação Tipo C.

Sendo assim, foram identificadas as faixas de preço desses tipos de sistemas de lubrificação, e seus valores médios foram utilizados para os cálculos realizados pelo programa. As faixas, bem como os valores médios, podem ser vistas na Figura 4.5.

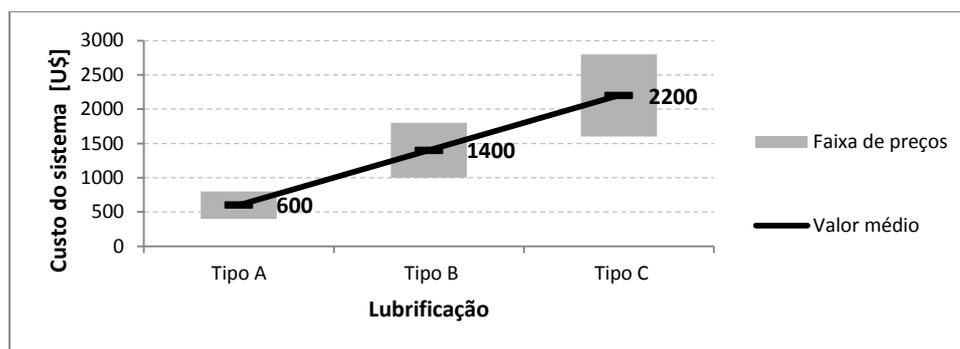


Figura 4.5 – Faixas de preços de sistemas de lubrificação por tipo.

4.4. Custo do sistema de transmissão

Após dar entrada em todos os preços no programa desenvolvido para a seleção de sistemas de transmissão de correntes, foi possível unir todas as variações de custos decorrentes das mudanças nas características dos componentes e ver como o preço do sistema completo se comporta e do que ele depende.

O primeiro ponto constatado foi que, em aplicações com rotações de entrada acima de 2000 rpm ou potências de projeto abaixo de 60 HP, os preços de correntes e rodas dentadas são desprezíveis quando comparados aos de lubrificação. Ou seja, o fator mais importante na decisão de qual sistema escolher é o tipo de lubrificação. Após feita essa escolha, pode-se procurar pela combinação de corrente e roda dentada mais barata, porém o valor dessas não tem muito impacto no preço final.

Em aplicações com rotações de entrada abaixo de 2000 rpm e potências de projeto acima de 60 HP, passos maiores e mais fileiras são necessárias, o que, como visto anteriormente, aumenta consideravelmente o preço de correntes e rodas dentadas. Sendo assim, para essas aplicações, o custo dos sistemas de lubrificação passa a ser apenas mais um fator na decisão, não mais o principal, pois todos os preços se encontram na mesma faixa.

4.5. Programa de seleção

O programa desenvolvido mostrou ser capaz de restringir as opções de sistemas de transmissão apenas às mais atrativas financeiramente. Verificou-se que utilizando o método tradicional, sem as restrições de custo, encontrava-se entre 40 e 45 combinações de correntes e rodas dentadas capazes de satisfazer às especificações de projeto. Quando comparado às 60 opções de correntes (10 passos que podem ser fabricados com 6 multiplicidades diferentes), percebe-se que o projetista realmente não tem por onde se guiar no início dos cálculos. Ao acrescentar as restrições de custo, foi possível identificar as melhores opções de combinações de correntes e rodas dentadas.

No processo de seleção em função do custo, foi feita a distinção entre sistemas de transmissão com e sem lubrificação. Assim, se o projetista já possuir os componentes para o sistema de lubrificação, ele pode obter uma análise na tabela de resultados sem lubrificação que independe desses custos.

4.6. Estudos de caso

Três casos foram estudados para ilustrar os resultados apresentados anteriormente. São abordados cenários com rotação de entrada superior e inferior a 2000 rpm, além de um em que se altera a razão de transmissão a fim de reduzir custos. As suas características de projeto podem ser vistas na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Características de projeto dos casos.

Características de projeto	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Potência de entrada [HP]	17	70	400
Rotação de entrada [rpm]	2100	1000	500 → 300
Rotação de saída [rpm]	1050	300	250
Fonte de potência	Motor elétrico ou turbina	Motor elétrico ou turbina	Motor de combustão interna sem acionamento hidráulico
Tipo de impacto	Choques moderados	Choques moderados	Choques pesados
Distância entre centros [mm]	600	800	1000

Para o primeiro caso, com rotação de entrada superior a 2000 rpm, o programa apresentou como os três sistemas mais econômicos os que usam correntes ANSI 40-2, 40-3 e 40-4. Na Figura 4.6 é possível ver o custo de aplicação de todos os sistemas que utilizam correntes ANSI 40. Observa-se que o custo de lubrificação possui magnitude maior que a soma dos outros custos, sendo o responsável por excluir o sistema que utiliza corrente ANSI 40-1 (único com lubrificação do tipo C) das opções com melhor custo-benefício, apesar desse possuir o menor valor quando se aborda apenas corrente e rodas dentadas. Logo, percebe-se que neste caso, onde tem-se uma aplicação de potência de projeto até 60 HP ou rotação de entrada superior a 2000 rpm, a lubrificação é o fator com maior peso na seleção.

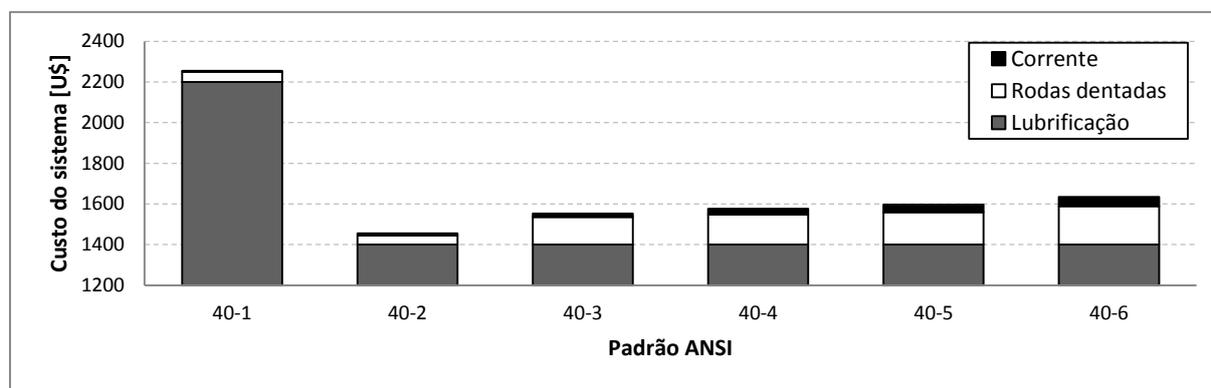


Figura 4.6 – Custo dos sistemas encontrados para o Caso 1.

Na Figura 4.7 são apresentados os custos dos sistemas encontrados para o segundo caso utilizando correntes ANSI 80. Esse caso aborda uma situação com rotação de entrada inferior a 2000 rpm e potência elevada. Para cada multiplicidade são exibidos dois resultados, um utilizando o valor mínimo de lubrificação e o outro o máximo. Dentro das

opções encontradas, tem-se sistemas com lubrificação do tipo B e C. Percebe-se que a partir da multiplicidade 3 o custo das rodas dentadas dobra em decorrência do aumento de material retirado e tempo de fabricação. Além disso, para essa aplicação encontra-se resultados com valores muito próximos ao se utilizar o valor médio de lubrificação (diferença de 10% entre máximo e mínimo). Analisando os custos utilizando valores mínimos e máximos para lubrificação, nota-se que qualquer um dos sistemas pode vir a ser o mais econômico, sendo necessários valores mais precisos de lubrificação para melhor seleção. Assim, confirma-se a necessidade de orçamento específico de sistemas de lubrificação para certas aplicações.

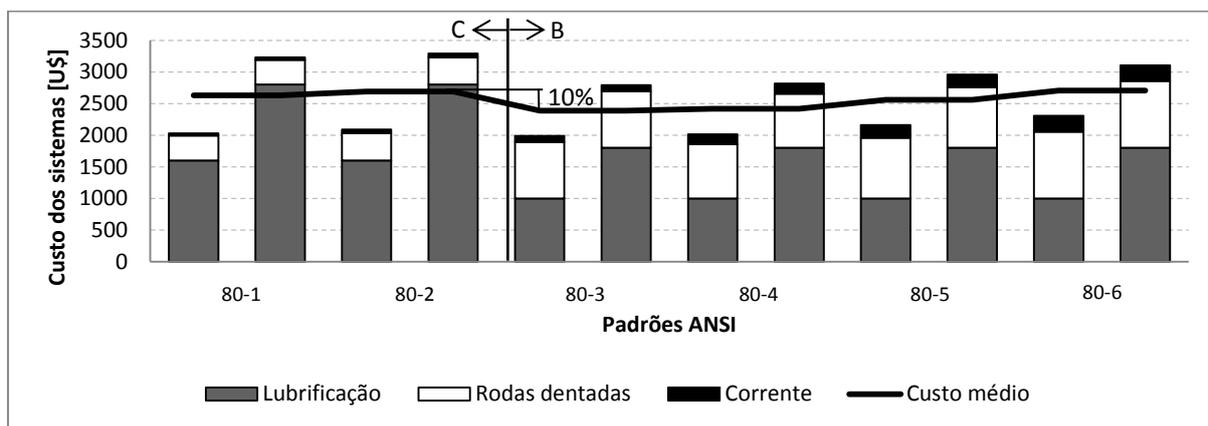


Figura 4.7 – Custos mínimo e máximo dos sistemas encontrados para o Caso 2.

No terceiro caso realiza-se uma alteração na razão de transmissão, alterando-se a rotação de entrada e mantendo fixa a rotação de saída, a fim de reduzir o custo do sistema. Com rotações de entrada iguais a 500 e 300 rpm, encontra-se como sistemas mais baratos os que utilizam correntes ANSI 200-2 e 240-2, respectivamente. Na Figura 4.8 percebe-se que, com a redução da rotação de entrada, houve uma redução de aproximadamente dois mil dólares no custo. Isso se dá pois, ao reduzir a rotação de entrada e manter fixa a rotação de saída, reduz-se a razão de transmissão e, com isso, é possível encontrar sistemas com rodas dentadas maiores com menos dentes. Dado o comprimento do passo com que se está operando, qualquer redução no número de dentes causa uma grande redução no custo, pois as grandes dimensões dessas rodas dentadas fazem com que seja necessário retirar muito material durante a fabricação. Sendo assim, percebe-se que toda a redução foi causada pela redução do custo da roda dentada maior, já que os preços da roda dentada menor e da corrente aumentaram com o aumento do passo. Foi viável realizar essa análise rapidamente por causa da existência do programa desenvolvido, que permitiu a obtenção instantânea dos custos a cada alteração realizada nas características de projeto.

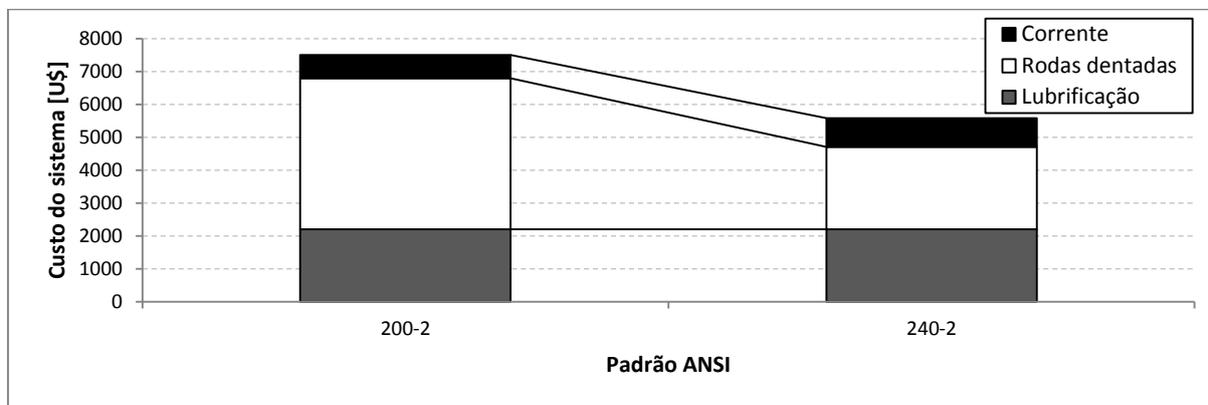


Figura 4.8 – Custos dos sistemas encontrados para o Caso 3.

5. CONCLUSÕES

A adição do fator custo no procedimento de seleção de sistemas de transmissão por correntes apresentou capacidade de direcionar a escolha às opções mais atrativas economicamente para cada aplicação. Confirmou-se através do programa desenvolvido que existem muitas possibilidades de sistemas quando se utiliza apenas as restrições existentes no procedimento tradicional.

Verificou-se que o sistema de lubrificação é o fator com maior peso financeiro em aplicações com potência de projeto até 60 HP ou rotação de entrada acima de 2000 rpm. Nessas, o sistema deve ser projetado para utilizar o tipo mais básico de lubrificação viável. Em aplicações com potência de projeto superior a 60 HP e rotações abaixo de 2000 rpm, correntes e rodas dentadas são mais exigidas, logo, seus custos aumentam e tornam os valores de lubrificação apenas mais um fator.

Nas correntes, encontra-se o melhor custo-benefício na ANSI 40. Correntes com passo menor possuem preços maiores em decorrência da dificuldade de montagem de seus componentes pequenos, enquanto correntes com passo maior têm seus preços elevados por causa do incremento natural do custo proveniente do acréscimo de material utilizado. Encontrou-se como fator com mais influência nos preços a montagem dos pinos, visto que se faz necessária a alteração do processo de fabricação para garantir o funcionamento da corrente ao acrescentar-se fileiras. Essa alteração ocorre a partir da multiplicidade 3, onde o pino passa a ser contrapinado.

Rodas dentadas tem seus preços dependentes do passo, da multiplicidade e do número de dentes. O aumento de qualquer um dos três fatores amplifica a elevação de custo causada pelo aumento nos outros, pois todos afetam as dimensões finais da roda dentada, que têm relação direta com a complexidade de fabricação, principal motivo da elevação dos preços.

O programa desenvolvido está disponível a todos e possui código aberto, podendo ter seus preços atualizados ou qualquer outra utilidade que possa ser encontrada.

O *software* encontra-se disponível para *download* no endereço a seguir:

[https://drive.google.com/folderview?id=0B5asF1Xw_I6hWWYzSVlpcURybFU&usp=sh
aring](https://drive.google.com/folderview?id=0B5asF1Xw_I6hWWYzSVlpcURybFU&usp=sharing)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Budynas, R. G. "**Shigley's mechanical engineering design**", McGraw-Hill Education, 9th edition, 2010.

Low, K. "**Computer-aided selection of roller chain drives**", Computers and Structures, pp 925-936, 1995.

Otoshi, K. "**The Complete Guide to Chain**", U.S. Tsubaki, Inc., 1st edition, 1997.

Shigley, J. E., Mischke, C. R., & Brown, T. H. "**Standard Handbook of Machine Design**", McGraw-Hill, 3rd edition, 1996.

Wright, J. L. "**Standard Handbook of Chains: Chains for Power Transmission and Material Handling**", CRC Press, 2nd edition, 2005.