Unisanta Science and Technology, 2017, 18, December
Published Online 2017 Vol.6 N°2 http://periodicos.unisanta.br/index.php/sat)

UNISANTA
Science and Technology
ISSN 2317-1316

Modelagem em MATLAB para determinar o tempo de aceleração de um motor aplicado em bomba

Leonardo do Espirito Santo[1,2], Rodrigo Silvério da Silveira[1,2], Dorotéia Vilanova Garcia[1], Mauricio Conceição Mario[1,2] e Cláudio Luís Magalhães Fernandes[1,2]

[1]**Unisanta** – Universidade Santa Cecília –Programa de Mestrado em Engenharia Mecânica -PPGEMec
Rua Oswaldo Cruz, 266- Santos-SP, Brasil

[2]Faculdade de Tecnologia de São Vicente - FATEF
Av. Presidente Wilson, 1013, Itararé, São Vicente, Brasil

E-mail: leonardosantoe@gmail.com
Received April, *2017*

Resumo: O presente trabalho tem por objetivo, desenvolver de um programa capaz de determinar o tempo de aceleração de motores de indução trifásicos (MIT) aplicados no acionamento de bombas hidráulicas. Para isso fora desenvolvida uma modelagem matemática a partir da ferramenta MatLab®. No programa proposto, os dados de uma bomba são inseridos e este, por sua vez, fornece o conjugado do motor a ser escolhido para acionamento desta. Tão logo seja escolhido o motor, seus dados deverão alimentar o programa, que se encarregará de gerar, como resultado, o tempo de aceleração deste motor, fator importante, utilizado para proteção elétrica destas máquinas elétricas. Os resultados demonstraram que o dimensionamento de motores realizado a partir do software MatLab proporcionam maior rapidez, eficiência e precisão em relação a métodos convencionais, além de evitar possíveis erros. Conclui-se que o estudo realizado apresenta se como ferramenta eficaz destinada a profissionais ligados a este setor, já que resulta em maior rapidez no dimensionamento além de oferecer flexibilidade quanto ao desenvolvimento de modelagens dedicadas a cálculos de acionamento de motores.

Palavras chave: fotocatálise, corantes, tratamento de água, indústria têxtil. processo oxidativo avançado.

Modeling in MATLAB to determine the acceleration time of a pump motor

Abstract: This work aims to develop a program capable of determining the acceleration time of three - phase induction motors (MIT) applied in the drive of hydraulic pumps. For this, mathematical modeling was developed from the MatLab® tool. In the proposed program, the data of a pump are inserted and this, in turn, provides the motor torque to be chosen for driving it. As soon as the engine is chosen, its data must feed the program, which will be in charge of generating, as a result, the acceleration time of this motor, an important factor, used for electrical protection of these electric machines. The results showed that the engine sizing done from the MatLab software provides greater speed, efficiency and accuracy compared to conventional methods, in addition to avoiding possible errors. It is concluded that the study presents itself as an effective tool for professionals related to this sector, as it results in a faster dimensioning, besides offering flexibility in the development of models dedicated to motor drive calculations.

Keywords: photocatalysis, methylene blue dye, TiO_2, textile industries, water, Advanced Oxidative Processes.

1. Introdução

Para transformar energia mecânica em energia hidráulica são utilizadas bombas, sendo estas divididas em diversos tipos, como engrenagem, palheta e centrífuga. Sua aplicação é de fundamental importância, pois é com estas que ocorre todo o transporte de fluidos dentro de uma indústria [1]. Neste trabalho foi selecionada como base de cálculo uma bomba de deslocamento positivo, que pode ser classificada também como bomba volumé-

Copyright © 2017 ISESC.

trica, cuja função é fornecer energia ao líquido já sob a forma de pressão [2]. Para o funcionamento desta bomba, há a necessidade do acoplamento a um motor elétrico, que tem a função de transformar energia elétrica em energia mecânica.

O motor elétrico trifásico (MIT), é um equipamento que tem a função fundamental de exercer movimento mecânico dentro de um ambiente fabril, possuindo aplicações diversas como esteiras transportadoras, trituradores, ventiladores, exaustores e bombas, sendo que para cada aplicação o profissional deve dimensionar um MIT especifico de acordo com o tipo de carga [8].

O MIT necessita de uma elevada corrente de partida, em condições nominais não acarreta em indesejáveis aquecimentos. Em contra partida, se as partidas forem lentas em função de sobre carga mecânica, o motor sofrerá aquecimentos adicionais, assim elementos de proteção contra sobrecorrente deveram atuar, para o desligamento do motor, para dimensionamento destes dispositivos torna-se necessário o conhecimento prévio do Tempo de Aceleração da aplicação, pois através deste, pode-se verificar se a carga pode ser acionada pelo motor selecionado, dentro das faixas exigidas pela estabilidade térmica do material isolante e não ultrapasse o limite de ruptura das barras do rotor [8].

O tempo de aceleração deve ser menor que o tempo de disparo do dispositivo de proteção que assegura o funcionamento nominal do motor. Por outro lado, o tempo de rotor bloqueado que é fornecido pelo fabricante do motor deve ser maior que o tempo de disparo da proteção, esta condição deve ser satisfeita, pois irá proteger o motor contra elevações térmicas inadmissíveis.

O Tempo de Aceleração da aplicação é a porção de tempo em que o motor acelera de 0 até 100% da sua velocidade nominal. Esta informação pode vir a ser inserida em dispositivos de proteção para que, caso o motor venha a desenvolver aceleração maior que a estipulada, o dispositivo referido seja imediatamente atuado, interrompendo o funcionamento do motor.

Uma forma de aplicação destes dados é através da inserção deste em um inversor de frequência já que este último, além da sua função principal, que é controlar a velocidade de um MIT, também oferece proteções elétricas diversas possibilitando o desligamento do motor em caso de anomalia em seu funcionamento.

O tempo de partida de um motor acoplado a uma carga é utilizado para dimensionar um disposto de proteção do MIT.

O gráfico 1 apresenta uma curva de um relé térmico que tem a função de proteger o motor contra sobre carga, a curva é uma relação entre tempo e corrente de disparo do dispositivo [9].

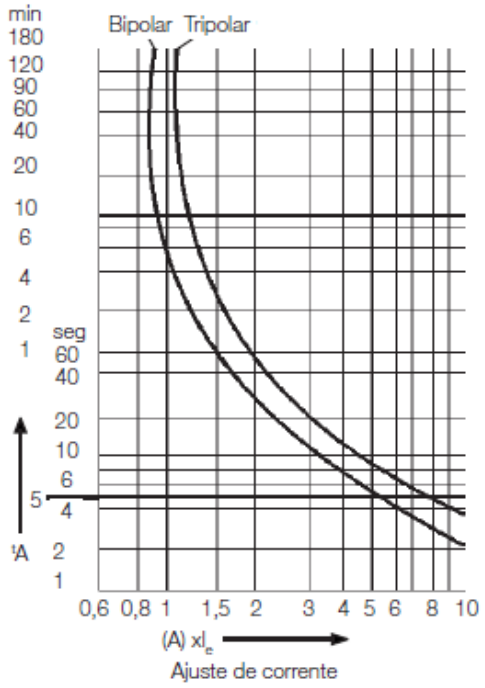

Gráfico 1 – Curva de disparo do Rele Térmico.

Copyright © 2017 ISESC

Para o dimensionamento do motor e respectivo cálculo de tempo de aceleração, são utilizadas as equações com base em referências já consolidadas, através das quais, após a realização dos cálculos torna-se possível avaliar a aplicabilidade da junção bomba e motor [8].

O MatLab é uma ferramenta computacional de pesquisa e desenvolvimento largamente utilizada no meio cientifico, especialmente em engenharias, para o processamento de cálculos polinomiais, simulação, matrizes dentre outras finalidades [4][5]. Desta forma, visando maior precisão nos cálculos, o MatLab, se apresenta como uma ferramenta que possui todas as características necessárias às implementações necessárias a este trabalho.

Com os dados característicos da carga, como rotação nominal, potência e momento de inércia, é possível determinar o valor do conjugado nominal do motor a ser selecionado. Através deste valor, seleciona-se em um catálogo, o motor mais adequado, devendo este possuir conjugado maior que o da respectiva carga. Após a seleção do motor, e de posse dos seus dados de rotação, conjugado nominal, conjugado com o rotor bloqueado, conjugado máximo, rendimento, momento de inércia e tempo de rotor bloqueado, é possível determinar o tempo de aceleração, definindo assim se o motor virá a realizar o trabalho necessário ao bom funcionamento da bomba. Tais ações possibilitam desenvolver uma modelagem computacional para dimensionamento de um MIT afim de atender os requisitos de uma bomba de deslocamento positivo, objetivo do presente trabalho. A seguir serão apresentados os cálculos necessários ao dimensionamento do motor de acordo com uma carga específica.

Para calcular o conjugado mecânico da bomba, utiliza-se a equação 1.

$$C_0 = \frac{716.P}{n_s} \qquad (1)$$

Sendo,

C_0 – Conjugado mecânico (Kgfm)
P – Potência (cv)
n_s – Rotação da carga (rpm)

As curvas características de conjugado de cargas são classificadas como Constante, Linear, Quadrático, Hiperbólico e Não definidos [8]. Para o cálculo destes conjugados, utiliza-se a equação 1, demonstrada a seguir:

$$C_c = C_0 + (K_c.n^x) \qquad (2)$$

Sendo,

C_c – Conjugado resistente da carga em Nm.
C_0 – Conjugado da carga para a rotação zero em Nm.
k_c – Constante que depende da carga.
x – Parâmetro de conjugado.

O parâmetro x deve ser modificado conforme o tipo de carga.

No gráfico 2 é apresentado uma curva de carga com conjugado constante, sendo que o parâmetro x recebe o valor de 0. Este tipo de conjugado normalmente é encontrado em: compressores a pistão, bombas a pistão, guindastes, britadores talhas e transportadores contínuos [8].

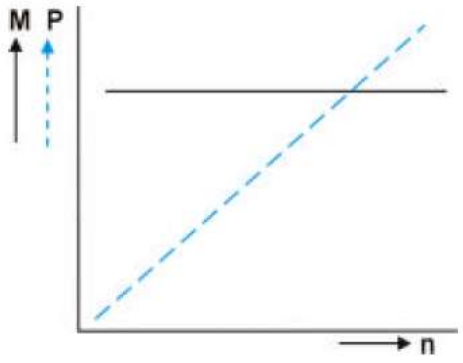

Gráfico2 – Curva de conjugado constante. n) Rotação; M) Conjugado resistente; P) Potência.

Copyright © 2017 ISESC

Para o cálculo de conjugado da carga para o torque constante, é utilizado a equação 4.

$$C_c = C_0 + (K_c.n^x) \quad (3)$$
$$C_c = C_0 + k_c \quad (4)$$

As cargas com conjugado linear apresentam as características demonstradas no gráfico 3. Nesse caso o conjugado varia linearmente em função da rotação, desse modo o parâmetro x passa a assumir valor 1.

No cálculo de conjugado da carga para o torque linear, utiliza se a equação 6. Esta última aplicada em calandras, bombas centrifugas, bombas de vácuo, dentre outras [8].

$$C_c = C_0 + (K_c.n^x) \quad (5)$$
$$C_c = C_0 + (K_c.n) \quad (6)$$

Sendo,
$C_c -$ Conjugado resistente da carga em Nm
$C_0 -$ Conjugado da carga para a rotação zero em Nm
$k_c -$ Constante que depende da carga (Adimensional)
$n -$ Rotação da carga (rpm)

No conjugado quadrático, também denominado de parabólico, o torque varia com o quadrado da rotação, desse modo o parâmetro x deve ser igual a 2.

São exemplos de carga com este tipo de conjugado: bombas centrífugas, ventiladores, misturadores e compressores centrífugos.

Para o cálculo do conjugado quadrático, é utilizado a equação 7. No gráfico 4 é apresentado uma curva de carga para este tipo de conjugado.

$$C_c = C_0 + (K_c.n^2) \quad (7)$$

O conjugado hiperbólico é encontrado normalmente em cargas do tipo bobinadeiras de fio, descascador de toras, tornos e dentre outras [8].

O gráfico 5, apresenta a curva característica deste tipo de conjugado no qual o parâmetro x deve ser igual a -1. Para o cálculo do conjugado hiperbólico, utiliza-se a equação 8.

$$C_c = \frac{k_c}{n} \quad (8)$$

As cargas com curva classificada como Não Definidas possuem a característica de conjugado demonstrada no gráfico 6. Este tipo de carga deve ser analisado pelo máximo torque absorvido. Nesse tipo de conjugado não é possível definir a equação de forma precisa, devido a esse fato, utiliza se a mesma equação 3 definida para conjugados constantes.

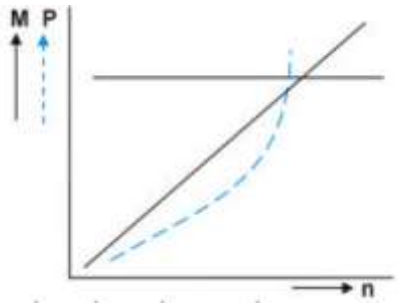

Gráfico 3 - Curva de conjugado linear. n) Rotação; M) Conjugado resistente; P) Potência.

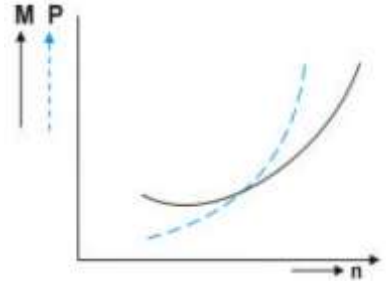

Gráfico 4 – Curva de conjugado quadrático. n) Rotação; M) Conjugado resistente; P) Potência.

Copyright © 2017 ISESC

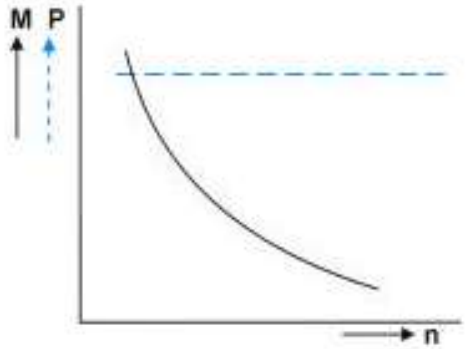

Gráfico 5. Curva de conjugado hiperbólico. n) Rotação; M) Conjugado resistente; P) Potência.

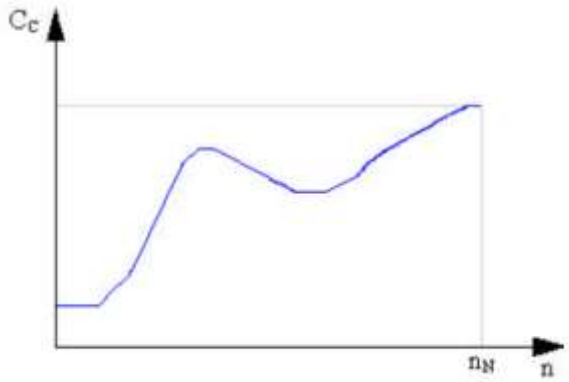

Gráfico 6. Curva de conjugado não definido. nm) Rotação; Cc) Conjugado resistente.

O conjugado resistente médio da carga (C_{rmed}) é obtido através de equações específicas para cada tipo de conjugado,

Neste estudo será adotado o tipo conjugado constante, no qual C_{rmed} é definido como:

$$C_{rmed} = C_n \quad (9)$$

Sendo,

C_{rmed} é o conjugado resistente médio da carga
C_n é o conjugado nominal do motor.

Para determinar o Tempo de Aceleração (T_a) do motor utilizado neste estudo, torna se necessário o calculo do Conjugado Real (C_j), o Conjugado Médio do Motor (C_{mmed}) e Momento de Inércia (J_{ce}),

Estes cálculos são realizados através de dados obtidos no catálogo do motor. A equação 10 a seguir apresenta o cálculo do Conjugado Real.

$$C_j = C_n.Rend \quad (10)$$

Sendo,
C_j – Conjugado Real (Kgfm)
C_n – Conjugado nominal (Kgfm)
Rend – Rendimento do motor com 100% da potência nominal (%)

O Conjugado Real (C_j) deve ser maior que o Conjugado mecânico da bomba. Após essa comprovação deve-se calcular o Conjugado Médio do Motor (C_{mmed}) utilizando a equação 11.

$$C_{mmed} = 0{,}45.\left(\frac{C_p}{C_n} + \frac{C_{máx}}{Cn}\right).C_n.9{,}81 \quad (11)$$

Sendo,
C_{mmed} – Conjugado médio do motor (Nm)
$\frac{C_p}{C_n}$ – Conjugado com o rotor bloqueado (adimensional)
$\frac{C_{máx}}{C_n}$ - Conjugado máximo (adimensional)

Copyright © 2017 ISESC

O Momento de inércia da carga referido ao eixo do motor (J_{ce}) é uma medida da resistência que um corpo oferece a uma mudança em seu movimento de rotação em torno do eixo, no qual o seu cálculo é determinado conforme equação 12 [8].

$$J_{ce} = J_c \left(\frac{N_c}{N_m}\right)^2 \quad (12)$$

Sendo,
J_{ce} – Momento de inércia da carga referido ao eixo do motor (Kgm²)
J_c – Momento de inércia da carga (Kgm²)
N_c – Rotação da carga (rpm)
N_m – Rotação do Motor (rpm)

O Tempo de Aceleração (t_a) é determinado na equação 13 que representa a faixa de tempo em que o motor irá partir a carga até 100% da velocidade nominal.

$$t_a = \frac{\pi . n_m}{30} . \left(\frac{Jm + Jce}{Cmmed - Crmed}\right) \quad (13)$$

Sendo,
t_a – Tempo de aceleração (s)
n_m – Rotação nominal do motor (rpm)
J_m- momento de inércia do motor (kgm²)
J_{ce} - momento de inércia da carga referido ao eixo do motor (kgm²)
C_{mmed} - conjugado médio do motor (Nm)
C_{rmed} - conjugado resistente médio da carga (Nm)

Resultado de aceitação da junção motor e da carga é expressa em %. Recomenda-se que o tempo de aceleração seja menor ou igual a 80% do tempo de rotor bloqueado para garantir o funcionamento correto da aplicação [3].

$$Aceitação = \left(\frac{t_a}{t_r}\right).100 \quad (14)$$

Sendo,
t_a– Tempo de aceleração (s)
$\mathbf{t_r}$ – tempo de rotor bloqueado (s)

2. Material e Métodos

Com base nas equações estudadas, foram selecionadas as que atenderiam a carga referida. A interface entre o software e o usuário fora modelada com base nas referências expostas. Através desta, o usuário insere os dados da bomba e do motor, o software MATLAB efetua os cálculos necessários apresentando uma resposta sobre a viabilidade da instalação do referido motor na carga com o tempo de partida da aplicação. O algoritmo elaborado no Malab é apresentado no quadro 7.

3. Resultados

Foi utilizado como exemplo de aplicação da modelagem, dados fornecidos pelo fabricante de uma bomba. Neste caso a bomba possui um torque constante, logo o valor do conjugado resistente médio é o mesmo que o conjugado nominal. $C_{rmed} = C_c$

A tabela 1 apresenta os dados mecânicos.

Tabela 1 – Dados da Carga

Descrição	Valores
Momento de inércia	0,0033 Kgm²
Conjugado Constante	517 Nm – 52,7013 Kgfm
Rotação	3600 rpm

Fora selecionado um motor [6] com um torque (Cn) de 60 Kgfm que inicialmente é superior ao da carga (Cc) de 52,7013 Kgfm [9]. A tabela 2 apresenta os dados do catálogo de motor escolhido.

Tabela 2 – Dados do Motor.

nm	Cn	Cp	Cm	R	Jm	T
3580	60	1,7	2,5	93,8	4,36666	70

Sendo,
nm – Rotação (rpm)
Cn – Conjugado Nominal (Kgfm)
Cp/Cn – Conjugado de partida (adimensional)
Cmax/Cn – Conjugado máximo (adimensional)
R – Rendimento em 100% da potencia nominal (%)
Jm – Momento de inércia (Kgfm²)
T – Tempo de rotor bloqueado (s)

Com o conjugado nominal e o rendimento fora possível determinar se o torque seria maior que o da carga, através da equação 10. Foi calculado o valor de 56,28 Kgfm, aceitável por ser superior ao nominal. Utilizando a equação 11 fora calculado o valor de 1112,45 Nm que corresponde ao Conjugado médio do motor (Cmmed).

O momento de inércia da carga referido ao eixo do motor (Jce) fora calculado utilizando a equação 12, resultando no valor de 0,003337. Com os dados de Jce e Cmmed foi possível calcular o valor do tempo de aceleração utilizando a equação 13 que resultou em 2,75 s.

Copyright © 2017 ISESC

```
%Artigo Tempo de aceleração
resp='s';
while resp=='s' || resp=='S'
%Inicio do programa
   clear all;
   clc;
% Determinação do tempo de aceleração de um motor
disp('Cálculo do tempo de aceleração de um equipamento');
disp('');
cc=input('Dê o conjugado da carga em (Nm) : ');
jc=input('Dê o momento de inércia da carga em (Kgm²) : ');
nc=input('Dê a rotação nominal da carga (rpm) : ');
ck = cc/9.81;
fprintf ('O conjugado da carga em (Kgfm) é: %3.2f\n', ck);
disp (' ');
disp('Escolha um motor com o conjugado maior que o da carga e insira os dados abaixo');
disp('');
nm=input('Dê a rotação nominal do motor em (rpm) : ');
cn=input('Dê o conjugado nominal do motor maior que o conjugado da carga em Kgfm : ');
cp=input('Dê o conjugado de partida do motor escolhido Cp/Cn (adimensional) : ') ;
cmax=input('Dê o conjugado máximo do motor escolhido Cmáx/Cn (adimensional) : ');
re=input('Dê o rendimento do motor em 100% da potência nominal : '); % Rendimento
jm=input('Dê o momento de inércia do motor em (kgm²) : ');
tr=input('Dê tempo de rotor bloqueado do motor em (s) : ');
disp('-----------------------------------------------------');
disp('Resultados da aplicação');
cr=cn*(re/100); %Conjugado real do motor;
fprintf ('O conjugado real do motor em (Kgfm) é: %3.2f\n ', cr);
cmmed=0.45*(cp+cmax)*cn*9.81;
fprintf('O conjugado médio do motorem (Nm) é: %3.2f \n', cmmed);
jce=jc*((nc/nm)^2);
fprintf ('O momento de inércia da carga referido ao eixo do motorem (Kgm²) é: %5.8f\n',
jce);
ta=((pi*nm)/30)*((jm+jce)/(cmmed-cc));
t=(ta/tr)*100;
if cr>ck &&  t<80
    disp('A instalação do motor é viável.');
    disp('');
    fprintf('O Tempo de aceleração em segundos é : %3.2f\n',ta);
elseif cr<ck
disp('A instalação não é viável porque o conjugado do motor é menor que o conjugado
da carga, escolha outro motor e insira os novos dados');
elseif t>80
fprintf('O Tempo de aceleração em segundos é : %3.2f\n',ta);
disp('A instalação não é viável porque o tempo de aceleração da aplicação é maior que
o 80% do tempo de rotor bloqueado, escolha outro motor e insira os novos dados');
end
disp('-----------------------------------------------------');
 %Fim do programa
   resp=input('Novo cálculo? s ou n? ', 's'); % 's' é de string
   while resp~='s' && resp~='S' && resp~='n' && resp~='N'
        disp('Resposta errada..........tente novamente...');
        resp=input('Novo cálculo? s ou n? ', 's');% 's' é de string
   end
end
```

Quadro 7. Algoritmo em Matlab.

Copyright © 2017 ISESC

4. Conclusão

Com o conjugado real de 56,28 Kgfm, pode-se considerar este valor aceitável já que é superior ao conjugado nominal da carga que é de 52,70 Kgfm. O tempo de aceleração de 2,75 s é viável já que o tempo de aceleração da aplicação corresponde ao um valor menor que 80% do valor de rotor bloqueado que é de 70s. A modelagem matemática realizada no Matlab atendeu às necessidades de dimensionamento de um motor elétrico trifásico para uma bomba de pistão, fornecendo ao eventual operador, o valor de tempo de aceleração, que é um dado de extrema importância para parametrizar elementos de proteção do motor, como um inversor de frequência por exemplo. Sugere se que futuras pesquisas sejam feitas envolvendo outros tipos de bombas, como as centrifugas ou até mesmo com outros tipos de cargas, como compressores e redutores.

Referências

[1] Santos, R.M.V;Garcia,D.V. "Modelagem em MATLAB para Determinação do Rendimento de uma Bomba Centrífuga" *Unisanta Science and Technology*, 2015, 6, December Published Online 2015 Vol.4 Nº2.

[2] Mattos, E.,E.; Falco, R., "Bombas Industriais" Interciência, 2. ed., p.109, 1998.

[3] WEG Technical Notes; Considerações sobre redimensionamento de motores elétricos de indução" Lumiere Eletric Ed. 166.

[4] Batista, R.; Da Silva Filho,J.I., Mario,M.C., Garcia,D.V.; "Resposta transitórias de funções de transferências de controle de processos com o apoio do Matlab®"*Seleção Documental*, v.43, p.22-23, 2016.

[5] Dos Santos,H.,C., Santos,A.R., Garcia,D.V. Moraes Jr,D.; "Modelagem do volume de um líquido armazenado em um tanque cilíndrico horizontal utilizando simulador MatLab" *Seleção Documental*, v.42, p.19, 2016.

[6] WEG; Linha W21 Motores Trifásicos"p.4,CAT 001.67/042007.

[7] Bulgarelli, R., "Proteção Térmica de motores de indução trifásicos industriais "p.48, 2006.

[8] WEG DT-6; Motores elétricos assíncronos e síncronos de média tensão – especificação, características e manutenção" p. 82 -87, Revisão 3, 07/2015.

[9] WEG; "Rele térmico linha RW50042397"

Copyright © 2017 ISESC