

ACIONAMENTO DE MOTORES CA A GRANDES DISTÂNCIAS POR MEIO DE TRANSMISSÃO EM CORRENTE CONTÍNUA: ANÁLISE DA ECONOMIA DE COBRE E DA REDUÇÃO DAS PERDAS

Vinicius C. de Paula¹, Hélder de Paula², João A. C. Júnior³, Augusto W. F. V. da Silveira¹, Luciano C. Gomes¹

¹Laboratório de Acionamento Elétricos, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil

²Laboratório de Aplicações Industriais, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil

³PETROBRAS S.A., Brasil

vinicius_cp@hotmail.com, helder@cpdee.ufmg.br, j.castro.jr.84@gmail.com, gutofleury@gmail.com, lcgomes@ufu.br

Resumo - Problemas associados a sistemas de acionamento de motores utilizando modulação por largura de pulso através de cabos longos se encontram amplamente discutidos na literatura e são bastante prejudiciais a vários componentes do sistema. Como alternativa ao emprego de filtros, tal como feito tradicionalmente, propôs-se, em um trabalho anterior, uma configuração alternativa para esse tipo de acionamento, na qual o retificador se encontra próximo à rede de alimentação, distante do inversor, que se situa próximo aos terminais do motor. Deste modo, nos cabos que interligam o retificador ao inversor, haverá circulação de corrente contínua. Além de eliminar todos estes problemas, tal configuração apresenta como benefício adicional uma redução do volume de cobre requerido na transmissão de energia, bem como uma redução das perdas elétricas causadas pelo Efeito Joule. Neste contexto, o presente trabalho tem como principal objetivo realizar um estudo completo a cerca da real economia de cobre entre as duas configurações, contemplando também um estudo de casos com sistemas reais de acionamento encontrados em plantas de mineração, no qual o custo real do seu cabeamento é comparado com aquele relativo à configuração alternativa.

Palavras-Chave - Acionamentos PWM, Cabos Longos, Transmissão CC, Economia de Cobre, Perdas Joulicas.

EMPLOYMENT OF DIRECT CURRENT TRANSMISSION IN LONG CABLE ALTERNATED CURRENT MOTOR DRIVES: EVALUATION OF THE COPPER ECONOMY AND LOSSES REDUCTION

Abstract - High-frequency problems related to Pulse Width Modulation motor drive systems with long cables are widely discussed in the literature and are very harmful to the various system components. Instead of using filters, as it is traditionally done, it was proposed in a previous paper an alternative configuration for this type of motor drive, in which the rectifier is close to the power

supply, apart from the inverter, which is located at the motor terminals. Thus, in the cable that connects the rectifier to the inverter, direct current circulates. Aside from eliminating all these problems, such configuration has the additional benefit of reducing the amount of copper required in the power transmission, as well as reducing electrical losses caused by Joule effect. In this context, this paper aims to carry out a complete evaluation about the real copper economy in this alternative configuration, also presenting a case study involving real drive systems situated in mining plants, in which the actual cost of their cables is compared with that on the alternative configuration.

Keywords - PWM Motor Drives, Long Cables, DC Power Transmission, Copper Economy, Joule losses.

I. INTRODUÇÃO

À aplicação de conversores de frequência no acionamento de motores de indução, associa-se diversos problemas [1, 2]. Um deles é a ocorrência de sobretensões transitórias nos terminais do motor em virtude da propagação e sucessivas reflexões dos pulsos PWM (Pulse Width Modulation) nas extremidades do cabo, que, em alguns casos, podem alcançar valores superiores a três vezes a tensão do barramento CC (corrente contínua) do conversor (V_{CC}) [3]. Tais picos de tensão submetem a isolamento da máquina a um estresse dielétrico repetitivo, podendo reduzir a vida útil dos seus enrolamentos. Casos críticos foram relatados onde a vida útil do motor foi reduzida a poucas semanas [4]. Além disso, em cada transição da tensão de zero para V_{CC} , ou deste valor para zero, a capacitância distribuída do cabo deve ser sucessivamente carregada e descarregada, de forma que, sobreposta à corrente de saída do inversor, aparece uma parcela de corrente transitória e de alta frequência. Esta corresponde à corrente de carga do cabo, cujos picos, no caso de cabos mais longos, podem ser elevados o suficiente a ponto de causar a atuação da proteção do inversor contra sobrecorrentes, ocasionar sobreaquecimento e destruição da capacitância de “snubbers” e ainda resultar em medições inadequadas para fins de realimentação [5-7].

Outro problema diz respeito à circulação de correntes de alta frequência pela terra. A tensão de modo comum gerada pelo inversor excita os acoplamentos capacitivos entre os condutores e partes do motor à terra, produzindo manifestações oscilatórias de corrente de modo comum em cada dv/dt da tensão correspondente. Tais correntes causam problemas de interferência eletromagnética em ambientes industriais, atuação indevida de relés de proteção de falta à



XII CEEL – ISSN 2178-8308
13 a 17 de Outubro de 2014
Universidade Federal de Uberlândia – UFU
Uberlândia – Minas Gerais – Brasil

terra e paradas de máquinas por falhas no rolamento [8, 9]. Correntes de modo comum com amplitude de 50 A foram medidas em um sistema de uma indústria têxtil, composto por 75 motores de 3 kW [7].

Tradicionalmente, a solução adotada para a mitigação desses fenômenos indesejáveis baseia-se na utilização de filtros, de diferentes tipos e funções [10-13]. Contudo, tem-se que os mesmos não representam a solução definitiva para o problema, uma vez que seu custo, peso e dimensões físicas são muitas vezes elevados e as perdas elétricas em seus elementos resistivos degradam a eficiência do sistema de acionamento. Em face disso, foi proposta em [14, 15] uma alternativa totalmente diferente para a eliminação dos fenômenos de alta frequência supracitados, no qual o conversor de frequência foi desmembrado em suas unidades retificadora e inversora, estando agora separadas e distantes entre si, sendo a última posicionada diretamente ao lado do motor. Assim, os cabos longos, antes empregados para a conexão do conversor de frequência ao motor, agora interligam o retificador ao inversor. Tal prática além de eliminar todos os fenômenos de alta frequência descritos anteriormente, possui como vantagem adicional o benefício da redução do volume de cobre requerido pelos cabos longos para uma mesma potência transmitida. A diminuição das perdas nestes cabos e uma análise preliminar da redução da quantidade de cobre nesse sistema de configuração alternativa foram abordadas em [14]. Já em [15], o estudo da quantificação da economia de cobre foi estendida, mas ainda empregando uma abordagem limitada, já que seus resultados, essencialmente teóricos, não necessariamente correlacionavam-se com as bitolas comerciais de cabos.

Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é dar continuidade ao estudo apresentado em [15]. Partindo da premissa da utilização de cabos disponíveis comercialmente, os valores de economia de cobre para o sistema de acionamento com transmissão CC serão redefinidos, atribuindo um caráter mais prático às conclusões do trabalho. É mostrado também um estudo de casos contemplando quatro sistemas de acionamento reais encontrados na indústria de mineração, no qual o custo real do cabeamento é comparado com aquele associado ao da configuração empregando a transmissão CC. Por fim, uma análise financeira contabilizando, no tempo presente, a economia proveniente da redução das perdas ao longo dos anos da utilização do sistema é também apresentada.

II. METODOLOGIA

Em [14-16], apresentou-se de maneira bastante completa e detalhada a metodologia e as equações utilizadas no dimensionamento dos cabos CC da configuração de acionamento proposta. Além disso, em outro artigo (a ser publicado no *XX Congresso Brasileiro de Automática*, com o título de “Acionamento de Motores CA a Grandes Distâncias por Meio de Transmissão em Corrente Contínua: Análise da Economia de Cobre e Redução de Perdas”, que ocorre em setembro de 2014), os autores discutiram sucintamente as principais considerações em relação à metodologia empregada no presente trabalho.

III. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A. Cálculo da economia de cobre

Como se mencionou anteriormente, a economia proporcionada pela redução na quantidade de cobre ao empregar-se a configuração de acionamento proposta é o principal objetivo do presente trabalho. Esta economia é obtida através da redução do número de condutores entre os sistemas (3 condutores para o sistema CA e 2 condutores para o sistema CC).

Foram elaborados gráficos para motores de 50 e 100 cv, com os valores da economia de cobre em função do comprimento dos cabos. Para o dimensionamento das bitolas dos cabos considerou-se, conjuntamente, os critérios térmico e de queda de tensão. Os gráficos das Figuras 1 e 2 ilustram a economia de cobre tanto para as seções teóricas quanto para as seções comerciais. Para a análise destas, considerou-se sempre um valor de seção comercial imediatamente superior à seção teórica calculada e cabos Sintenax Flex [17].

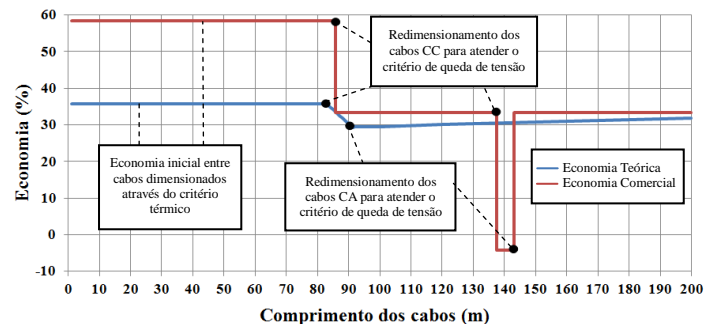


Fig. 1. Economia percentual de cobre teórica e comercial no acionamento de um motor de 50 cv.

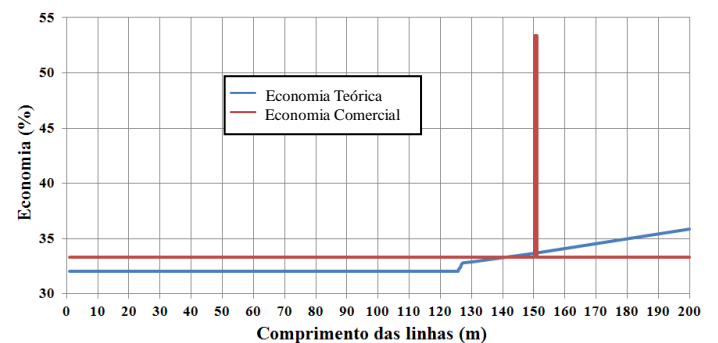


Fig. 2. Economia percentual de cobre teórica e comercial no acionamento de um motor de 100 cv.

Nota-se um comportamento comum nos gráficos das duas figuras. Os gráficos relativos à análise de economia teórica são mais lineares, porque uma vez que suas seções não têm a necessidade de estarem disponíveis comercialmente, não há restrição quanto aos valores encontrados nos cálculos. Assim, quando da construção dos gráficos teóricos, os valores calculados das seções são inalterados. Já para a construção dos gráficos relativos à análise de economia comercial, utiliza-se somente valores de seções disponíveis comercialmente. Por isto, estes gráficos são compostos por retas e degraus, sendo que os últimos representam a mudança de uma seção para outra em um dos sistemas de acionamento.

No intuito de se fazer uma análise mais completa desses gráficos, tomou-se a Figura 1 como exemplo. Inicialmente,

nota-se que os gráficos de economia teórica de cobre são compostos por três partes: uma primeira parte constante, uma parte intermediária crescente ou decrescente e uma terceira parte crescente. Na primeira parte dos gráficos, os condutores de ambos os sistemas mantiveram fixos os valores de suas seções calculadas, definidas pelo critério térmico. Assim sendo, a razão entre as mesmas é constante, resultando num valor fixo de economia de cobre. Este comportamento é verificado até o momento em que um dos sistemas já não atenda mais o critério de máxima queda de tensão permitida, implicando na necessidade do redimensionamento dos seus cabos.

Na parte intermediária dos gráficos, apenas um dos sistemas exige que seus cabos sejam progressivamente redimensionados pelo critério de máxima queda de tensão, enquanto o outro sistema mantém ainda a mesma seção.

Na terceira parte, ambos os sistemas já não atendem mais ao critério da máxima queda de tensão quando mantidas as seções calculadas inicialmente através do critério térmico. Desta forma, os cabos de ambos os sistemas vão sendo contínua e progressivamente redimensionados para que se mantenha um valor percentual de queda de tensão nestes abaixo de 4%.

Tanto a faixa intermediária crescente do gráfico relativo à economia teórica da Figura 2 quanto a inclinação mais acentuada na terceira parte do mesmo, em comparação à terceira parte do gráfico da Figura 1, são explicadas pelo fato de que cabos com bitolas maiores, utilizados em sistemas de maiores potências, apresentam uma maior contribuição de reatância indutiva (e menor contribuição de resistência) ao módulo da sua impedância. Deste modo, no acionamento de motores de potências maiores, haverá maior queda de tensão nos cabos CA do que nos cabos CC, fazendo com que os primeiros deixem de atender o critério de máxima queda de tensão para distâncias menores e, conseqüentemente, aumentando o valor da economia de cobre do sistema CC em relação ao sistema CA.

Ainda tomando a Figura 1 como exemplo, na análise do gráfico de economia comercial, como existem apenas algumas seções disponíveis, as mudanças de bitolas ocorrem em degraus. Inicialmente, a economia de cobre se mantém constante até que o primeiro sistema tenha a necessidade de que seus cabos sejam redimensionados pelo critério de máxima queda de tensão. Neste caso, escolhe-se um cabo de seção comercial imediatamente superior ao escolhido previamente, implicando na ocorrência de um “degrau” neste ponto do gráfico, pois a mudança no valor das seções em um dos sistemas é brusca, ao invés de contínua e progressiva, tal como nos casos anteriores.

No intuito de dar ao gráfico de economia comercial um caráter mais prático, pode-se fazer algumas discussões em relação às tolerâncias ou antecipações no que se refere ao redimensionamento de cabos. O comportamento destes gráficos ao longo do eixo das abscissas depende de dados específicos de cada sistema de acionamento, tais como valores de corrente e fator de potência dos motores, comprimento dos cabos e outros tantos utilizados ao longo deste trabalho no emprego da metodologia proposta. No exemplo do acionamento do motor de 50 cv na Figura 1, ao admitir-se inicialmente uma elevação extra de apenas 0,09°

C nos cabos CA, traduzido em um aumento na tolerância de 0,114% na corrente máxima admissível, pode-se escolher um cabo com seção menor, implicando assim numa economia inicial de 33% na análise das bitolas comerciais, tal como obtido no caso das outras duas figuras. Deste modo, o valor de economia de cobre no emprego da configuração de acionamento CC diminuiria durante este trecho, ocasionando, entretanto, um aumento nas perdas joulicas do sistema CA.

Além disso, na análise do mesmo gráfico, ao se redimensionar os cabos CA um pouco antes da máxima queda de tensão ser atingida, mais precisamente com 3,774% de queda de tensão para a seção de 10 mm² e com 3,837% para a seção de 16 mm², também se tem uma economia constante de 33%. Deste modo, ter-se-ia um gráfico de economia comercial de cobre com um valor constante de 33%.

De forma a se obter resultados mais palpáveis, elaborou-se um gráfico de economia de cobre para cabos de bitolas comerciais em termos financeiros, ao invés de porcentagem, como foi feito anteriormente. Para tal, foi consultada a tabela de preços em [18], para os cabos previamente dimensionados. Deste modo, de posse dos valores das seções variando em função do comprimento dos cabos e de seus preços por metro, tornou-se possível a construção do gráfico da Figura 3.

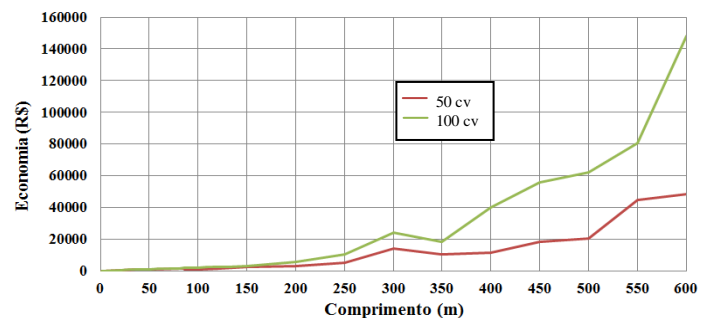


Fig. 3. Economia comercial de cobre em reais em função do comprimento e da potência do motor.

Na figura acima, nota-se que a economia de cobre se mostra bem mais expressiva para maiores comprimentos de cabo e potência dos motores. Em relação ao comportamento distinto dos gráficos, é importante ressaltar que em cabos com bitolas menores, a contribuição da resistência ao módulo de sua impedância é mais significativa do que a contribuição da reatância indutiva. Deste modo, no acionamento de motores de potência mais baixa, haverá maior queda de tensão nos cabos CC do que nos cabos CA, implicando no redimensionamento dos primeiros para comprimentos menores e conseqüentemente reduzindo o valor de economia de cobre. Ressalta-se, no entanto, a diminuição de perdas joulicas quando da utilização de cabos com bitolas maiores, aumentando o valor de economia de energia.

B. Cálculo da economia de energia devido à redução das perdas por Efeito Joule

Em adição à economia de cobre abordada no subitem A, abordar-se-á neste subitem a economia de energia proveniente da redução de perdas joulicas entre os sistemas. Esta redução de perdas, por sua vez, também pode ser traduzida em termos financeiros, como será feito no próximo subitem.

Para efeito de cálculo destas perdas, é necessário que se leve em conta não somente as componentes fundamental ou contínua de corrente que circulam pelos cabos, mas também suas componentes harmônicas. Dito isto, de forma análoga à análise feita para a economia de cobre, foram construídos gráficos que relacionam as perdas nos cabos com o comprimento destes e observou-se que a orientação das retas destes gráficos é idêntica à orientação dos gráficos das Figuras 1-2. Tal situação revela uma relação inversamente proporcional entre economia de cobre e economia de energia, uma vez que a diminuição no valor da bitola de um cabo causa um aumento proporcional em sua resistência e um consequente aumento proporcional em suas perdas. Desse modo, pegou-se como exemplo apenas o gráfico referente às perdas no motor de 50 cv, ilustrado pela Figura 4.

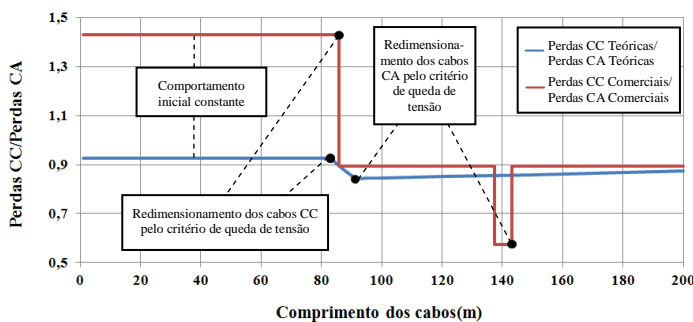


Fig. 4. Relação de perdas joulicas entre os cabos CC e CA em função do comprimento, no acionamento de um motor de 50 cv.

A análise dos gráficos da Figuras 4 é bem semelhante à análise das Figuras 1-2. Porém, pode-se tecer alguns comentários adicionais: primeiramente, no que se refere aos gráficos de bitolas teóricas, quando os cabos CC alcançam o comprimento onde a queda de tensão atinge pela primeira vez os 4%, as perdas nesses se mantêm constantes, porque, a partir daí, para que o valor da queda de tensão seja constante e igual a 4%, a resistência dos cabos deve diminuir na mesma proporção que o aumento dos seus comprimentos, uma vez que nos acionamentos alternativos apenas a resistência dos cabos contribui para a queda de tensão.

Já as perdas nos cabos CA diminuem progressivamente depois de atingirem os 4% de queda de tensão pela primeira vez. Isto ocorre porque para que o valor da queda de tensão nos cabos seja constante e igual a 4%, à medida que o comprimento desses aumenta, a seção transversal do cabo deve aumentar, implicando em uma diminuição do módulo de sua impedância. Aqui, se emprega o termo impedância ao invés de resistência, porque tanto esta quanto a reatância indutiva dos cabos contribuem para a queda de tensão nos sistemas CA. Daí, na análise da Equação 1 simplificada, presente em [16], que fornece o valor da queda de tensão CA, observa-se que dependendo do fator de potência do motor ($\cos\theta$) e da proporção entre reatância (X) e resistência (R_e) nos cabos CA, a resistência pode ter maior ou menor influência na queda de tensão. Ainda na Equação 1, tem-se que L_C é o comprimento dos cabos em metros e V_{LL} é o valor eficaz da tensão nominal de linha na saída do inversor.

$$\Delta V_C = \frac{\sqrt{3} * L_C * I_{CA}^{RMS} * (R_e \cos\theta + X \sin\theta)}{10 * V_{LL}} (\%) \quad (1)$$

Nos casos estudados, observou-se que o comprimento dos cabos cresce numa proporção menor do que a diminuição de sua resistência, ocasionando uma redução progressiva nos valores de perdas e, conseqüentemente, um aumento progressivo da relação entre perdas CC e CA. Essa taxa de redução de perdas depende do valor de bitola dos cabos CA e é tão mais acentuada quanto maior forem as bitolas dos cabos analisados.

Ainda na análise dos gráficos de cabos de bitolas teóricas, antes de estes atingirem os 4% de queda de tensão pela primeira vez, nota-se que a primeira parte do gráfico apresenta um comportamento constante porque, uma vez dimensionados os cabos através do critério térmico, os valores de resistência destes serão constantes até que o limite de 4% de queda de tensão seja atingido. Por fim, na parte intermediária dos mesmos gráficos, a inclinação ou declinação das retas ilustra o redimensionamento precoce dos cabos de uma das configurações, sendo inclinadas quando há primeiro o redimensionamento nos sistemas CA e declinada quando o contrário acontece.

Nos gráficos de perdas nos cabos de bitolas comerciais, o comportamento inicial constante tem a mesma explicação do comportamento inicial das perdas nos cabos teóricos. A partir do comprimento onde os cabos do primeiro sistema de acionamento atingem 4% de queda de tensão pela primeira vez, a análise do gráfico é análoga às análises feitas das Figuras 1-2: quando os cabos de um sistema de acionamento são redimensionados, as perdas nestes diminuem abruptamente, em proporção ao aumento no valor das bitolas e consequente diminuição de resistência. A partir daí, as perdas voltam a crescer na mesma proporção nos cabos dos dois sistemas (proporcionalmente ao aumento do comprimento dos cabos) até que a mesma situação se repita.

C. Estudo de caso em sistemas reais de acionamento

No intuito de atribuir um caráter mais prático ao presente trabalho, utilizou-se dados de quatro sistemas de acionamento reais encontrados em plantas de mineração, com o objetivo de se aplicar a metodologia até aqui estudada. Deste modo, para tais sistemas, apresentados na Tabela 1, com tensão de entrada do retificador de 480 V e tensão de saída do inversor de 440 V (índice de modulação igual a 0,87), empregou-se a configuração de acionamento proposta para posterior análise econômica de cobre e de energia.

Nessa tabela, observa-se que os cabos dos quatro sistemas apresentam bitolas bem superiores àquelas definidas pelo critério da máxima corrente admissível, devido aos elevados comprimentos entre os conversores e os motores acionados, que implicam em elevados valores de queda de tensão. Ainda, vale ressaltar que os cabos CC foram dimensionados de modo que apresentassem valores de queda de tensão o mais próximo possível das quedas de tensão calculadas nos cabos CA. Além disso, são mostrados na tabela os preços dos cabos para cada seção específica, consultados em revendedoras autorizadas, para melhor estimativa da economia.

Tabela 1. Dados de sistemas reais de acionamento encontrados em plantas de mineração e valores de economia de cobre.

Sistema 1: Motor para o acionamento de uma bomba de polpa		Sistema 2: Motor para o acionamento de um alimentador de correia	
Potência do motor acionado (cv)	50	Potência do motor acionado (cv)	60
Comprimento dos cabos (m)	365	Comprimento dos cabos (m)	600
Bitola do cabo CA (mm ²)	3x35 + 16	Bitola do cabo CA (mm ²)	3x95 + 50
Queda de tensão CA (%)	4,80	Queda de tensão CA (%)	3,94
Preço do cabo tripolar CA (R\$/m)	75,50	Preço do cabo tripolar CA (R\$/m)	189,98
Preço do sistema CA (R\$)	27557,50	Preço do sistema CA (R\$)	113988,00
Bitola do cabo CC (mm ²)	2x35	Bitola do cabo CC (mm ²)	2x70
Queda de tensão CC (%)	4,05	Queda de tensão CC (%)	4,03
Preço do cabo unipolar CC (R\$/m)	14,29	Preço do cabo unipolar CC (R\$/m)	30,46
Preço do sistema CC (R\$)	10431,70	Preço do sistema CC (R\$)	36552,00
Economia na transição CA/CC (R\$)	17125,80	Economia na transição CA/CC (R\$)	77436,00
Sistema 3: Motor para o acionamento de um agitador		Sistema 4: Motor para o acionamento de uma bomba de polpa	
Potência do motor acionado (cv)	100	Potência do motor acionado (cv)	500
Comprimento dos cabos (m)	480	Comprimento dos cabos (m)	480
Bitola do cabo CA (mm ²)	3x120 + 70	Bitola do cabo CA (mm ²)	4x (3x185 + 95)
Queda de tensão CA (%)	4,39	Queda de tensão CA (%)	3,88
Preço do Cabo Tripolar CA (R\$/m)	242,54	Preço do Cabo Tripolar CA (R\$/m)	357,65
Preço do Sistema CA (R\$)	116419,20	Preço do Sistema CA (R\$)	686688,00
Bitola do cabo CC (mm ²)	2x95	Bitola do cabo CC (mm ²)	4x (2x120)
Queda de tensão CC (%)	3,96	Queda de tensão CC (%)	3,79
Preço do cabo unipolar CC (R\$/m)	39,95	Preço do cabo unipolar CC (R\$/m)	51,01
Preço do sistema CC (R\$)	38352,00	Preço do sistema CC (R\$)	195878,40
Economia na transição CA/CC (R\$)	78067,20	Economia na transição CA/CC (R\$)	490809,60

A título de informação, tem-se que os cabos dos sistemas tradicionais são tripolares com blindagem (Gsette Inversor de Frequência) e os cabos dos sistemas alternativos são unipolares sem blindagem (Eprotenax Gsette Iristech), sendo estes encontrados, respectivamente, em [19, 20]. O uso da blindagem somente nos cabos CA justifica-se pela necessidade de atenuação dos problemas de alta frequência advindos da operação do inversor. Já nos cabos do sistema proposto, estes problemas são naturalmente eliminados, não havendo necessidade da utilização da mesma.

Como já se esperava, os valores de economia foram maiores para os sistemas de acionamento dos maiores motores e com maiores comprimentos de cabos. O fato de não ser necessário o uso da blindagem nos sistemas alternativos consiste em mais uma vantagem destes, o que reduz ainda mais os valores iniciais de investimento.

Com o intuito de se quantificar a economia de energia abordada anteriormente, julgou-se interessante, em conjunto com a economia de cobre, calcular-se a economia obtida devido à redução das perdas joulicas nos sistemas CC em comparação aos sistemas CA. Uma vez que em sistemas de acionamento de motores de grandes potências a impedância dos cabos que interligam conversor e motor é predominantemente indutiva, nota-se na Tabela 1, que as seções dos cabos CA são bem maiores que as seções dos cabos CC em alguns casos, fazendo com que as perdas CC nem sempre sejam menores que as perdas CA. Deste modo, de forma a ilustrar a correlação entre a economia no investimento inicial (custo dos cabos) e economia ao longo do tempo (redução de perdas), julgou-se interessante calcular a economia primeiramente com as seções definidas pelos métodos clássicos (critérios térmico e de queda de tensão) e em seguida recalculá-la a mesma considerando a hipótese de valores iguais das bitolas CA e CC. É importante ressaltar que esta se trata de uma condição fictícia, tendo como único

objetivo a análise da influência da economia de energia sobre o valor final de economia total.

No contexto da matemática financeira, de posse de uma taxa de juros fixa i e um determinado período de tempo n , é possível se calcular o valor presente da economia de energia obtida ao longo da vida útil dos cabos de um sistema de acionamento, através da equação:

$$VP = \frac{VF}{(1+i)^n} \quad (2)$$

Onde:

VP : valor presente

VF : valor futuro

O último é obtido através da aplicação clássica de juros mensais ao valor das perdas. Para o cálculo destas ao longo de um determinado período de tempo, considerou-se que:

- Os sistemas funcionam por 16 horas diárias;
- O preço industrial da energia elétrica é R\$ 0,22/kWh;
- A taxa de juros que será aplicada é 0,4868% ao mês (6% ao ano);
- O período analisado é 20 anos, o correspondente à vida útil média dos cabos.

Na Tabela 2 estão os valores de economia de cobre e economia de energia entre as duas metodologias de acionamento para os sistemas da Tabela 1. No dimensionamento para seções CA e CC iguais, igualou-se as seções CC às seções CA, uma vez que estas são as seções reais dos sistemas de acionamento aqui analisados. Neste contexto, espera-se que as perdas CC sejam sempre menores que as perdas CA, reduzindo somente a economia de cobre obtida em relação ao dimensionamento clássico.

Pode-se notar nesta tabela que a economia total ao longo do período analisado foi bem semelhante para os dois métodos de dimensionamento dos cabos. Ainda, dependendo

Tabela 2. Economia de cobre e economia de energia dos sistemas CC comparativamente aos sistemas CA.

Potências dos motores (cv)	Dimensionamento clássico	Seções CA e CC iguais
Economia de cobre (R\$)		
50	17125,80	17125,80
60	77436,00	66048,00
100	78067,20	67499,60
500	490809,60	397845,29
Economia de energia (R\$)		
50	8952,13	8952,13
60	-1448,1	7072,75
100	2598,16	13588,37
500	-35289,6	50136,6
Economia total (R\$)		
50	26077,93	26077,93
60	75987,90	73120,75
100	80665,36	81087,97
500	455520,00	447981,89

do preço da energia elétrica considerada nos cálculos, essa diferença pode ser maior ou menor. De qualquer maneira, percebe-se que em todos os casos houve valores significativos de economia na transição dos sistemas de acionamento tradicionais para os propostos.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho realizou-se a extensão dos estudos sobre impactos econômicos no emprego de uma nova configuração de sistemas de acionamento. Notou-se através dos resultados obtidos, que na grande maioria dos casos analisados, os resultados referentes à economia de cobre foram favoráveis para os sistemas de acionamentos alternativos. Além disso, mesmo nos casos onde a economia de cobre chegou a apresentar valor negativo, este foi compensado pela economia de energia resultante da redução de perdas na utilização de cabos de seções maiores.

Através de uma análise conjunta da economia de cobre e da economia de energia, observou-se que quando há diminuição em uma delas, há um aumento quase proporcional na outra, resultando sempre em valores de economia favoráveis à configuração de acionamento proposta.

Assim sendo, tem-se que esta configuração, além de eliminar todos os problemas de alta frequência presentes em sistemas de acionamento com cabos longos, apresenta também as vantagens econômicas comprovadas no presente trabalho. Todavia, para que haja ampla aceitação desta ideia pela indústria, ainda há o que se analisar em estudos posteriores. Como exemplo, pode-se citar a necessidade do aumento da confiabilidade do inversor, uma vez que este ficaria, por vezes, em locais hostis e de difícil acesso para manutenção. Além disso, devem ser analisadas as dificuldades na comunicação entre as pontes retificadora e inversora, agora distantes, e por fim, estudos abrangendo um sistema efetivo de proteção associado aos sistemas CC. Todas estas questões estão sendo endereçadas em trabalhos atualmente em andamento.

REFERÊNCIAS

[1] R. J. Kerkman, "Twenty Years of PWM AC Drives: When Secondary Issues Become Primary Concerns", *IEEE IECON 22nd Internacional*

Conference on Industrial Electronics, Control, and Instrumentation, vol. 1, pp. LVII-LXIII, August 1996.

[2] L. A. Saunders, G. L. Skibinski, S. T. Evon, D. L. Kempkes, "Riding the Reflected Wave – IGBT Drive Technology Demands New Motor and Cable Considerations", *IEEE 43rd IAS Annual Petroleum and Chemical Industry Conference*, pp. 75-84, 1996.

[3] R. J. Kerkman, D. Leggate, G. L. Skibinsky, "Interaction of drive modulation and cable parameters on AC motor transients", *IEEE 31th IAS Annual Meeting*, vol. 1, pp. 143-152, October 1996.

[4] M. Fenger, S. R. Campbell, J. Pedersen, "Dealing with Motor Winding Problems Caused by Inverter Drives", *IEEE 44th IAS Annual Meeting*, pp. 65-76, 2002.

[5] D. Leggate, J. Pankau, D. Schlegel, R. J. Kerkman, G. L. Skibinski, "Reflected Waves and Their Associated Current", *IEEE 33th IAS Annual Meeting*, vol. 1, pp. 789, 798, 1998.

[6] M. F. Rahman, T. Haider, E. Haque, T. R. Blackburn, C. Grantham, "Modelling and Experimental Studies of Effects of Steep Fronted Inverter Waveforms on Motor and Supply Cabling and Their Remedies", *IEEE 1999 Internacional Conference on Power Electronics and Drive Systems*, vol. 1, pp. 519-524, 1999.

[7] S. Suwankawin, P. Pairodomonchai, S. Sangwongwanich, C. Sukhapap, W. Tearwattananattikal, "Destruction by Charge Current and Its Solution for PWM Inverter Feeding Multiple Motors Through Long Cables", *IEEE 40th IAS Annual Meeting*, vol. 2, pp. 1382-1389, 2005.

[8] A. V. Jouanne, Z. Haoran, A. K. Wallace, "An Evaluation of Mitigation Techniques for Bearing Currents, EMI and Overvoltages in ASD Applications", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 34, n. 5, pp. 1113-1122, 1998.

[9] R. S. Araujo, R. A. Rodrigues, H. de Paula, L. M. R. Baccarini, A. V. Rocha, "Premature wear and recurring bearing failures in an inverter driven induction motor — Part I: Investigation of the problem", *IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 1-6, 2013.

[10] R. S. Araujo, R. A. Rodrigues, H. de Paula, B. J. Cardoso Filho, L. M. R. Baccarini, A. V. Rocha, "Premature wear and recurring bearing failures in an inverter driven induction motor— Part II: The proposed solution", *IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 1-8, 2013.

[11] M. Hongfei, X. Dianguo, "Research of Inverter Output Filters for PWM Drives", *IEEE International Conference on Electrical Machines and Systems*, vol. 1, pp. 546-549, 2001.

[12] B. Bolsens, K. De Brabandere, J. Van Den Keybus, J. L. Driesen, R. Belmans, "Transmission Line Effects on Motor Feed Cables: Terminator Design and Analysis in the Laplace-Domain", *IEEE International Electric Machines and Drives Conference*, pp. 1866-1872, 2003.

[13] P. T. Finlayson, "Output Filters for PWM Drives with Induction Motors", *IEEE Industry Applications Magazine*, pp. 46-52, 1998.

[14] J. A. Castro Júnior, H. de Paula, B. J. Cardoso Filho, "Avoiding Undesirable High-Frequency Phenomena in Long Cable Drives: Rectifier-to-Inverter Connection Through Long DC Cable - Part I: Evaluation of the Losses Reduction and Copper Economy", *IEEE 35th Annual Conference of the IES*, pp. 1045-1050, 2009.

[15] J. A. Castro Júnior, H. de Paula, B. J. Cardoso Filho, A.V. Rocha, "Rectifier-to-inverter connection through long DC cable - part II: The complete copper economy characterization", *IEEE IAS Annual Meeting*, pp. 1-7, 2011.

[16] João Américo de Castro Júnior. Uma Nova Configuração de Sistemas de Acionamento: Conexão Retificador-Inversor através de Cabos Longos – Análise da Economia de Cobre e da Proteção do Sistema contra Falhas. Dissertação de mestrado. UFMG – Belo Horizonte, 2010.

[17] Catálogo do fabricante Prysmian, *Cabo Sintenax Flex*, retirado do site: http://br.prysmiangroup.com/br/files/sintenax_flex.pdf. [Acesso: 25/03/2013].

[18] Catálogo do fabricante Prysmian, *Tabela de Preços*, retirado do site: http://br.prysmiangroup.com/br/files/Tab_JAN14.pdf. [Acesso: 25/04/2013].

[19] Catálogo do fabricante Prysmian, *Cabo Gsette Inversor de Frequência*, retirado do site: http://br.prysmian.com/br/files/gsette_inv_frequencia.pdf. [Acesso: 02/12/2013].

[20] Catálogo do fabricante Prysmian, *Cabo Eprotenax Gsette Iristech*, retirado do site: http://br.prysmiangroup.com/br/files/gsette_irstech_new.pdf. [Acesso: 02/12/2013].