

# CONTROLE DE TORQUE DE PARAFUSAMENTO EM UM SISTEMA DE MALHA FECHADA, BASEADO NA RELAÇÃO CORRENTE - TORQUE.

T.C.D.A. Silva<sup>1</sup>; S.J.Bimbi<sup>1</sup>;

1- Faculdade de Tecnologia de Osasco – “Prof. Hirant Sanazar”.  
Rua Pedro Rissato, 30 – Vila dos Remédios, Osasco – SP, Brasil.  
CEP.:06296-220  
Telefone: (11) 3603-9910 – Telefone: (11) 3656-0203  
[\\*thiago\\_silva1147@yahoo.com](mailto:*thiago_silva1147@yahoo.com)

**RESUMO:** Esta pesquisa está direcionada ao estudo do comportamento de motores de corrente contínua (DC) presente em um sistema de parafusamento manual ou automático. O sistema está disposto de um circuito microcontrolador capaz de medir a corrente do motor através de um sensor de corrente conectado a uma entrada analógica. Com este dado é possível quantizar a relação entre corrente e torque, fazendo com que possa ser controlado o torque aplicado a um parafuso. Os parâmetros de limite de torque podem ser configurados através de uma Interface Homem – Máquina (IHM) na qual os valores desejados possam ser inseridos a fim de o controle ser executado.

**PALAVRAS-CHAVE:** Motor; torque; corrente; microcontrolador.

**ABSTRACT:** This research is directed to study of the behavior of motors direct current (DC), present in a manual or automatic screwing system. The system is provided with a microcontroller circuit capable of measuring the current of the motor through a current sensor connected to an analog input. With this data is possible to quantify the relation between current and torque, doing that the torque applied to a screw, can be controlled the torque limit parameters can be configured through a Human Machine Interface (HMI) in which the desired values can be inserted in order to be executed.

**KEYWORDS:** Motor; torque; current; microcontroller.

## 1. INTRODUÇÃO.

Entre todas as formas de se fixar peças e componentes a técnica aplicada com parafuso e porca ou uma junta com um furo roscado é atualmente a forma mais utilizada nas indústrias. As vantagens desse método são a simplicidade do projeto e da montagem a facilidade de desmontagem a produtividade e também o custo de projeto. De acordo com a empresa Atlas Copco [1]. Segundo Ugeda [2] um veículo de passeio possui em média 1500 parafusos que são críticos para a segurança das pessoas, onde a falha de um deles pode causar mau funcionamento do veículo até mesmo causar um acidente fatal. Controlar a força de aperto dos parafusos torna-se então um processo crucial para a segurança das pessoas tão como para a qualidade do produto. Este estudo vislumbra avaliar o método de controle de torque de parafusadeiras elétricas a partir da quantização e controle da relação corrente - torque.

## 2. ESTADO DA ARTE DE SISTEMAS DE PARAFUSAMENTO.

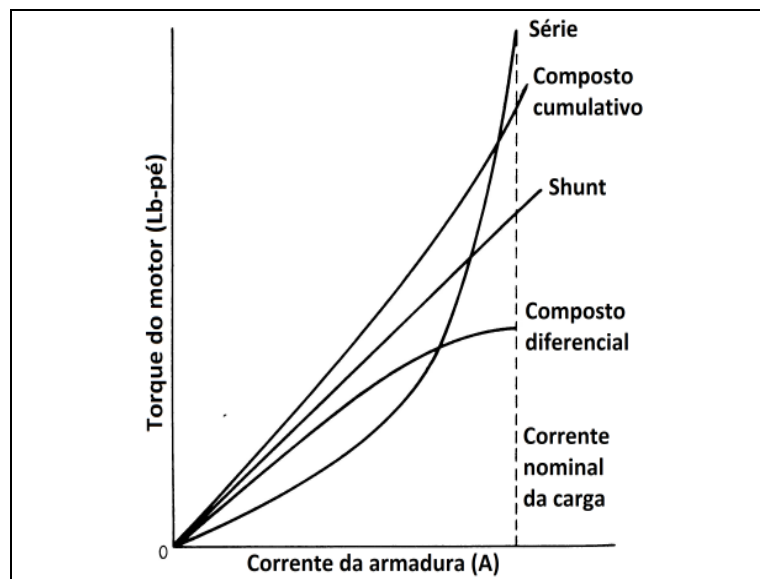
Nos dias atuais em oficinas e indústrias diversos tipos de equipamentos são utilizados para fixação dos parafusos, temos como exemplo chaves manuais, chaves de impacto pneumático, parafusadeiras elétricas e apertadeiras com painéis. Entre estas as apertadeiras com painéis são as mais precisas no quesito de aplicação do controle de torque, podendo esta ser calibrada através do painel do operador Pinto [3]. As apertadeiras funcionam a partir de um transdutor de torque acoplado no eixo do parafuso. Este dispositivo é capaz de sentir a torção do eixo e converter em sinal elétrico. Este processo possibilita uma grande precisão e fácil ajuste.

A indústria requer sistemas cada vez mais automatizados que não dependam da interferência de um operador, minimizando a ocorrência de erros de operação. Não há até hoje uma norma específica que descreva a precisão que a parafusadeira precisa ter para atender o processo, sendo assim as indústrias trabalham com precisões diferenciadas de acordo com a necessidade de cada processo. Por sua vez, algumas empresas acabam por utilizar a norma para calibração de instrumentos de medição de torque NBR 12240 como base para seus processos. Segundo a norma NBR 12240 [4] existem diferentes classes de transdutores de torque que são diferenciadas por sua precisão em relação ao erro de indicação de torque, sendo a classe "0,05" a mais precisa, com  $\pm 0,025\%$  de erro e a classe menos precisa, a classe "5" com  $\pm 2,5\%$  de erro de indicação. Este fato faz com que as chaves manuais sejam retiradas de forma gradativa dos processos que envolvem o controle de torque, visto que a habilidade do operador influencia muito na qualidade final. As chaves de impacto conseguem atingir valores de torque altos sem gerar grandes esforços ao operador, entretanto em aplicações de baixo torque não apresentam o desempenho adequado no que diz respeito à precisão. Seu funcionamento baseia-se em pulsos de força no eixo do parafuso, como um martelo realizando impactos em uma chave manual. Algumas chaves de impacto podem trabalhar em faixas de 350 Nm até 2200 Nm. O uso da chave de impacto, nas indústrias, fica restrito somente para processos de desafixação de parafusos que estão presos por ferrugem ou desgaste, já que não há como mensurar, com precisão inferior a 20%. Este tipo de equipamento também gera alto nível de ruído, podendo ultrapassar 100db. O controle de torque nas parafusadeiras elétricas é feito através de um sistema mecânico de embreagem. Um jogo de esferas que deslizam e impedem que o motor transfira força para o parafuso quando o torque é atingido. Não há nenhuma forma de saber, dinamicamente, qual é a força que a parafusadeira elétrica está aplicando no parafuso, visto que esta não possui nenhum painel de operador para tal leitura. Este fato faz com que as parafusadeiras elétricas sejam utilizadas somente para parafusos que não influenciam na segurança das pessoas ou qualidade do produto. Este tipo de equipamento pode custar até 10% do valor de uma apertadeira com painel. A aplicação do conceito deste estudo possibilitará o uso das parafusadeiras elétricas em produtos que requerem ferramentas com altos níveis de precisão, porém com o custo reduzido, o que aumentará a qualidade dos produtos das pequenas indústrias e também a segurança das pessoas.

## 3. TORQUE E CORRENTE ELÉTRICA EM MOTORES DC.

Um motor elétrico seja de corrente contínua ou alternada é constituído por uma parte móvel denominada armadura ou rotor, e uma parte estática denominada estator. O estator é posicionado em volta do rotor, porém sem ter atrito. Tanto a armadura quanto o estator são basicamente bobinas, podendo conter um enrolamento ou mais. Para alguns motores a bobina do estator é substituída por um ímã, esta característica não altera o funcionamento do motor. Kosow [5] afirma que quando uma corrente elétrica flui pelo fio condutor da bobina da armadura do motor gera um campo eletromagnético que possui polaridade. Da mesma forma quando uma corrente elétrica flui pela bobina do estator cria-se um segundo campo eletromagnético estático com a sua polaridade. A

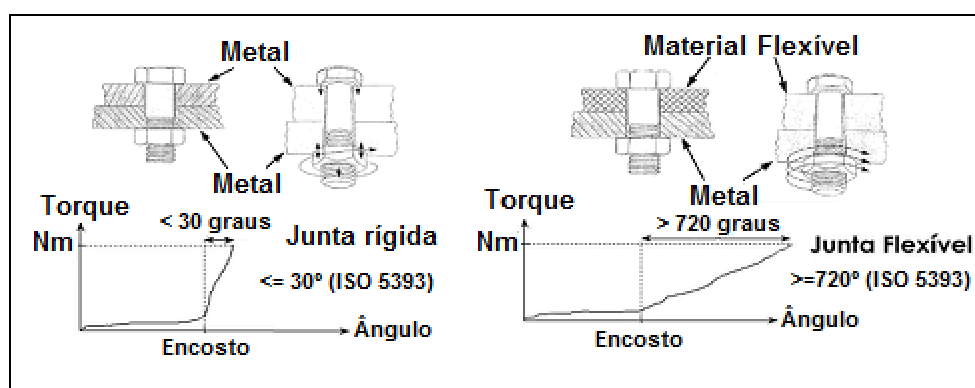
polaridade do campo da armadura interfere com a polaridade do campo do estator, esta interferência entre os dois campos eletromagnéticos gera uma nova força chamada de Torque eletromagnético desenvolvido. O Torque eletromagnético desenvolvido produz e mantém a rotação do eixo do motor. Quando o rotor é submetido a uma carga externa cria-se uma força que é contrária ao torque eletromagnético produzido pela bobina e este efeito causa a elevação da corrente de armadura. Tal efeito cria uma relação entre carga externa no rotor e corrente da armadura, como pode ser visto na Figura 1.



**Figura 1.** Relação entre torque e corrente dos motores de corrente contínua. [5]

#### 4. JUNTAS APARAFUSADAS.

Controlar o parafusamento não se resume em controlar a ferramenta de aplicação de torque. Todas as ferramentas existentes possuem rendimento e precisão que podem variar de acordo com a junta que o parafuso está sendo fixado. Isto indica que é necessário também entender qual é a junta em que se trabalha para poder medir valores de forma mais precisa. A norma ISO 5393 [6] descreve que uma junta pode se comportar de forma rígida ou de forma flexível, como é mostrado na Figura 2.



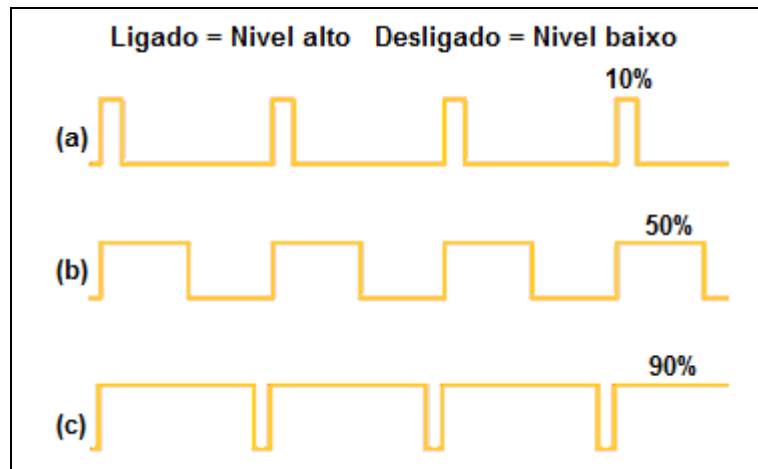
**Figura 2.** Junta rígida e junta flexível. [6]

De acordo com a norma ISO 5393 [6], uma junta é caracterizada como rígida quando o torque máximo é atingido em até 30° de giro a partir do momento em que a cabeça do parafuso encosta na junta. Já na junta flexível, este ângulo é alto, podendo atingir até 720° de giro a partir do encostamento da cabeça do parafuso na junta. Esta diferença de angulação se dá por conta do material usado na junta. Materiais mais moles se comprimem durante o aperto do parafuso exigindo maior ângulo para atingir o mesmo torque que aconteceria com um ângulo de giro muito menor em uma junta com materiais rígidos. O sistema de medição de torque para obter um menor erro e maior precisão deve atuar de forma diferente para tipos de juntas distintas devendo ser capaz de parar a atuação da parafusadeira no momento que o torque desejado é atingido dentro da tolerância do sistema. Ao usar um sistema que atua somente em junta flexível ou em uma junta rígida os resultados podem não ser satisfatórios. Normalmente nestes casos o sistema de medição não é rápido o suficiente para atuar, esta característica gera valores de torque que apresenta imprecisões.

## 5. METODOLOGIA.

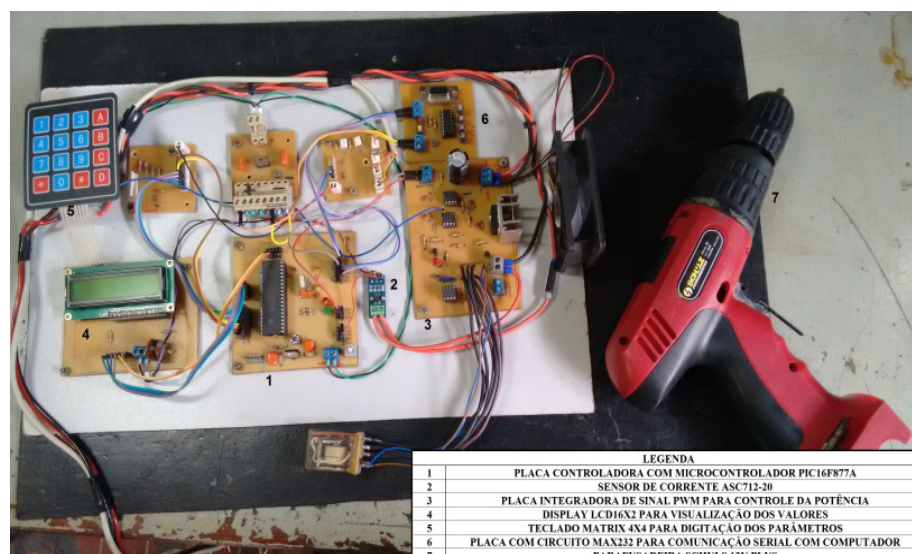
Visto a necessidade de um controle com menor índice de erro e precisão para ser usado na indústria, este estudo aplica uma proposta de controle de torque baseado na relação entre a corrente elétrica e o torque do motor definida por Kosow [5]. O mercado possui uma infinidade de possibilidades de controladores programáveis que são utilizados para realizar tarefas como leitura de sensores, ligar e desligar atuadores mecânicos como pistões ou até mesmo realizar a partida de motores elétricos além do controle de velocidade. Os microcontroladores da família PIC fazem parte destes controladores programáveis. Destacam-se por suas funções versatilidade e custo. Por se tratar de um circuito integrado, diversos tipos de circuitos e lógicas podem ser implementados facilmente. O microcontrolador PIC possui periféricos como leitura de sinal analógico, modulação por largura de pulso (PWM) e comunicação serial (UART) são funções necessárias para implementação do controle de corrente do motor. Além do microcontrolador PIC16F877A, também foi usado no projeto um sensor de corrente de modelo ASC712 e uma parafusadeira elétrica manual fabricante Schulz, modelo 12V Plus. O sistema elétrico original da parafusadeira utilizada é capaz de controlar a velocidade do motor através de um gatilho analógico, porém para ter total controle sobre a parafusadeira o sistema original foi substituído por um novo circuito eletrônico que permite variar a tensão de alimentação diretamente no motor da parafusadeira. A modulação por largura de pulso é uma maneira de codificar, digitalmente, níveis de sinal analógico, conforme Silveira [7]. Nesta técnica, através do uso de contadores de alta resolução, o ciclo de trabalho de uma onda quadrada é modulado para codificar um nível de sinal analógico específico. Em outras palavras, refere-se ao conceito de pulsar rapidamente um sinal digital em um condutor. O ciclo de trabalho é o tempo em que o sinal permanece em estado "ligado" dentro do período, e, variando o ciclo de trabalho pode se codificar um valor analógico. A Figura 3 mostra três PWMs com ciclos de trabalho diferentes, sendo (a)10%, (b)50% e (c)90%. Para melhor entendimento, se, por exemplo, aplicarmos um ciclo de trabalho de 50% a uma tensão de 12V, teremos um sinal analógico de 6V.



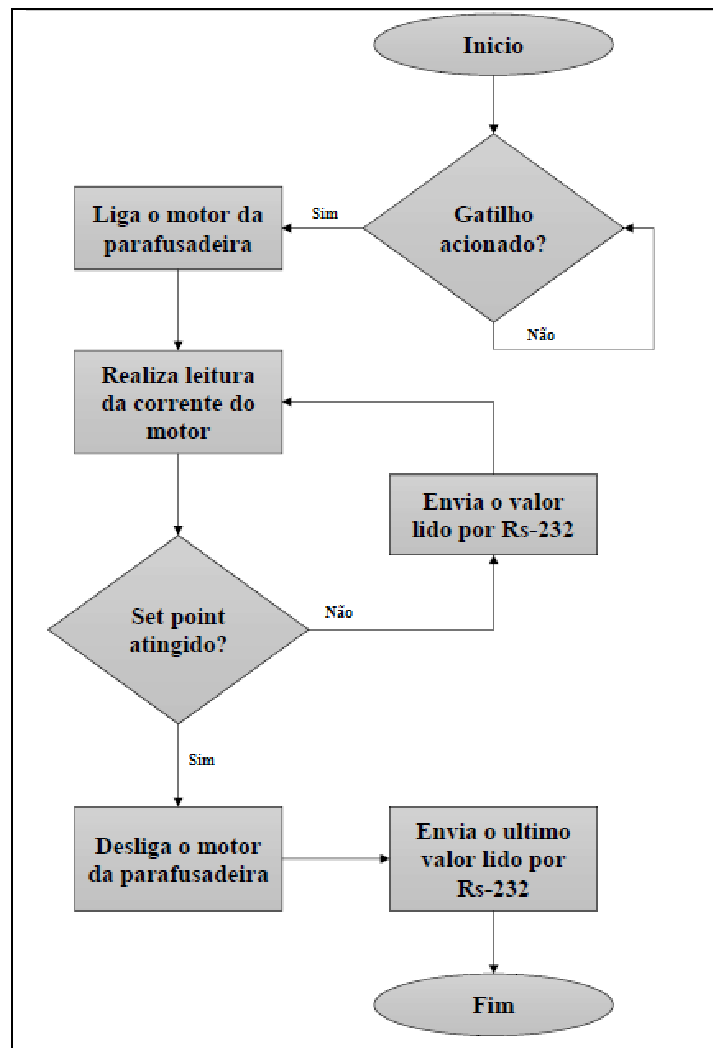


**Figura 3.** Modulação por largura de pulso (PWM). [7]

Aplicar, em um motor, um sinal analógico gerado por um periférico PWM e alterar o seu ciclo de trabalho possibilita alterar a velocidade e, por consequência, a força do motor. Entretanto, no sinal PWM, em alguns momentos do seu período, a tensão e corrente no motor chega a zero e este valor é lido pelo sensor de corrente o que prejudicaria o sistema de medição, que indicaria resultados incoerentes. Para corrigir este problema, um circuito integrador de sinal, baseado em amplificadores operacionais (OPAMP), foi implementado. Um circuito integrador é capaz de calcular a tensão gerada pela frequência do sinal PWM e converte-la em um sinal de tensão contínua. A junção de um circuito capaz de gerar um sinal PWM com um circuito integrador de sinal foi utilizado no projeto para controlar a tensão no motor da parafusadeira elétrica, com degraus de 11,7mV de ajuste na tensão do motor. Com hardware desenvolvido, foi implementado o algoritmo para controlar todo o sistema. O microcontrolador, com o algoritmo programado, verifica se o gatilho da parafusadeira foi apertado e liga o motor. Na frequência de 1300hz realiza medições da corrente do motor e envia os valores pela comunicação RS-232. Uma vez atingida a corrente solicitada, o algoritmo desliga a tensão no motor e aguarda um novo ciclo. Os valores enviados podem ser recebidos por um computador e com isso foi possível gerar gráficos para visualizar como se comporta a corrente do motor. A Figura 4 mostra a arquitetura de hardware do projeto e a Figura 5 demonstra fluxograma do algoritmo durante o aperto do parafuso.



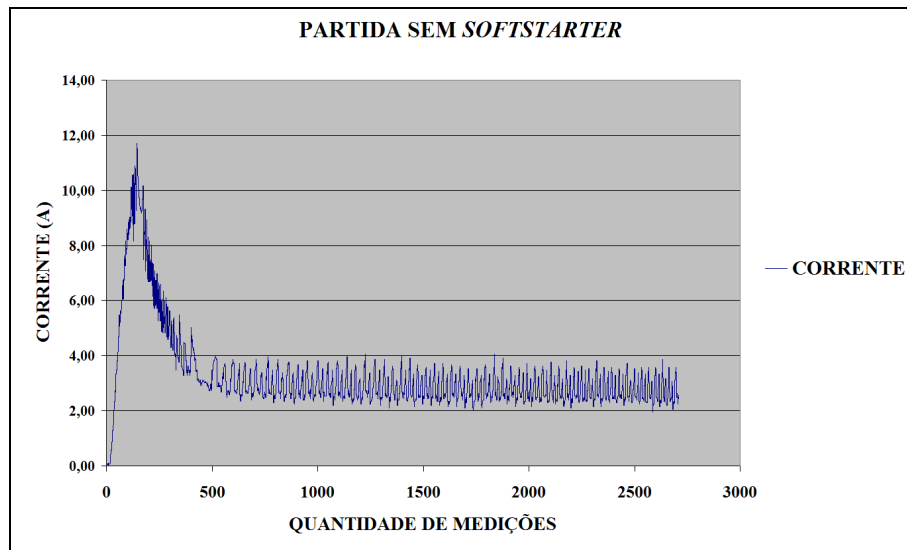
**Figura 4.** Arquitetura de hardware do projeto (Elaborado pelo autor, 2017).



**Figura 5.** Fluxograma do algoritmo (Elaborado pelo autor, 2017).

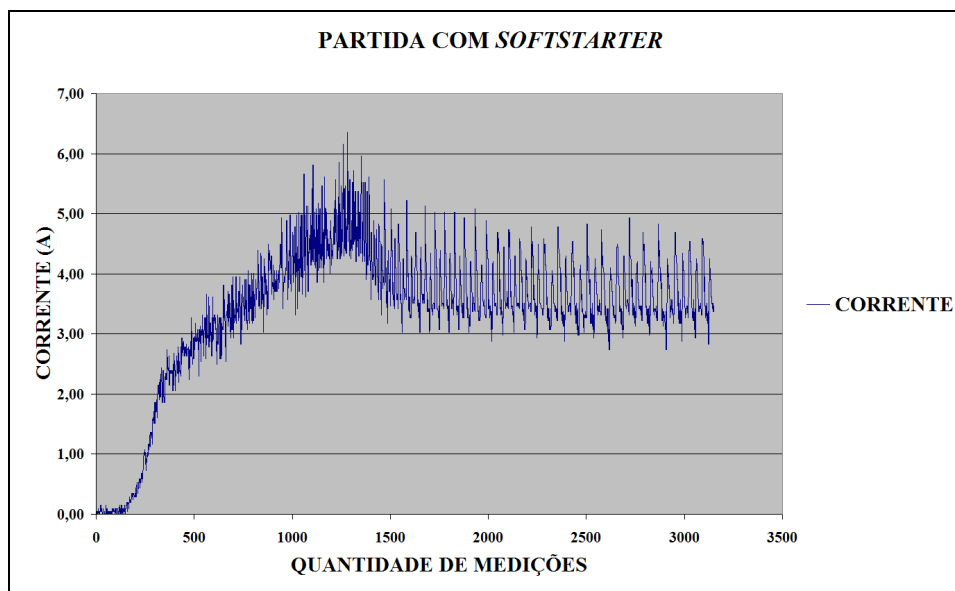
## 6. RESULTADOS.

A análise dos resultados foi obtida através de gráficos comportamentais da corrente do motor em algumas situações controladas. Os gráficos foram obtidos a partir dos valores de corrente amostrados e enviados pelo microcontrolador no momento do uso da parafusadeira. A Figura 6 demonstra a curva de corrente de partida do motor.



**Figura 6.** Curva de corrente de partida do motor (Elaborado pelo autor, 2017).

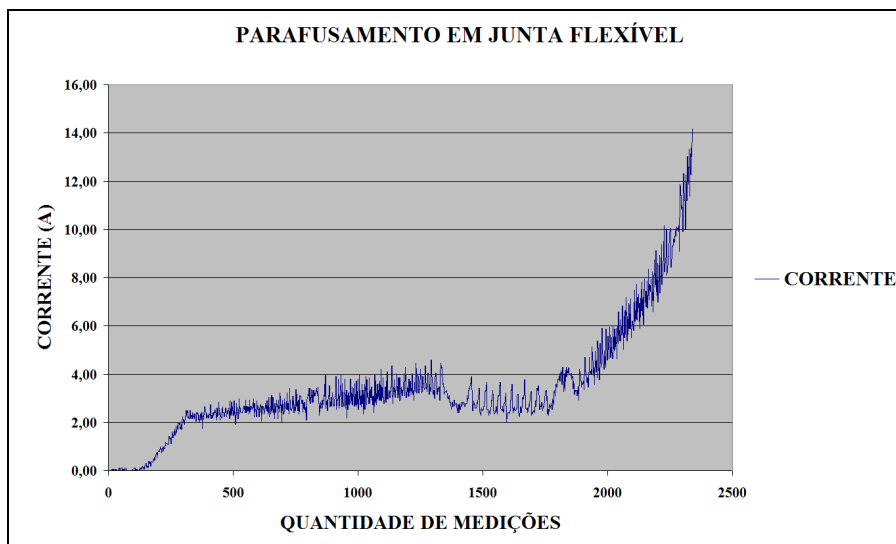
Como pode ser observado, a corrente do motor varia de uma forma ordenada. No momento da partida do motor a corrente sofre um pico de curta duração (ciclo de magnetização inicial) a posteriori do pico a corrente estabiliza no valor de corrente nominal do motor. Este pico acontece devido a um momento de saturação da bobina do motor que também é descrito por Kosow [4]. O pico de corrente pode ser atenuado com um algoritmo “*Softstarter*” (partida suave) fazendo o motor ligar em ciclos de forma gradativa. A Figura 7 demonstra o comportamento da corrente de partida do motor aplicando-se o algoritmo “*Softstarter*”.



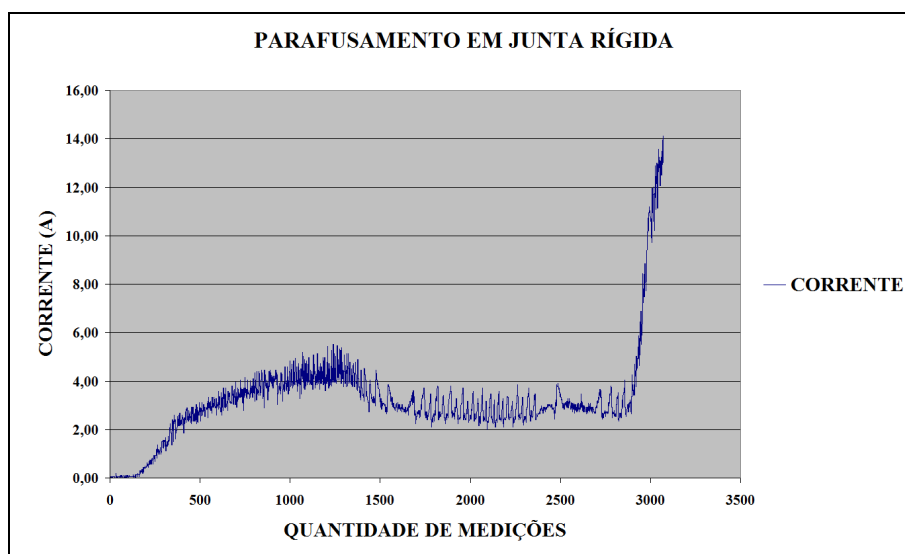
**Figura 7.** Pico de Corrente atenuada pelo “*Softstarter*” (Elaborado pelo autor, 2017).

É observado que o pico de corrente não ocorre, porém, o tempo de saturação do motor é maior e a tensão nominal do motor sobe e oscila em uma amplitude superior. Sabendo como o motor se comporta foi verificado como a corrente se comporta quando um parafuso é apertado. A Figura 8 e

a Figura 9 mostram como se comporta a corrente quando a parafusadeira aperta um parafuso em uma junta flexível e uma junta rígida. Para tal aperto, o algoritmo solicita um valor de corrente como “Setpoint”, valor que quando atingido fará a parafusadeira parar de aplicar torque ao sistema.



**Figura 8.** Aperto de parafuso em junta flexível (Elaborado pelo autor, 2017).



**Figura 9.** Aperto de parafuso em junta rígida (Elaborado pelo autor, 2017).

Os gráficos capturados demonstram que a corrente do motor se comporta de forma diferente entre uma junta rígida e uma flexível. A atenuação da corrente do motor se dá de forma quase instantânea na junta rígida e na junta flexível, ela se comporta em formato de rampa com inclinação menor. Observa-se pelos gráficos também, que o “Setpoint” solicitado, no caso de 14 Amperes foi atingido com certa diferença. É necessário, então, fazer vários apertos em parafusos em condições e “Setpoints” diferentes e verificar qual é a precisão do sistema e qual a porcentagem de erro em média. O critério para escolha dos “Setpoints” a fim de realizar os testes foi baseado nas características elétricas da parafusadeira escolhida, sendo o maior deles meio ampere a menos que a



corrente máxima do motor e o menor deles um apere e meio a mais que a corrente nominal. Esta faixa de corrente foi dividida, então, em 10 partes iguais. O erro é a diferença entre o valor solicitado com o valor obtido. No teste realizado foram contemplados 20 apertos em parafusos sendo 10 deles em junta rígida e 10 em junta flexível. Os valores obtidos foram capturados e comparados com o "Setpoint" e então é possível calcular uma média de erros em relação ao "Setpoint" e o valor obtido. A Tabela 1 apresenta os erros médios calculados.

**Tabela 1.** Média de erros (Elaborado pelo autor, 2017).

ITEM	SET POINT (A)	VALOR MÉDIO ATINGIDO (A)	ERRO MÁXIMO (A)	ERRO MÁXIMO (%)	ERRO MÉDIO (A)	ERRO MÉDIO (%)
1	16,504	16,594	0,293	0,710	0,090	0,220
2	15,283	15,505	0,537	1,330	0,222	0,550
3	14,063	14,158	0,488	1,250	0,095	0,240
4	12,842	12,961	0,781	2,060	0,120	0,320
5	11,621	11,838	0,537	1,470	0,217	0,590
6	10,400	10,715	0,830	2,340	0,315	0,890
7	9,180	9,429	0,586	1,710	0,249	0,730
8	7,959	8,110	0,635	1,930	0,151	0,460
9	6,738	6,960	0,635	2,000	0,222	0,700
10	5,518	5,701	1,123	3,680	0,183	0,600
MÉDIA FINAL DE ERROS ENTRE OS PONTOS					0,1865 (A)	0,530 (%)

## 7. CONCLUSÃO.

Através das informações obtidas pode-se concluir que o sistema se mostrou eficiente, com média de erro de indicação inferior a 1%, ao parar o motor da parafusadeira quando a corrente solicitada é atingida, em toda faixa de corrente do moto. O estudo nos proporcionou o entendimento de como se comporta a corrente de um motor de corrente contínua, quando este é usado em sistemas de parafusamento e também contribuiu para mostrar que os microcontroladores da família PIC podem ser facilmente utilizados em processos industriais, reduzindo os custos de automação com sua versatilidade. Os testes realizados no estudo foram feitos com base em uma parafusadeira de pequeno porte, porém, o sistema pode ser aplicado da mesma forma em parafusadeiras de grande porte com motores e cabeçotes potentes, podendo ser utilizado também em processos diferentes do apresentado, para monitorar o esforço de uma grande gama de motores DC respeitando os limites de tensão e corrente. O sistema pode ser aplicado em qualquer parafusadeira com motor DC de 12V e corrente elétrica inferior a 20 Amperes, sem ser necessário nenhuma alteração. Para tensões e correntes maiores, faz-se necessário a troca da fonte de alimentação e sensor de corrente.

## 8. REFERÊNCIAS.

[1] COPCO, A. Tecnologia de Aperto – Guia de Bolso. *Tecnologia de Aperto – Guia de Bolso*, São Paulo, p.1-25, 01 jan. 2017. Disponível em: <<http://www.valona.com.br/downloads/Tecnologiadeaperto.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2017.



- [2] PARAFUSO, Revista do. REVISTA DO PARAFUSO. *Revista do Parafuso*, São Paulo, p.1-25, 16 mar. 2017. Disponível em: <<http://www.valona.com.br/downloads/Tecnologiadeperto.pdf>>. Acesso em: 16 ago. 2017.
- [3] PINTO, E. *Sistema Inteligente Para Especificação do Aperto Ideal em Operações de Parafusamento*. 2005. 86 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, Taubaté, 2005.
- [4] ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS NBR 12240. *NBR 12240: Materiais metálicos - Calibração de dispositivos para medição de torque estático*. Rio de Janeiro, p. 12. 2013.
- [5] KOSOW, L. I. *Máquinas Elétricas e Transformadores*. New York: Globo, 1982. 326 p.
- [6] INTERNATIONAL STANDARD ISO 5393. *ISO 5393: International Standard ISO 5393*. 2 ed. New York: Iso, 1994. 10 p.
- [7] CITISYSTEMS (São Paulo). *O que é PWM e Para que Serve?* 2016. Disponível em: <<https://www.citisystems.com.br/pwm/>>. Acesso em: 16 ago. 2017.