



Estudo da Utilização de Aparafusadoras no Setor Industrial Automóvel

RUI MIGUEL SANTOS MOURA

novembro de 2020

Estudo da Utilização de Aparafusadoras no Setor Industrial Automóvel

Rui Miguel Santos Moura



Departamento de Engenharia Eletrotécnica
Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019-2020

Relatório elaborado para satisfação parcial dos requisitos da Unidade Curricular
de DSEE – Dissertação do Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas
Elétricos de Energia

Candidato: Rui Miguel Santos Moura, N° 1151378, 1151378@isep.ipp.pt

Orientação científica: Teresa Alexandra Nogueira, tan@isep.ipp.pt

Empresa: Equinotec – Soluções de Engenharia, Lda

Supervisão: Celso Cavadas, celso.cavadas@equinotec.com



Departamento de Engenharia Eletrotécnica

Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Sistemas Elétricos de Energia

2019 - 2020

Dedico este trabalho ao meu herói, o meu pai.

Agradecimentos

Quero começar por agradecer à Eng. Teresa Nogueira por ter aceite ser a minha orientadora científica, pela sua disponibilidade e apoio dado na realização deste trabalho.

À Equinotec – Soluções de Engenharia, Lda, empresa que me proporcionou a oportunidade de realizar esta dissertação de mestrado com um especial obrigado ao Eng. Celso Cavadas por todo o conhecimento e experiência que me transmitiu ao longo deste tempo, desempenhando um papel fundamental na minha evolução, tanto a nível pessoal como profissional.

À minha família, em especial à minha mãe e à Adriana por toda a atenção e apoio prestado durante a realização deste projeto, mas também durante todo o percurso académico.

Quero também agradecer ao Engenheiro Artur Bastos por todos os conselhos dados e por toda a ajuda dada durante a minha vida académica.

Por último, a todos os meus colegas e professores que de uma forma ou de outra fizeram parte da minha vida académica enquanto estudante do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Resumo

O aparafusamento industrial assume atualmente um papel preponderante na indústria. As aparafusadoras elétricas industriais são muito usadas devido à sua grande versatilidade, precisão e segurança. Levando em conta as características mencionadas, estas ferramentas estão extremamente bem adequadas para a realização de trabalhos na indústria automóvel.

As máquinas industriais elétricas permitem ao utilizador fazer um controlo de todos os parâmetros do aperto realizado, permitindo demonstrar a complexidade e versatilidade associada às mesmas, possibilitando a criação de diferentes tipos de soluções com o mesmo produto.

Neste enquadramento, foi utilizada uma aparafusadora elétrica sem fios comandada de forma remota por computador, simulando um PLC que faria o controlo da máquina automaticamente. O controlo foi realizado através da criação de um socket TCP/IP, que permitia ao utilizador enviar palavras de bytes para a máquina através de uma aplicação informática.

A aplicação informática criada permite ao utilizador realizar diversos comandos da aparafusadora, entre os quais, seleccionar programas, aparafusar ou analisar dados.

Atualmente, a indústria pretende realizar um controlo contínuo e minucioso das máquinas utilizadas através da verificação periódica, reduzindo assim possíveis descalibrações da aparafusadora. Por outro lado, pretende também ter um controlo exigente e completo, a fim de reduzir a fabricação de produtos não conformes. Posto isto, o envio e receção de dados torna-se fundamental porque possibilita ao utilizador verificar os dados do aparafusamento realizado. Tendo em conta este aspeto fundamental, a aparafusadora envia para o computador um ficheiro com todas as informações do aparafusamento através de um servidor FTP. Posteriormente, estas informações são enviadas para uma base de dados permitindo ao utilizador futuramente procurar a informação que necessita.

Palavras Chave: Aparafusamento Elétrico, Binário, Ângulo, Base de Dados, transdutor, Indústria 4.0

Abstract

Industrial screwing currently plays a major role in the industry. Industrial electric screwdrivers are widely used due to their great versatility, accuracy and safety. Taking into account the mentioned characteristics, the tools are extremely well suited for carrying out work in the automotive industry.

The electric screwdrivers allow the user to control all the parameters of the tightening performed allowing to demonstrate the complexity and versatility associated with electric industrial machines, enabling the creation of different types of solutions with the same product.

In this framework, was used a cordless electric screwdriver remotely controlled by a computer simulating a PLC that would control the machine automatically. The control was carried out through the creation of a TCP/IP socket that allowed the user to send byte words to the machine through a computer application.

The computer application created allows the user to carry out various commands of the screwdriver, among which, the selection of programs, screwing or analyzing data.

Currently, the industry intends to carry out a continuous and detailed control of the machines used through periodic verification thereby reducing possible screwdrivers decalibrations. On the other hand, it also pretends to have control demanding and complete in order to reduce the manufacture of non-compliant products. Post this, sending and receiving data is essential because it allows the user to check the data of the screwing performed. In view of this fundamental aspect, the screwdriver sends a file to the computer with all the information of bolting via an FTP server. Subsequently, this information is sent to a database allowing the user to look for the information he needs in the future.

Keywords: Electrical Screwing, Torque, Angle, Database, transducer, Industry 4.0

Índice

Agradecimentos.....	i
Resumo.....	iii
Abstract.....	v
Índice.....	vii
Índice de Figuras.....	xi
Índice de Tabelas.....	xv
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da Tese.....	2
2. Caracterização dos Processos de Aparafusamento.....	5
2.1 Fatores Determinantes do Aparafusamento.....	5
2.2 Fatores Influentes na Força de Pré-Carga.....	11
2.2.1 Atrito.....	11
2.2.2 Assentamento.....	16
2.2.3 Métodos de Montagem Pouco Adequados.....	18
2.2.4 Temperatura.....	18
2.3 Fator de Aparafusamento.....	19
2.4 Força a Aplicar sobre o Parafuso.....	20
2.5 Carga na rosca da porca.....	22
2.6 Métodos de Medição.....	22
2.6.1 Medição para a força de aperto.....	22
2.6.2 Medição do comprimento do parafuso.....	23
2.6.3 Medição por binário.....	24
2.7 Métodos de Aparafusamento.....	25

2.7.1	Aperto controlado por binário	26
2.7.2	Aperto controlado por ângulo.....	30
2.7.3	Aperto controlado por tensão de cedência.....	32
2.7.4	Apertos Especiais	34
2.7.5	Exemplos de Aplicação	35
2.7.6	Possíveis causas de erros durante o processo de aparafusamento	39
2.8	Aparafusamento Elétrico Industrial	42
2.8.1	Aparafusamento Manual.....	42
2.8.1.1	Livres	42
2.8.1.2	Guiadas Manualmente	43
2.8.2	Aparafusamento Automático	44
2.8.2.1	Semi-Automáticas.....	44
2.8.2.2	Automática.....	45
2.8.3	Caraterísticas Principais das Aparafusadoras	46
2.8.3.1	Ponteiras.....	47
2.8.3.2	Motor	50
2.8.3.3	Redutor.....	51
2.8.3.4	Transdutor.....	51
2.8.3.5	Controlador	52
2.9	Caraterísticas da aparafusadora NEXO	53
2.9.1	Bateria.....	53
2.9.2	Acessórios.....	56
2.9.3	WLAN	57
2.9.4	Controlo e memória de resultados	58
2.9.5	Controlador.....	60
2.9.6	Sistema operacional NEXO-OS	62
2.10	Certificação nos sistemas de aparafusamento	64

2.10.1	Qualidade.....	64
2.10.2	Calibração.....	65
2.10.2.1	Laboratórios de medição e calibração.....	66
2.10.2.1.1	Laboratórios credenciados.....	68
2.10.2.1.2	Laboratórios não credenciados.....	68
2.10.2.2	Tipos de calibração.....	68
2.10.2.2.1	Calibração de equipamentos.....	68
2.10.2.2.2	Calibração da máquina para o processo	71
2.10.3	Segurança.....	77
2.10.3.1	Lei da responsabilidade do produto	78
3.	Caso de estudo aparafusamento NEXO	81
3.1	Desenvolvimento de aplicação de apoio.....	81
3.2	Protocolos de comunicação.....	81
3.2.1	Open Protocol.....	82
3.2.2	File transfer protocol	87
3.3	Funcionalidades da aplicação	89
3.4	Dados e resultados	100
3.5	Interpretação de resultados	105
4.	Conclusões	109
4.1	Análise Conclusiva	109
4.2	Trabalhos futuros	110
	Referências	113

Índice de Figuras

Figura 1 - Força de Compressão e Força de Tração (Bolt Science, 2018).....	6
Figura 2 - Compressão e Alongamento Elástico (Bolt Science, 2018)	6
Figura 3 - Diagrama da força externa exercida (Bolt Science, 2018)	7
Figura 5 - Diagrama com o afastamento das contra-peças (Bolt Science, 2018).....	8
Figura 4 - Diagrama do Ponto de Tensão de Cedência (Bolt Science, 2018)	8
Figura 6 - Diagrama de forças e deformações (Bosch Rexroth, 2013)	9
Figura 7 - Processo de Aparafusamento (Bosch Rexroth, 2018b)	9
Figura 8 - Distribuição do Binário Aplicado (Fernandes, 2018).....	11
Figura 9 - Variação de binário e força de pré-carga associada ao atrito (Bosch Rexroth, 2018b).....	14
Figura 10 - Precisão da força de pré-carga (Bosch Rexroth, 2018b)	15
Figura 11 - Relação entre a força de aperto e distorção do parafuso e das peças conectadas (Bosch Rexroth, 2013).....	16
Figura 12 - Atrito e Assentamentos (Bosch Rexroth, 2018b)	17
Figura 13 - Falha de uma junta (Enerpac, n.d.).....	18
Figura 14 - Parafusos com diferentes classes de resistência (Bosch Rexroth, 2018).....	20
Figura 15 - Significado da classe de resistência (Classes de Resistência de Parafusos, 2017).....	21
Figura 16 - Tamanhos físicos de um parafuso sextavado com rosca parcial (Chagas, 2020).....	21
Figura 17 - Carga submetida a cada rosca (Bosch Rexroth, 2018b)	22
Figura 18 - Anilha com extensômetro (Bosch Rexroth, 2018b).....	23
Figura 19 - Medição com piezo-electrical sensor (Bosch Rexroth, 2018b)	24
Figura 20 - Medição por binário (Bosch Rexroth, 2018b)	24
Figura 21 - Métodos de Aparafusamento (Bosch Rexroth, 2018b).....	26
Figura 22 - Método de controlo de binário com supervisão de ângulo (Bosch Rexroth España, 2016)	27
Figura 23 - Tipos de juntas de aperto rígidas e flexíveis de acordo com a ISO 5393 (SV Enterprises, n.d.).....	29
Figura 24 - Método de aparafusamento controlo por ângulo (Bosch Rexroth España, 2016).....	31

Figura 25 - Diagrama Elasticidade (Deprag, n.d.).....	32
Figura 26 - Método pela tensão de cedência (SV Enterprises, n.d.).....	33
Figura 27 - Aparafusamento por etapas (Bosch Rexroth, 2018b).....	34
Figura 28 - Etapas de aparafusamento de um parafuso autorroscante (Bosch Rexroth Espanña, 2016)	36
Figura 29 - Aparafusamento com controlo de profundidade (Bosch Rexroth Espanña, 2016).....	37
Figura 30 - Reconhecimento de defeitos na rosca (Bosch Rexroth Espanña, 2016).....	37
Figura 31 - Aparafusamento de porcas (Bosch Rexroth Espanña, 2016).....	38
Figura 32 - Aparafusamento com diminuição de assentamentos (Bosch Rexroth Espanña, 2016).....	39
Figura 33 - Possíveis erros relacionados com o Aparafusamento (Bosch Rexroth Espanña, 2016)	40
Figura 34 - Fenómeno Stick-Slip (Fernandes, 2018)	41
Figura 35 - Stick-Slip (Bosch Rexroth Espanña, 2016)	41
Figura 36 - Tipos de aparafusadoras (Gaspar, 2017).....	42
Figura 37 - Aparafusadora ErgoSpin à esquerda e Nexo à direita (Bosch Rexroth, 2018a).....	43
Figura 38 - Aparafusadora guiada manualmente (Bosch Rexroth, 2018a)	44
Figura 39 – Aparafusadora semi-automática (Bosch Rexroth, 2018a)	45
Figura 40 - Aparafusamento Automático (Bosch Rexroth, 2018a).....	45
Figura 41 - Diferentes montagens associadas a uma mesma aparafusadora (Bosch Rexroth, 2018a)	46
Figura 42 - Ponteira Reta (Bosch Rexroth, 2018a)	47
Figura 43 - Ponteira Suplementar Estreita (Bosch Rexroth, 2018a)	48
Figura 44 - Ponteira estreita com transdutor (Bosch Rexroth, 2018a).....	48
Figura 45 - Ponteira Angular (Bosch Rexroth, 2018a).....	49
Figura 46 - Ponteira com Alimentação (Bosch Rexroth, 2018a)	49
Figura 47 - Motor DC Brushless (Bosch Rexroth, 2018a).....	50
Figura 48 - Engrenagem Planetária e Adaptador Transmissão (Bosch Rexroth, 2018a).....	51
Figura 49 – Transdutor (Bosch Rexroth, 2018a).....	52
Figura 50 - Sistema compacto (Bosch Rexroth, 2018a).....	52
Figura 51 - Sistema Modular (Bosch Rexroth, 2018a).....	53
Figura 52 – Bateria da aparafusadora NEXO (Bosch Rexroth, 2017)	54

Figura 53 - Bateria de íões de lítio (Bosch Rexroth, 2017).....	54
Figura 54 - Carregador (Bosch Rexroth, 2017).....	55
Figura 55 - Processo de Carregamento da Bateria de Íões de Lítio (Marcelino, 2013) .	56
Figura 56 - Acessórios para Bosch Rexroth Nexo (Bosch Rexroth España, 2019)	56
Figura 57 - Modo Adhoc vs Modo Infraestrutura (Shah, n.d.).....	57
Figura 58 - Transferência de Resultados sem WLAN (Bosch Rexroth, 2017)	59
Figura 59 - Transferência de Resultados WLAN (Bosch Rexroth, 2017)	60
Figura 60 - Bosch Rexroth Nexo à esquerda (Bosch Rexroth, 2018a) e Atlas Copco STB à direita (Atlas Copco, n.d.-b)	62
Figura 61 - Menu NEXO-OS.....	63
Figura 62 - Hierarquia da calibração (Atlas Copco, 2015).....	67
Figura 63 - Medição de ângulo (Atlas Copco, 2015)	69
Figura 64 - Rótulo de Calibração Credenciada (Atlas Copco, 2015).....	70
Figura 65 - Linha de produção (SCS Concept Group, n.d.)	71
Figura 66 - Influência do Cm e do Cmk na amostra (Nielsen, n.d.)	74
Figura 67 - Exemplos da influência dos índices Cmk e Cm (Atlas Copco, 2015).....	74
Figura 68 - Índices Limite (Bosch Rexroth, 2013).....	75
Figura 69 - Exemplo de troca de dados entre aparafusadora e computador supraordenado (Assay, 2018)	83
Figura 70 - Pacote de dados (Assay, 2018)	83
Figura 71 - Exemplo de pacote MID 0018	84
Figura 72 - Web Browser da máquina.....	88
Figura 73 - Envio de dados por File Transfer Protocol através do "Filezilla"	89
Figura 74 – Login da aplicação	90
Figura 75 – Conexão TCP/IP.....	90
Figura 76 - Socket TCP/IP e conexão com aparafusadora	91
Figura 77 - Menu Principal da aplicação.....	92
Figura 78 - Seleção de programa da aplicação	93
Figura 79 – Habilitação da máquina para realizar aperto.....	94
Figura 80 - Informação sobre programa de aperto	96
Figura 81 – Palavra de sinal a enviar através de MID 0504.....	98
Figura 82 – Janela de texto para MID 0111	99
Figura 83 - Código do envio da mensagem de texto	99
Figura 84 - Diretório de recepção de dados.....	100

Figura 85 - Dados apresentados no ficheiro *.json	101
Figura 86 - Programa "Xampp"	102
Figura 87 - Código de criação de uma tabela na base de dados	103
Figura 88 - Tabela geral do MySQL	104
Figura 89 - Código para criar uma foreign key	104
Figura 90 – Código de introdução das informações na base de dados através da aplicação	105
Figura 91 - Comando para leitura da base de dados.....	105
Figura 92 – Gráfico Ângulo/Tempo	106
Figura 93 – Gráfico Binário/Tempo	106
Figura 94 - Gráfico Binário/Ângulo	107

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Medições realizadas para binário (Bosch Rexroth, 2014b)	76
Tabela 2 – Medições realizadas para ângulo (Bosch Rexroth, 2014b)	77
Tabela 3 - Categorias de aperto (VDI 2862, 2012)	78
Tabela 4 – Pacotes disponíveis na aparafusadora NEXO (Bosch Rexroth, 2017)	85
Tabela 5 - Palavra do MID 0504	98

1.Introdução

1.1 Enquadramento

Atualmente, a indústria automotiva está cada vez mais competitiva e exigente em relação aos produtos e serviços produzidos. A indústria está cada vez mais automatizada realizando processos de fabricação mais eficazes, eficientes e produtivos reduzindo assim, a presença humana. Tendo em conta a grande oferta existente por parte da concorrência e o aumento de clientes, as empresas foram obrigadas a reformularem o seu processo produtivo e a aumentarem a importância associada a custos, qualidade e cumprimento de prazos (Lima, 2019).

Por outro lado, as empresas atualmente também têm em conta todas as questões que estão relacionadas com a segurança das suas máquinas e operadores, pelo que procuram de forma persistente o aumento da fiabilidade de todas as máquinas e componentes associados a estas, de forma a evitar acidentes e paragens para manutenção, que posteriormente prejudiquem a operação produtiva. Portanto, o aparecimento da indústria 4.0 vai permitir a introdução de conceitos como a interoperabilidade, virtualização, operação em tempo real, descentralização, orientação a serviços e modulação (Santos, 2018).

Considerando a evolução provocada pela indústria 4.0, os fabricantes de máquinas e equipamentos e os integradores levaram em consideração o avanço tecnológico, começando a produzir produtos que integrassem a nova tecnologia industrial, havendo o surgimento de novas técnicas em sistemas de aparafusamento elétrico, que controlam o binário e o ângulo de forma extremamente minuciosa. Graças ao controlo rigoroso e de elevada segurança, estas aparafusadoras podem ser usadas no aperto de componentes de elevada importância, como o chassis ou travões de um veículo, que são componentes com garantia vitalícia devido à sua elevada importância na segurança do utilizador do veículo (Atlas Copco, 2015).

Tendo em conta a exigência deste tipo de apertos, é necessário que os dispositivos de aperto utilizados sejam capazes de identificar os parafusos a usar, o tipo de aperto a realizar, o operador e outros fatores que possam vir a ser decisivos no aperto de um

componente causado pela má utilização dos sistemas de aparafusamento, obrigando as aparafusadoras a serem capazes de enviar dados para serem armazenados numa base de dados de forma a que posteriormente seja possível consulta-los . Quando se fala em aparafusamento, normalmente existe a ideia que um simples furo, um parafuso e um método de aparafusar são suficientes para haver apertos com sucesso, contudo, em ambiente industrial, existem imensas variáveis que devem ser consideradas para que o aperto seja bem-sucedido ou não. Para isso, é necessário fazer um estudo aprofundado sobre as aparafusadoras e todos os acessórios usados, bem como o funcionamento do processo de aparafusamento.

1.2 Objetivos

Este projeto curricular foi desenvolvido numa empresa que fornece produtos a fabricantes e integradores de máquinas em ambiente industrial, o que permitiu obter uma experiência muito enriquecedora que desempenhou um papel fundamental na obtenção de maior sensibilidade e conhecimento acerca dos produtos utilizados e o seu funcionamento nas máquinas industriais produzidas pelos fabricantes. Este estudo tem como objetivo analisar as principais marcas de aparafusadoras de alta qualidade do mercado, assim como quais são as suas vantagens e desvantagens.

Neste trabalho é realizado um estudo acerca do tipo de aparafusamento e como ele deve ser efetuado, de forma a que os apertos em ambiente industrial sejam executados da forma mais correta possível.

Foi criado um programa através de *Visual Studio*, que permite utilizar a aparafusadora remotamente através de um computador que simulará um PLC.

Por último, todos os dados que forem retirados dos aparafusamentos realizados, serão colocados numa base de dados de forma a serem todos visualizados, dando assim o apoio necessário para a realização de uma análise mais detalhada sobre todo o aperto.

1.3 Estrutura da Tese

No primeiro capítulo, são apresentados os objetivos principais desta dissertação, além das motivações para o seu desenvolvimento. Neste capítulo, é também apresentada uma estrutura geral do trabalho desenvolvido.

O segundo capítulo é referente ao estado de arte, onde é realizado um estudo aprofundado sobre as componentes de aparafusamento, constituição geral de máquinas de aparafusamento, qualidade, segurança e calibração das ferramentas.

O terceiro capítulo fala sobre o desenvolvimento de um programa em *Visual Studio*, que permite controlar a aparafusadora de forma remota, sendo supervisionada por um computador, simulando assim, a utilização de um PLC em ambiente industrial. Os dados obtidos do aparafusamento são posteriormente armazenados numa base de dados *MySQL*, permitindo adquirir informações, de modo a melhorar todo o procedimento e aumentando a produtividade do sistema de aparafusamento.

Para concluir, no quarto capítulo são geradas todas as conclusões, limitações inerentes ao projeto e possíveis melhoramentos a executar.

2.Caraterização dos Processos de Aparafusamento

Em ambiente industrial, os sistemas de aparafusamento são considerados um dos processos mais exigentes das linhas de montagem devido ao seu elevado número de produções defeituosas (Rodrigues, 2015). Posto isto, é necessário estudar todos os tipos de controlo relacionado com os apertos, de forma a perceber e controlar um aperto da melhor forma possível.

2.1 Fatores Determinantes do Aparafusamento

O aparafusamento tem como principal objetivo criar a força de aperto necessária para unir dois componentes, originando uma conexão segura e fidedigna. Esta força de aperto é obtida através do binário colocado no parafuso, aplicado no corpo a uma certa distância do seu eixo de rotação, dando origem a um momento de força (Gaspar, 2017).

O momento de força aplicado permite a ligação das duas superfícies como corpos rígidos, como já foi dito anteriormente, permitindo assim a deformação do parafuso proporcionando uma tensão que corresponde à força de pré-carga (Gaspar, 2017).

De forma a se conseguir avaliar as forças intervenientes numa conexão aparafusada, foram desenvolvidos vários diagramas que permitem avaliar todo o processo de aperto desde o início. Os diagramas de juntas são usualmente utilizados quando pretendemos entender que o parafuso não sustenta toda a força utilizada, além de todas as forças externas a que o processo é submetido (Bolt Science, 2018). A seguir, encontra-se demonstrado o primeiro diagrama através da figura 1.

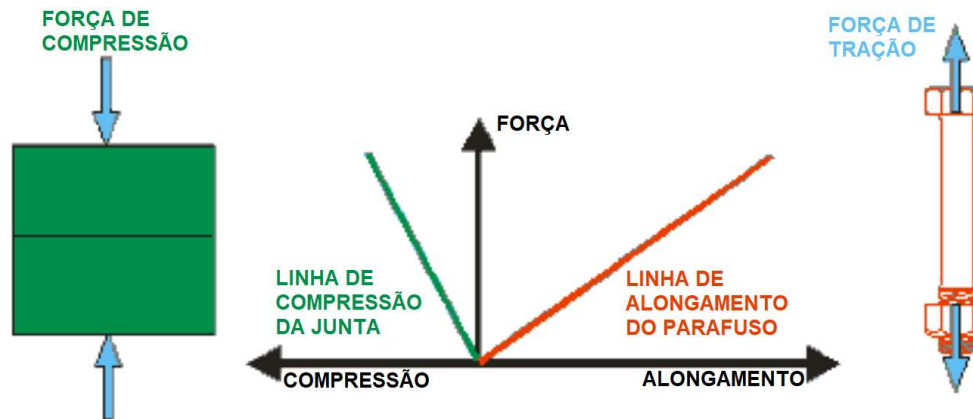


Figura 1 - Força de Compressão e Força de Tração (Bolt Science, 2018)

Tendo em conta o gráfico apresentado acima, podemos dizer que quando aplicamos uma força de tração externa no parafuso através da colocação de uma porca na rosca do parafuso, este fenómeno provoca resistência a uma possível extensão ou alongamento do produto, o que origina a força de pré-carga. A reação causada pela pré-carga, cria a compressão da junta devido à força de aperto. Cada uma das linhas representadas a verde e laranja representa, respetivamente, a rigidez associada à junta e ao parafuso. Normalmente as juntas são mais rígidas que os parafusos. De seguida, é apresentado um novo diagrama através da figura 2, onde foi removida a parte negativa.

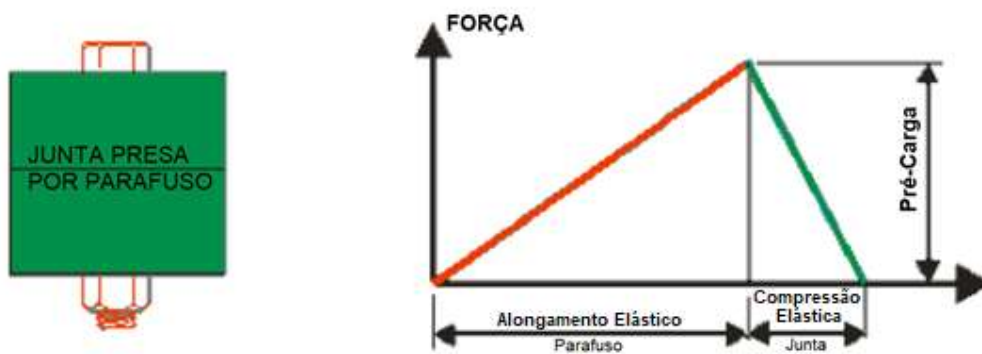


Figura 2 - Compressão e Alongamento Elástico (Bolt Science, 2018)

Comparando com o diagrama da figura 1, foi formado um triângulo porque a força de aperto que é utilizada para comprimir a junta é igual à força de pré-carga. De seguida, através da figura 3, é possível verificar que quando introduzimos uma força de tração externa, esta reduz parte da força de aperto aplicada à junta e aplica uma força adicional ao próprio parafuso.

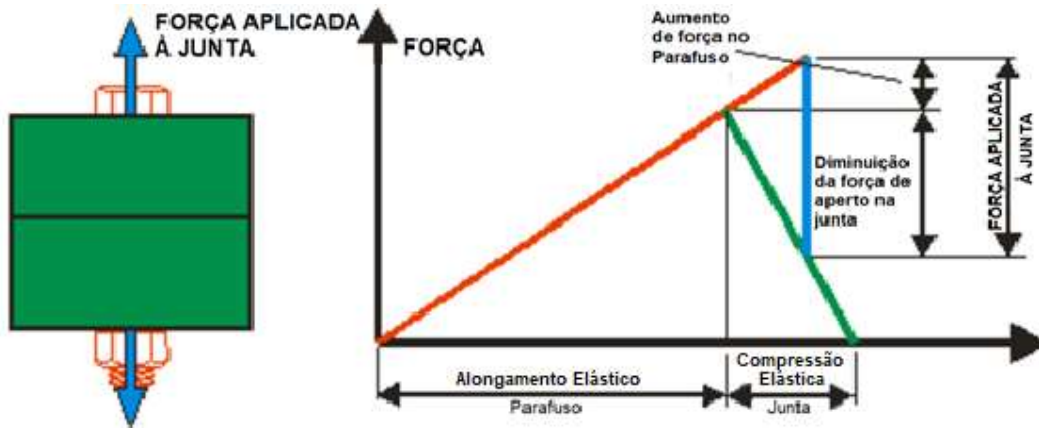


Figura 3 - Diagrama da força externa exercida (Bolt Science, 2018)

Como se pode verificar na figura 3, existe uma diminuição da força de aperto na junta para que seja aplicada uma carga adicional no parafuso. Mais à frente, será também possível verificar a grande diferença associada à rigidez existente diretamente nas juntas de aparafusamento.

Considerando aquilo que foi dito anteriormente, a força externa introduzida vai aumentando a força exercida sobre o parafuso à medida que este vai sendo introduzido, pelo que a força de pré-carga a que já está submetido, juntamente com a força externa, pode resultar no excedente de rendimento do material do parafuso, com a probabilidade de rotura do próprio. Através da figura 4, podemos constatar a criação de um ponto de tensão de cedência derivado do efeito de aplicação de um binário muito elevado no parafuso.

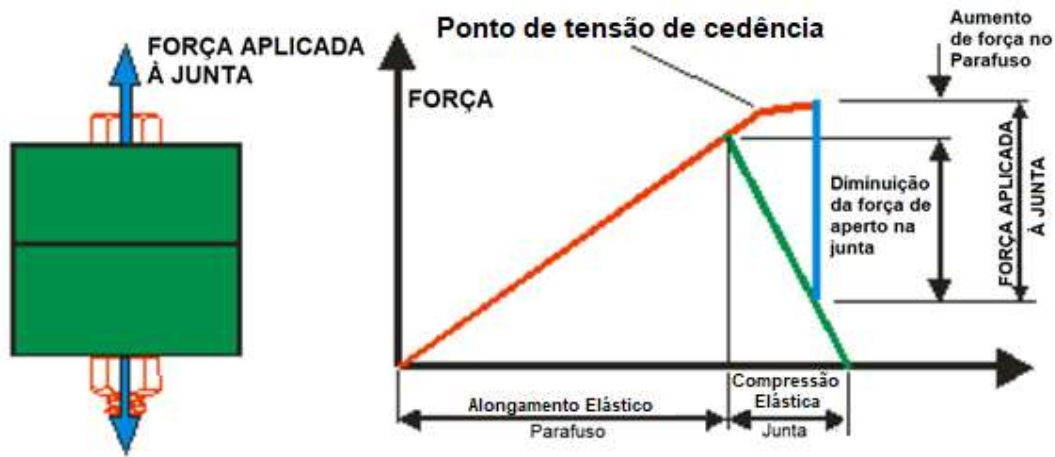


Figura 5 - Diagrama do Ponto de Tensão de Cedência (Bolt Science, 2018)

Em contrapartida, existe a possibilidade de ser aplicado um binário muito elevado ao parafuso, como apresenta a figura 5. O aumento da força aplicada pode resultar num afastamento das placas, onde se encontram o parafuso e a junta. Este fenómeno sujeitará o parafuso a cargas não lineares de flexão e cisalhamento, podendo levar à rutura do mesmo. Portanto, é sempre necessário definir a força a aplicar sem pôr em causa as juntas e os parafusos.

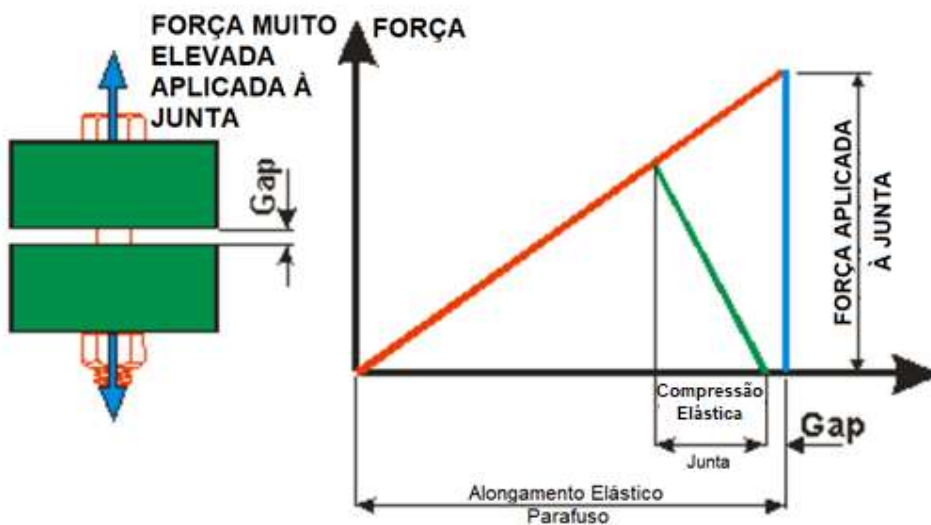


Figura 4 - Diagrama com o afastamento das contra-peças (Bolt Science, 2018)

Analisando a figura apresentada acima, averiguamos que as contra-peças afastadas conformam um pequeno espaçamento denominado de *Gap*. Para concluir,

apresenta-se o diagrama geral, com todas as forças externas e deformações intervenientes no processo de aparafusamento, através da figura 6 (Bosch Rexroth, 2013).

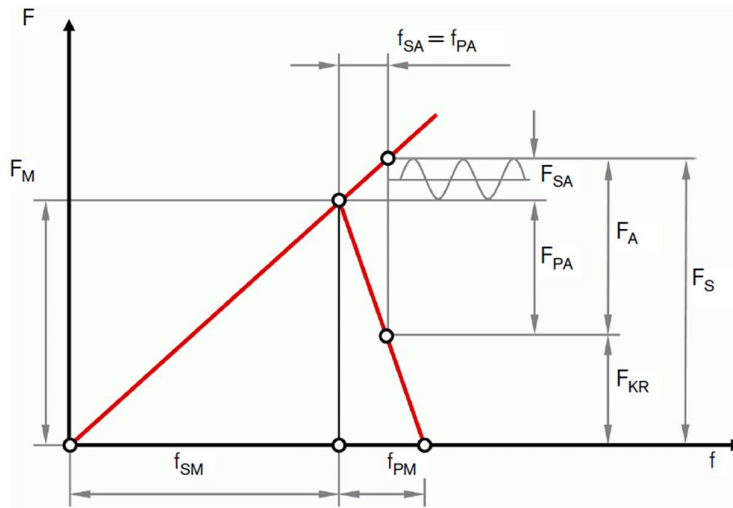


Figura 6 - Diagrama de forças e deformações (Bosch Rexroth, 2013)

Podemos verificar que o momento de força aplicará uma tensão no parafuso, permitindo assim a relação entre binário e força de pré-carga. De outro modo, este binário também provoca uma força de aperto entre as duas superfícies. No entanto, existem várias forças longitudinais e transversais a que o aparafusamento é submetido, como pode ser verificado e confirmado através da figura 7 (Bosch Rexroth, 2018b).

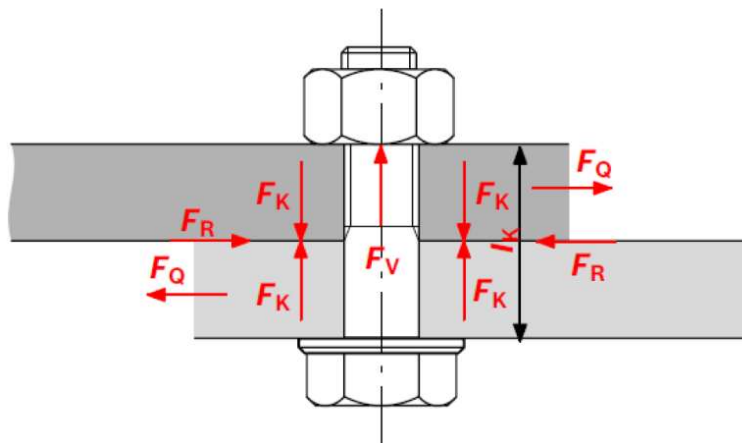


Figura 7 - Processo de Aparafusamento (Bosch Rexroth, 2018b)

Tendo em conta a figura indicada acima, os parafusos são expostos a tensões e torções de stress. Podemos também ver que o alongamento do parafuso e a compressão das contra-peças são influenciadas pela pré-carga F_V , aplicada através das forças. A força de compressão F_K não pode ser superior à força de pré-carga, de forma a não alcançar a

tensão de cedência do parafuso. No entanto, também é necessário que a força de atrito F_R seja superior à força transversal a que o parafuso é sujeito, de maneira a evitar a deslocação de peças (Bosch Rexroth, 2018b).

Para controlar um aparafusamento, já verificamos anteriormente que temos de proceder ao controlo da força de aperto aplicada. Todavia, este processo não é uma tarefa simples de realizar devido à sua grande complexidade. Os parafusos podem ser submetidos a momentos de força insuficientes que provocarão desgaste prematuro, defeitos de fadiga e por isso, conseqüentemente, falha. De outro modo, um momento de força excessivo também provocará a cedência do parafuso quando submetido a pressões muito elevadas (Jr., 2003).

Em suma, podemos referir que uma junta para estar bem aparafusada tem de cumprir quatro requisitos (Bosch Rexroth España, 2016):

- Poder ser desapertada sem haver qualquer risco de destruição;
- Utilização de força de pré-carga alta e constante;
- Fiabilidade associada à força de aperto requerida;
- Não haver possibilidade da peça se soltar.

Quando são criadas as ligações aparafusadas, a força de aperto que deve ser usada para realizar uma fixação segura é normalmente especificada. Tendo em conta que é extremamente difícil de medir a força de aperto, o binário e o ângulo de rotação são usados como parâmetros, porque podem ser rapidamente relacionados com a força de aperto. Ao determinar a força de aperto necessária usando o binário de aperto medido, devem ser levados em conta os fatores apresentados de seguida (Bosch Rexroth, 2013).

2.2 Fatores Influentes na Força de Pré-Carga

Apesar da grande complexidade associada ao processo de aparafusamento, existem outros fatores que são igualmente influentes para o aperto devido à influência direta que têm associada à força de pré-carga. Os fatores influentes na força de pré-carga são:

- Atrito;
- Assentamento;
- Métodos de montagem pouco adequados;
- Temperatura.

2.2.1 Atrito

O atrito é um dos fatores influentes no aparafusamento porque consiste na combinação do atrito existente debaixo do parafuso com o atrito existente na rosca. Por outro lado, o atrito não dificulta o cálculo da força de aperto da montagem a partir do binário aplicado. A seguir, a figura 8 apresenta a distribuição do binário aplicado.

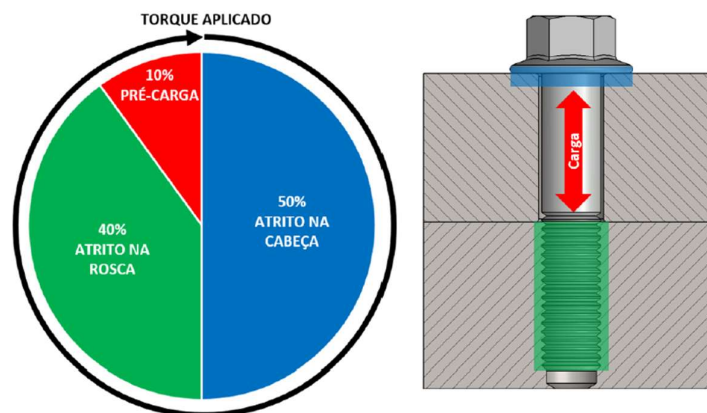


Figura 8 - Distribuição do Binário Aplicado (Fernandes, 2018)

Levando em conta a figura 8, verificamos que 90% do binário que é utilizado no processo de aparafusamento é usado para vencer o atrito e apenas 10% do binário é

diretamente utilizado na pré-carga. Assim, o atrito debaixo da cabeça do parafuso com aproximadamente 50% e o atrito na rosca com aproximadamente 40%, têm uma influência acrescida no binário de aparafusamento utilizado no processo (Bosch Rexroth, 2018b).

O atrito debaixo da cabeça do parafuso está diretamente relacionado com o assentamento do parafuso na superfície. O atrito na rosca está diretamente associado aos flancos de filetes da rosca do parafuso e aos da porca ou rosca da contra-peça (Fernandes, 2018).

Segundo a DIN 946, as determinações dos coeficientes de atrito são decisivas para o nível e precisão da pré-carga aplicada. Os coeficientes vão se alterando durante a montagem, levando em conta diretamente a força de pré-carga que está a ser utilizada.

Aplicando o conceito de binário associado ao fator de atrito K que se encontra diretamente relacionado com os tipos de materiais utilizados na fabricação de elementos de fixação, temos a seguinte equação (Rodrigues, 2015):

$$T = M_A = F * d * K \quad (1)$$

Onde,

T – Binário;

d – Diâmetro nominal;

K – Fator de atrito (Constante);

F – Força pré-carga.

Como já foi dito anteriormente, a força de aperto tem de ser suficientemente elevada de modo a que as contra-peças fiquem bem apertadas. Por outro lado, o fator K é soma dos atritos existentes na zona da rosca e na zona da cabeça do parafuso. Este fator alberga, por isso, todos os fatores de atrito importantes, tomando assim o papel preponderante quando se procede ao controlo de binário. É possível deduzir a expressão geral trabalhando as variáveis K e d como se pode verificar através da equação apresentada a seguir (VDI 2230, 2003):

$$T = F * \left[\frac{1}{2} * \frac{P + 1,154 * \pi * \mu_G * d_2}{\pi - 1,154 * \mu_G * \frac{P}{d_2}} + \mu_k * \frac{D_o + d_h}{4} \right] \quad (2)$$

Onde,

F – Força Pré-carga;

M_A – Momento de Aperto;

p – Passo;

d_2 – Diâmetro primitivo da rosca;

μ_G – Coeficiente de atrito na rosca do parafuso;

μ_K – Coeficiente de atrito na cabeça do parafuso;

D_{Km} – Diâmetro efetivo de atrito na cabeça do parafuso;

No seguimento da análise anteriormente realizada, verificamos que o coeficiente de atrito na rosca do parafuso pode ser dado pela seguinte expressão (VDI 2230, 2003):

$$\mu_G = \frac{\frac{T_r}{F} - \frac{P}{2\pi}}{0,577d_2} \quad (3)$$

Onde,

T_r – Binário na rosca;

F – Força pré-carga;

p – Passo;

d_2 – Diâmetro primitivo da rosca;

μ_G – Coeficiente de atrito na rosca do parafuso.

É também importante determinar o atrito na superfície da cabeça do parafuso através da seguinte expressão (VDI 2230, 2003):

$$\mu_K = \frac{T_c}{0,5 \times D_c \times F} \quad (4)$$

Onde,

T_c – Binário na cabeça do parafuso;

F – Força pré-carga;

D_c – Diâmetro da superfície do rolamento sob a cabeça do parafuso;

μ_K – Coeficiente de atrito na superfície da cabeça do parafuso.

E pelas deduções anteriormente demonstradas podemos chegar à conclusão que (VDI 2230, 2003):

$$T_C = T - T_R \quad (5)$$

Onde,

T_C – Binário na cabeça do parafuso;

T_r – Binário na rosca;

T – Binário de aperto.

Seguidamente, a figura 9 apresenta o gráfico da dispersão do valor de atrito, tendo em conta um intervalo de binário de aperto e um intervalo de força de pré-carga (Bosch Rexroth, 2018b).

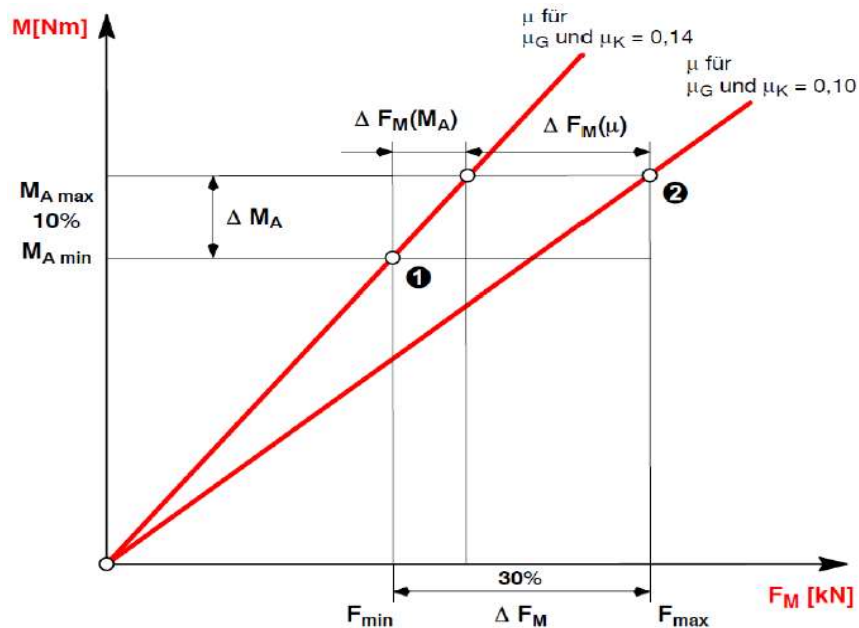


Figura 9 - Variação de binário e força de pré-carga associada ao atrito (Bosch Rexroth, 2018b)

A figura 9 permite tirar algumas conclusões, desde já relativamente à relação existente entre binário, atrito e força de pré-carga. Levando em conta a equação previamente explicada do binário, é possível perceber que quanto menor for o binário,

maior vai ser o atrito associado ao aparafusamento para um mesmo valor de força de pré-carga. Por outro lado, quando o binário atingir um valor elevado, o valor do coeficiente de atrito irá ser mais reduzido para o mesmo valor de força de pré-carga aplicada (VDI 2230, 2003).

Ainda assim, existem formas de reduzir os limites de atrito utilizando lubrificantes, ceras ou óleos. Aliás, a utilização deste tipo de produtos reduz o atrito associado ao aparafusamento, mas não só, também diminui a temperatura associada e consequentemente a dilatação da superfície aparafusada. De seguida, será apresentada uma figura, em que para o mesmo binário de aparafusamento, a força de pré-carga varia consoante o tipo de parafuso utilizado (parafuso seco ou parafuso lubrificado) (Bosch Rexroth, 2018b).

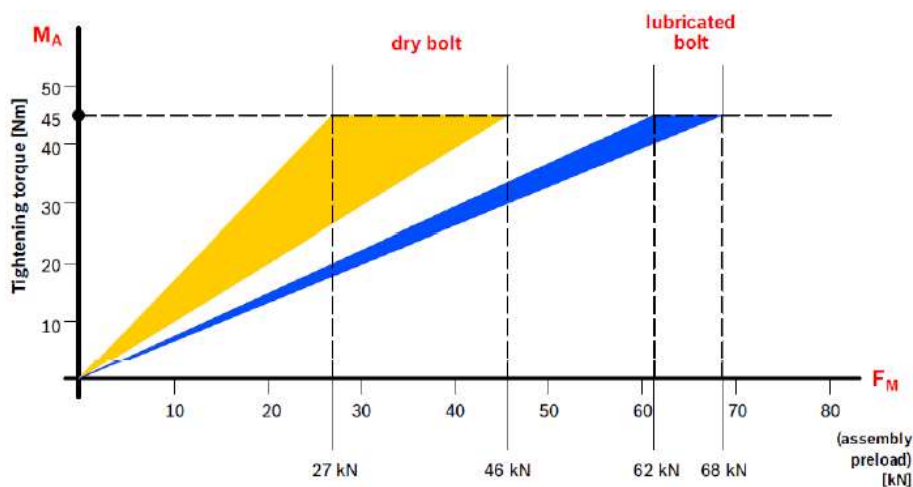


Figura 10 - Precisão da força de pré-carga (Bosch Rexroth, 2018b)

Olhando para a figura 10, verificamos que a faixa de valores apresentada pelo parafuso lubrificado faz aumentar a probabilidade de um aperto de alto nível e precisão.

Existem também outros fatores que aumentam diretamente o atrito associado a um aperto como a existência de superfícies de assentamento mais rugosas, parafusos de qualidade duvidosa, onde haja por exemplo defeitos nos flancos de filetes da rosca, ou a utilização de materiais inadequados que compliquem a realização de um aperto. Por isso, a qualidade da maquinaria das peças a serem aparafusadas influencia muito o atrito envolvido no processo. Além disso, as tolerâncias de rugosidade e o material utilizado

em parafusos e porcas são fatores muito importantes para aferirmos o atrito relacionado com o processo. Por último, é também fundamental ter em conta o revestimento das superfícies porque pode influenciar de forma direta a maneira como o aperto deve ser realizado.

2.2.2 Assentamento

O assentamento é o processo associado à distorção plástica das peças e/ou parafusos durante o aparafusamento, onde a força aplicada é diminuída de forma permanente. Este acontecimento pode ser constatado através da figura 11 que se segue.

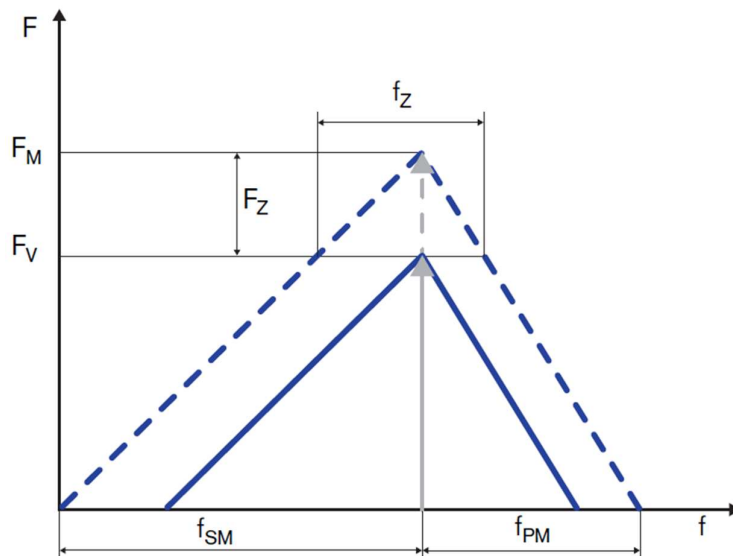


Figura 11 - Relação entre a força de aperto e distorção do parafuso e das peças conectadas (Bosch Rexroth, 2013)

Através da figura 11, conseguimos ver a diferença entre a relação de aperto com a distorção antes e após o processo de assentamento. Podemos apurar que antes de acontecer o processo de assentamento, a força F_M permitia ao parafuso atingir um alongamento f_{SM} e uma compressão f_{PM} que após o processo vai diminuir a força de aperto aplicada atingindo F_V , criando uma variação F_Z considerada a força perdida durante o procedimento. O assentamento deve, por isso, ser controlado quando se pretende realizar um aparafusamento com qualidade. Para isso, existem procedimentos a ter de forma a impedir a realização deste fenómeno, entre os quais (Bosch Rexroth, 2013):

- Dimensionamento cuidado, de forma a evitar que as forças aplicadas excedam os pontos de escoamento dos materiais;
- Seleção dos materiais mais adequados e suficientemente fortes;
- Avaliar a superfície de maneira a evitar o assentamento próximo de superfícies rugosas;
- Determinação do resultado de um aperto só após o processo de assentamento, quando o aperto for realizado junto à superfície rugosa.

Em seguida, será mostrada a figura 12 onde é possível ver a ação direta dos assentamentos.

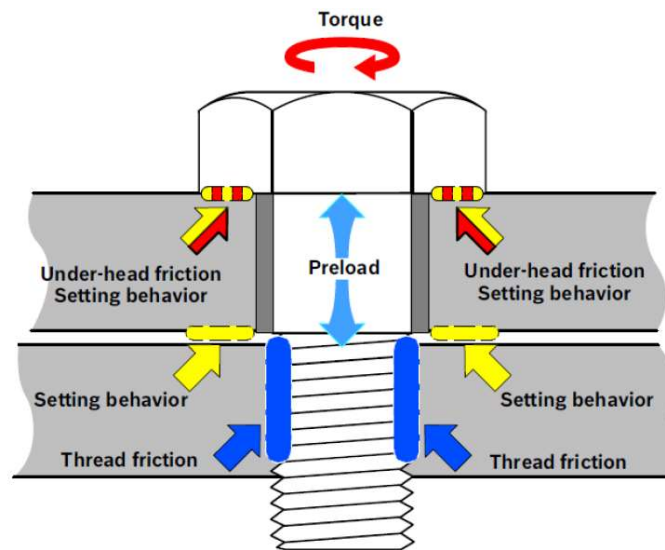


Figura 12 - Atrito e Assentamentos (Bosch Rexroth, 2018b)

Através da figura 12, é possível comprovar que além do atrito a que é sujeita a cabeça e a rosca, também existem assentamentos a acontecer em simultâneo. As contra-peças são alvo de assentamentos assim como a cabeça do parafuso. Os assentamentos segundo aquilo que foi dito anteriormente, são capazes de reduzir a pré-carga do aperto.

Por isso, os assentamentos são um fator extremamente importante para o processo porque são os locais onde as contra-peças se vão unir. Por outro lado, a existência de defeitos ou alinhamentos desadequados das peças, irão provocar um mau aperto.

Por fim, as utilizações de métodos inadequados de aparafusamento também constituem um erro extremamente grave e que pode afetar em muito as peças e o próprio aparafusamento.

2.2.3 Métodos de Montagem Pouco Adequados

Atualmente, o mercado de aparafusamento apresenta um grande leque de ferramentas que podem ser utilizadas no aperto, no entanto, muitas vezes as máquinas são inadequadas para a realização da tarefa, além da possível existência de imprecisão.

Por vezes, a falta de *know-how* do operador leva-o a utilizar peças inadequadas, como por exemplo, parafusos com diferentes materiais ou tamanhos que muitas vezes constituem um erro grave, quando se pretende fazer um aperto com sucesso e aplicando a força de aperto adequada.

Ocasionalmente, também poderão existir problemas associados a uma força de aperto extremamente elevada, o que poderá provocar um desequilíbrio na junta quando estamos por exemplo, na presença de um elemento que apresenta dois aparafusamentos e em que um dos aparafusamentos foi realizado com mais binário do que o outro, como se pode verificar através da figura 13 (Enerpac, n.d.).

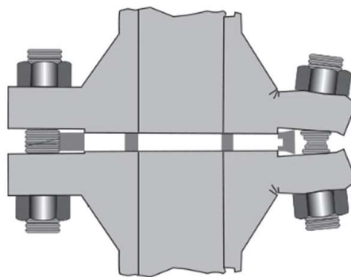


Figura 13 - Falha de uma junta (Enerpac, n.d.)

2.2.4 Temperatura

A temperatura é considerada um fator muito importante na realização dos apertos, devido à relação entre os materiais e a sua dilatação térmica. A dilatação térmica pode provocar alterações num processo de aparafusamento e por vezes, até impedir o próprio

processo devido à dilatação do material, por exemplo, um parafuso pode ter dificuldade em entrar na rosca previamente dimensionada, por isso deve ser dado especial ênfase aos coeficientes de dilatação dos materiais. Por outro lado, quando uma junta já está aparafusada, o coeficiente de dilatação continua a ser uma variável muito importante porque por vezes, existem defeitos no aparafusamento realizado que só são verificados quando há dilatação do material, sendo por isso necessário proceder-se a um dimensionamento com extremo cuidado, de forma a verificar todas as variáveis que intervêm de forma direta num aperto (Bosch Rexroth, 2013).

2.3 Fator de Aparafusamento

A força de aperto de uma junta aparafusada normalmente leva em conta alguns fatores, tais como:

- Atrito existente sob a cabeça do parafuso e rosca;
- Diferenças devem-se ao tipo de processo de aparafusamento, por exemplo, se o parafuso é aparafusado depressa ou devagar;
- Método utilizado (Controlo por binário, Controlo por ângulo ou Controlo por tensão de cedência);
- Precisão da máquina utilizada.

Todos os fatores acima mencionados devem ser levados em conta, de forma a que a força mínima de fixação do FV_{min} seja atingida e a junta bem aparafusada. De outra forma, se a conexão atingir a força máxima de aperto de montagem FV_{max} , o parafuso também não será destruído. Essencialmente, as forças de fixação mínima e máxima são consideradas para aferir o intervalo em que é possível realizar um aparafusamento com sucesso.

Segundo a diretiva (VDI 2230, 2003), o fator de aperto utiliza o efeito dos fatores de influência através da força de aperto. Quanto maior o fator de aperto, maior é a conexão aparafusada, sendo extremamente necessário dimensionar o diâmetro do parafuso. O fator de aperto pode ser definido através da seguinte equação (Bosch Rexroth, 2013):

$$a_A = \frac{F_{Vmax}}{F_{Vmin}} \quad (6)$$

Onde,

F_{Vmax} – Força de aperto máxima;

F_{Vmin} – Força de aperto mínima necessária.

2.4 Força a Aplicar sobre o Parafuso

Levando em conta a (DIN 931, 1987), o número que pode ser encontrado geralmente na superfície da cabeça do parafuso é denominado como sendo a classe de resistência do parafuso. A classe de resistência associada ao parafuso é composta por dois números (Bosch Rexroth, 2018b):

- O primeiro algarismo quando multiplicado por 100, expõem o valor da resistência de tração mínima associada;
- O segundo algarismo representa a percentagem de tração, ou seja, se multiplicarmos a resistência de tração pela percentagem, obtemos o limite de escoamento associado ao parafuso.

No caso das porcas, estas apenas apresentam a resistência de tração mínima.

Seguidamente, a figura 14 demonstrará alguns parafusos com diferentes classes.

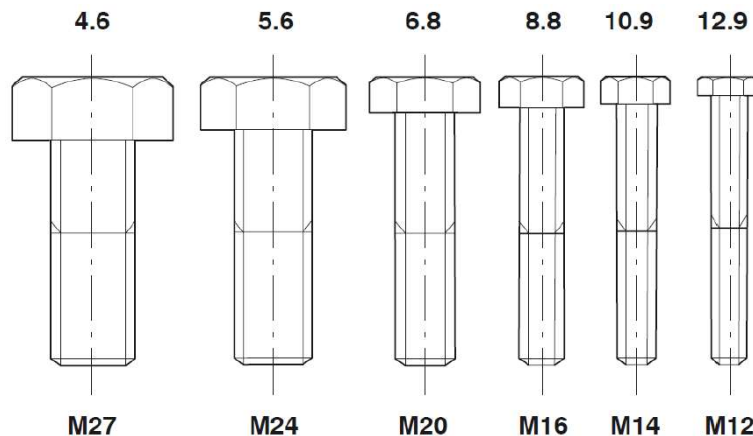


Figura 14 - Parafusos com diferentes classes de resistência (Bosch Rexroth, 2018)

Como podemos constatar através da figura 14, os parafusos apresentam diferentes classes. Por exemplo, o parafuso 8.8 apresentará uma resistência de tração na ordem dos 800 N/mm² e uma resistência de escoamento na ordem dos 640 N/mm² que é corroborado pela figura 15 apresentada prontamente.

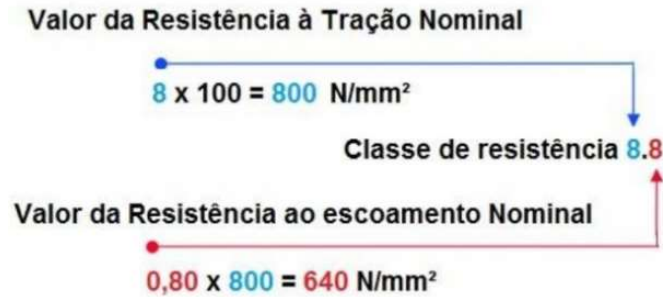
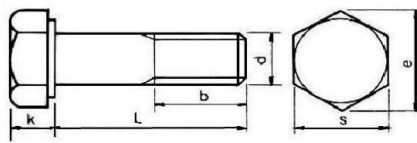


Figura 15 - Significado da classe de resistência (Classes de Resistência de Parafusos, 2017)

Não obstante, quando falamos do nome do parafuso que se encontra apresentado na figura 14, referimo-nos ao diâmetro da rosca apresentado pelo próprio parafuso, como é apresentado na figura 16. Além disso, estamos a obter informações mais detalhadas à cerca dos tamanhos físicos associados ao parafuso.



d	M4	M5	M6	M8	M10	M12	(M14)	M16	(M18)	M20	(M22)	M24	
s	7	8	10	13	17	19	22	24	27	30	32	36	
e	7,74	8,87	11,05	14,38	18,90	21,10	24,49	26,75	30,14	33,53	35,72	39,98	
k	2,8	3,5	4	5,5	7	8	9	10	12	13	14	15	
b	com rosca na totalidade												
	x	14	16	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54
	z	-	22	24	28	32	36	40	44	48	52	56	60

Figura 16 - Tamanhos físicos de um parafuso sextavado com rosca parcial (Chagas, 2020)

2.5 Carga na rosca da porca

A porca transmite a carga a que é submetido o parafuso. Através do primeiro encaixe da rosca na superfície lateral, este é usualmente submetido a uma tensão de carga total entre 30% a 38%. A partir daí, o resto dos encaixes da rosca vão ser submetidos cada um deles a tensões de carga cada vez mais inferiores como se pode verificar através da figura 17 (Bosch Rexroth, 2018b).

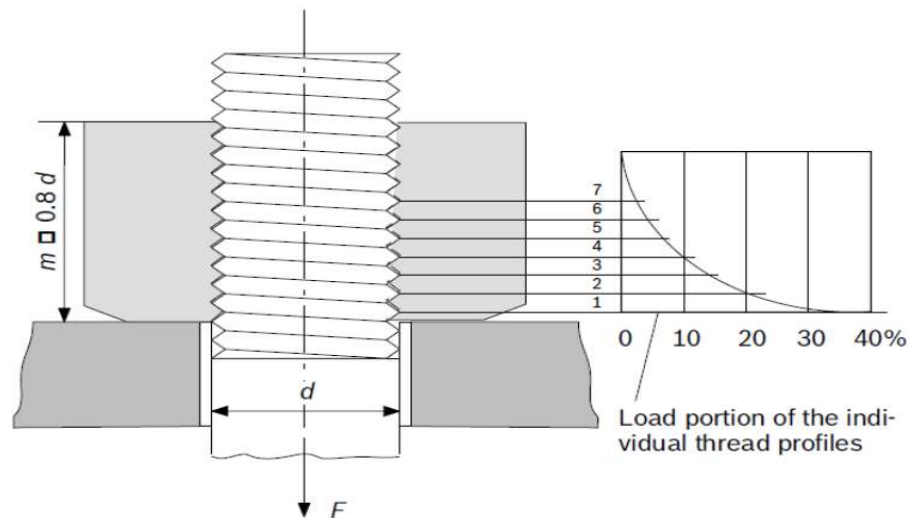


Figura 17 - Carga submetida a cada rosca (Bosch Rexroth, 2018b)

A figura 17 permite também verificar que a altura da rosca é de $m=0.8d$ segundo a (DIN 6915, 1999).

2.6 Métodos de Medição

2.6.1 Medição para a força de aperto

A força de aperto é a força de compressão que comprime as duas peças que se pretende apertar. Esta força pode ser medida através da utilização de uma anilha com extensómetro. O extensómetro é um transdutor que é capaz de medir deformações mecânicas através da alteração da resistência elétrica. Podemos verificar como se coloca o anel na figura 18 (Bosch Rexroth, 2018b).

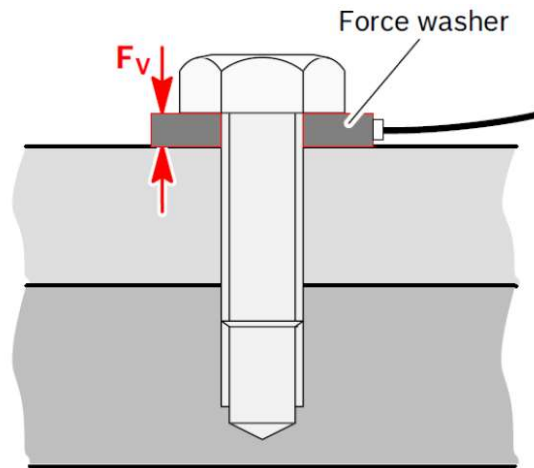


Figura 18 - Anilha com extensômetro (Bosch Rexroth, 2018b)

O processo representado na figura 18 tem como principal vantagem, como já foi dito anteriormente, permitir a medição direta da força de aperto aplicada no aparafusamento. Por outro lado, este processo é bastante caro e deve-se deixar o anel na junta aparafusada (Bosch Rexroth, 2018b).

Normalmente, esta medição é usada para a realização de testes, permitindo assegurar a qualidade do aperto.

2.6.2 Medição do comprimento do parafuso

O processo de medição de comprimento do parafuso permite através do *piezo-electrical sensor* medir de forma indireta a força de aperto, tendo em conta a mudança de comprimento dos parafusos através da utilização de ultra-sons. O tempo de reflexão da onda na base é utilizado para fazer o cálculo do comprimento do parafuso (Bosch Rexroth, 2018b). Este tipo de medição pode se verificar através da figura 19 apresentada seguidamente.

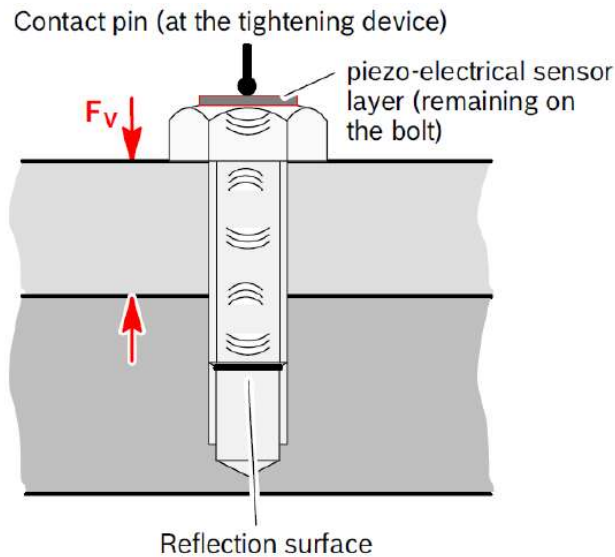


Figura 19 - Medição com piezo-electrical sensor (Bosch Rexroth, 2018b)

Na figura 19, podemos constatar que não há influência da fricção nesta medição, no entanto, este tipo de medição é pouco utilizado devido ao preço elevado do sensor.

Normalmente, este tipo de medição é utilizado na indústria aeronáutica.

2.6.3 Medição por binário

O método de medição por binário é aquele que é geralmente utilizado para medir de forma indireta a força de aperto. É também, o método mais utilizado na medição de binário por causa da simplicidade, custo e eficácia do seu processo. As forças de atrito influenciam a sua força de aperto (Bosch Rexroth, 2018b). Na figura 20, é possível visualizar o processo de medição.

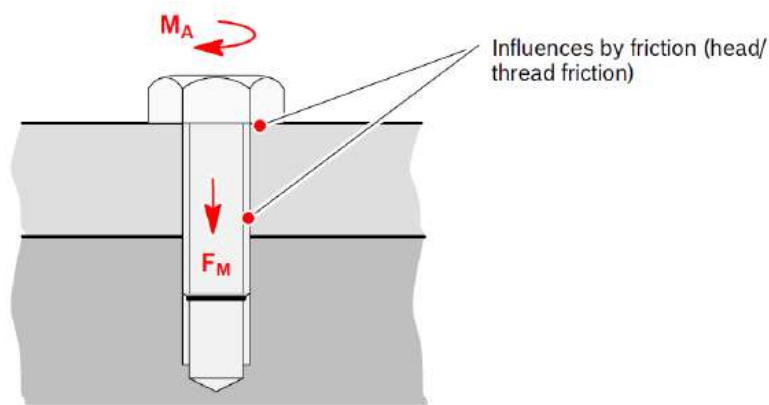


Figura 20 - Medição por binário (Bosch Rexroth, 2018b)

No entanto, o processo apresentado na figura 20, pode ser realizado de duas maneiras diferentes devido à existência de dois métodos que podem ser utilizados na inspeção do binário (Atlas Copco, n.d.-a):

- Medição de binário estática, que é realizada após o processo de aperto ser concluído. Somente através deste método é possível verificar o efeito de relaxamento nas juntas. Usualmente, este tipo de medição é realizado através de um torquímetro;
- Medição de binário dinâmica, realizada durante um ciclo de aperto completo. Esta medição ocorre quando o parafuso está em movimento até que este atinja o binário-alvo. Esta medição é realizada por meio de um transdutor externo.

2.7 Métodos de Aparafusamento

Seguindo aquilo que foi dito anteriormente, o aparafusamento na indústria automóvel é considerado muito complexo porque é necessário fazer-se o controlo de cada aparafusamento de forma individual. Para a manufatura de um veículo é necessário realizar aproximadamente 3000 apertos, o que dificulta de forma clara o controlo do aparafusamento, pelo que é necessário fazer-se um controlo extremamente minucioso. O controlo dos apertos é fundamental para que as fixações sejam extremamente seguras e confiáveis (Atlas Copco, 2015).

Na indústria automóvel, existem 3 métodos de controlo que são extremamente usados. Esses métodos encontram-se representados através da figura 21 apresentada em seguida.

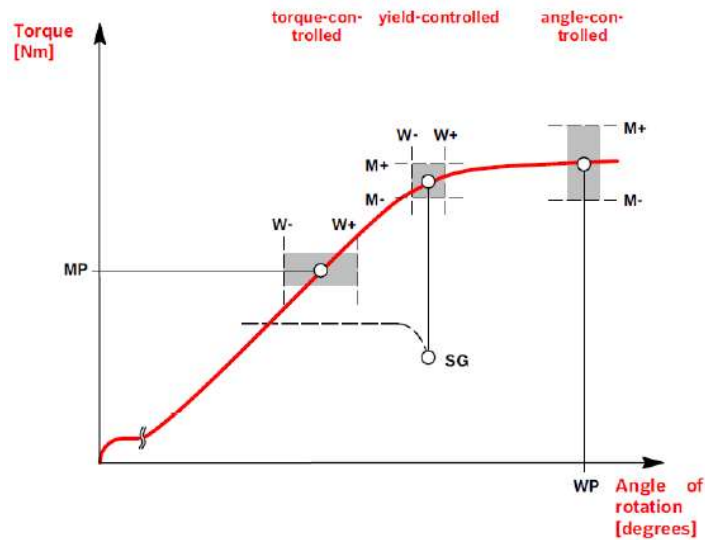


Figura 21 - Métodos de Aparafusamento (Bosch Rexroth, 2018b)

Tendo em conta a figura 21, temos o método controlado por binário, o método controlado por ponto elástico e por último, o método controlado por ângulo. Estas técnicas de aparafusamento são possíveis de realizar graças à existência de aparafusadoras industriais com transdutores de binário e ângulo.

A técnica mais utilizada, como já foi mencionado, é o controlo através de binário porque o parâmetro é mais fácil de medir (Bosch Rexroth, 2013).

Usualmente, as outras duas técnicas apresentadas na figura 21, são na maior parte das vezes utilizadas quando estamos na presença de aparafusamentos críticos, onde a pré-carga tem de ser manifestamente baixa.

2.7.1 Aperto controlado por binário

O método de aperto controlado por binário é o mais utilizado devido ao manuseamento simples e à existência de ferramentas económicas que fazem este tipo de apertos.

Segundo a (VDI 2230, 2003), e tomando em conta todas as expressões, a indústria automóvel quando procede ao controlo de binário, utiliza aparafusadoras de grande precisão que permitem posteriormente a criação de gráficos, de modo a proceder-se a uma análise exhaustiva. Tendo em conta as curvas dos parafusos utilizados, é possível verificar

se o aperto está a ser bem feito para aquele tipo de parafuso. No entanto, estas expressões permitem-nos tirar outro tipo de conclusões tais como (Jr., 2003):

- A força tensora é aplicada através de um binário ou momento e leva em conta os coeficientes de atrito μ_G e μ_K ;
- Por segurança de funcionamento de uma junta de aparafusamento, é sempre necessária a consideração de uma força mínima de montagem;
- O aparafusamento tem em conta os valores de força tensora superior e inferior, que podem ser alcançados no aperto de modo a verificar se um aparafusamento foi bem ou mal realizado.

O controlo por binário na indústria automóvel é maioritariamente supervisionado por ângulo, como se pode verificar através da figura 22:

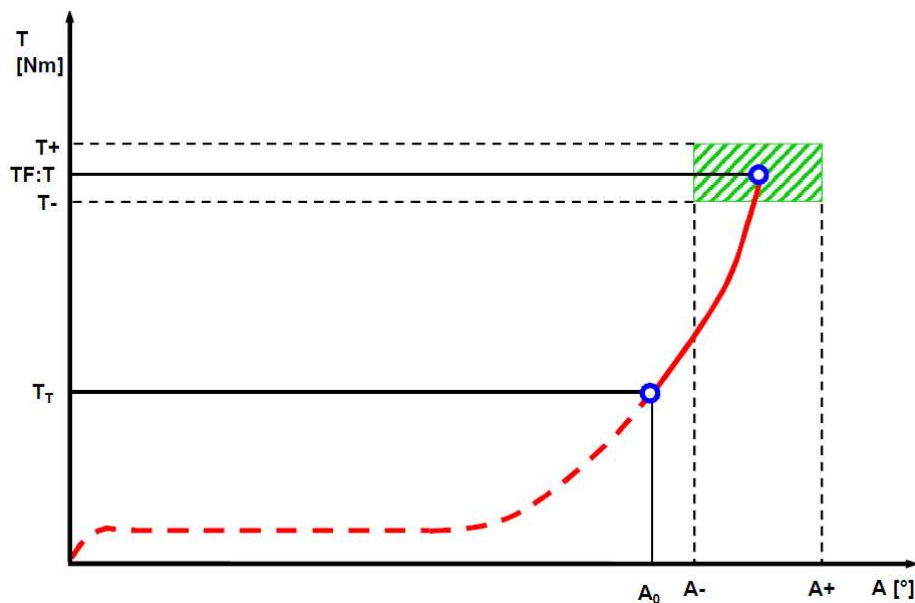


Figura 22 - Método de controlo de binário com supervisão de ângulo (Bosch Rexroth España, 2016)

Analisando a figura 22 representada acima, verificamos que as aparafusadoras industriais fazem controlo de binário de forma muito precisa, devido há medição em tempo real proporcionada pelos transdutores internos, que através da utilização do ângulo conseguem controlar o aparafusamento de forma mais precisa. Este tipo de controlo monitorizado posteriormente por ângulo só é permitido devido à presença de transdutores de medição integrados, uma vez que os transdutores usualmente possuem uma função de

medição de ângulo e os sistemas de controlo utilizados são capazes de avaliar os sinais de ângulo que recebem (Deprag, n.d.).

Através do gráfico apresentado acima (figura 22), verificamos que inicialmente existe um binário limite, habitualmente chamado *Threshold Torque* representado por T_T , que é aplicado inicialmente até ao parafuso ser colocado no lugar. Assim que a cabeça do parafuso entrar em contacto com a superfície, o binário T_T é excedido, altura em que é iniciada a supervisão por ângulo, representada por A_0 . O ângulo é então medido desde o *Threshold Torque* até ser atingido o binário máximo. O binário máximo é representado pelo T_+ e faz parte da janela de aceitação de um aparafusamento que também é composta por T_- que corresponde à variação permitida sobre o Binário de Aperto Final T_F , binário que inicialmente é determinado como o binário objetivo para o aparafusamento. Enquanto esse objetivo é alcançado, o ângulo que vem sendo calculado desde A_0 tem que se encontrar entre a janela de variação entre A_- e A_+ (Bosch Rexroth, 2013).

O binário limite deve ser escolhido para que os processos de junção na junta aparafusada (por exemplo, peças de chapa metálica unidas firmemente) estejam completos. Caso contrário, a dispersão do ângulo será desproporcionalmente alta e não fornecerá nenhuma informação útil.

Os limites de tolerância devem ser determinados com base em análises estatísticas, ou seja, devem ser realizados inúmeros aparafusamentos para definir o binário ideal a aplicar. Por outro lado, estes testes também permitem escolher a janela de tolerância que no caso de ser muito grande, não será capaz de identificar falhas de parafusos ou componentes fazendo com que a função de monitorização de ângulo não seja eficaz. Se usado de forma correta, a função de monitorização de ângulo permitirá detetar os seguintes problemas e defeitos (SV Enterprises, n.d.):

- Alterações na qualidade do lote de parafusos ou componentes;
- Roscas retiradas antes de ser atingido o M_{max} ;
- Apreensão da linha antes de apertar;
- *Threads* inacabados.

Normalmente, este tipo de ferramentas permite a colocação do valor de binário a aplicar no parafuso e as restrições de ângulo permitem que seja possível controlar a

entrada do parafuso na sua zona plástica e elástica. Por isso, quando bem dimensionado, o parafuso utilizado no aperto terá pouca probabilidade de romper.

Habitualmente, este tipo de controlo é utilizado em parafuso padronizados onde já são bem conhecidas as suas curvas de deformação proporcionando um aperto de elevada segurança.

Este método é normalmente utilizado para a montagem das rodas e da transmissão de veículos pelo que os dispositivos utilizados têm de possuir uma enorme capacidade de precisão e segurança no aperto.

Quando se utiliza este método, é necessário ter em conta se estamos na presença de uma junta rígida ou flexível, como se pode visualizar através do gráfico representado na figura 23 (VDI 2647, 2017).

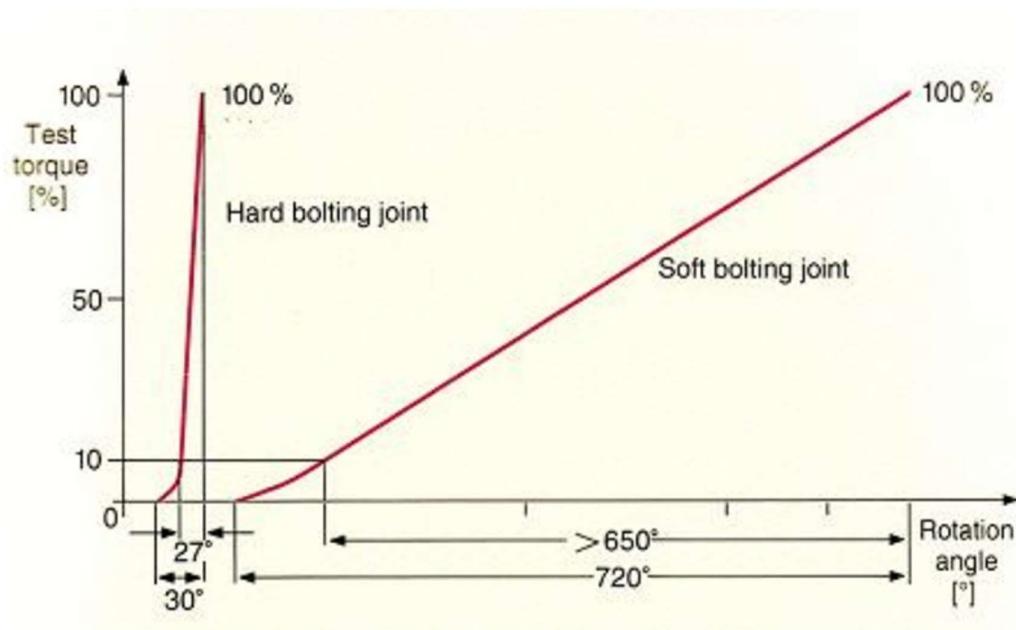


Figura 23 - Tipos de juntas de aperto rígidas e flexíveis de acordo com a ISO 5393 (SV Enterprises, n.d.)

Levando em conta a figura 23, constatamos que juntas flexíveis para um binário de aperto precisam de atingir um elevado ângulo de aparafusamento. Normalmente, este tipo de junta é utilizada quando estamos na presença de materiais mais macios ou elásticos como arruelas elásticas, elastômeros, etc. A exigência associada ao aparafusamento

destas conexões deve-se a cargas mecânicas de maior duração. Por outro lado, também podemos verificar o método utilizado em juntas rígidas, onde o binário final é atingido num pequeno ângulo de rotação. O objetivo do sistema de aperto passará por terminar rapidamente o aperto assim que o binário objetivo for atingido de forma a diminuir o eixo (inércia das massas). Posteriormente podemos então classificar o processo de aperto como seguro (Frischmann & Bittencourt, 2013).

Neste seguimento, é apresentada a definição de uma junta de aperto flexível ou rígida, tendo em conta a ISO 5393 (Bosch Rexroth, 2013):

- **Junta de aperto rígido:** Aumento do binário de 10% a 100% do binário alvo num ângulo de rotação de 27 ° (ou de 0% a 100% dentro de 30 °).
- **Junta de aperto flexível:** Aumento do binário de 10% a 100% do binário alvo em um ângulo de giro de 650 ° (ou de 0% a 100% dentro de 720 °).

Esta definição também é abordada na diretiva alemã (VDI 2647, 2017) definindo o seguinte:

- **Junta de aperto rígido:** Aumento do binário de 50% a 100% do binário alvo em um ângulo de rotação de 30 °.
- **Junta de aperto suave:** Aumento do binário de 50% a 100% do binário alvo em um ângulo de rotação de 360 °.

Por isso, podemos concluir que o ângulo contado começa nos 20% do binário total quando nos referimos a uma junta rígida e 80% do binário total quando falamos de uma junta flexível (Deprag, n.d.).

2.7.2 Aperto controlado por ângulo

Outro processo muito utilizado na indústria automóvel é o método de controlo por ângulo. Como no processo anterior, o binário também é utilizado, mas neste caso para supervisão como fator de controlo.

O aperto controlado por ângulo é um método de medição indireta do comprimento, uma vez que, a deformação linear do parafuso sobre o passo da rosca é

diretamente proporcional ao ângulo de rotação coberto. Por outro lado, tanto as deformações compressivas, como as plásticas e elásticas são medidas em simultâneo. Aqui o processo final é realizado com recurso ao ângulo e não ao binário. Isto significa que o aperto é realizado até um limite predeterminado e depois segue um ângulo predefinido, como ângulo a atingir no fim do processo de aparafusamento. Este controlo permite baixar a influência proveniente do atrito e é normalmente utilizado no aparafusamento das cabeças dos cilindros do motor. Se aplicado corretamente, o método de aparafusamento controlado por ângulo permite o ajuste controlado da tensão do parafuso na zona plástica. Este método de aparafusamento procede ao cálculo do ângulo através da contagem do número de voltas que o parafuso dá sobre si próprio. Através da figura 24 podemos ver mais acerca do método de aperto por ângulo (Bosch Rexroth, 2013).

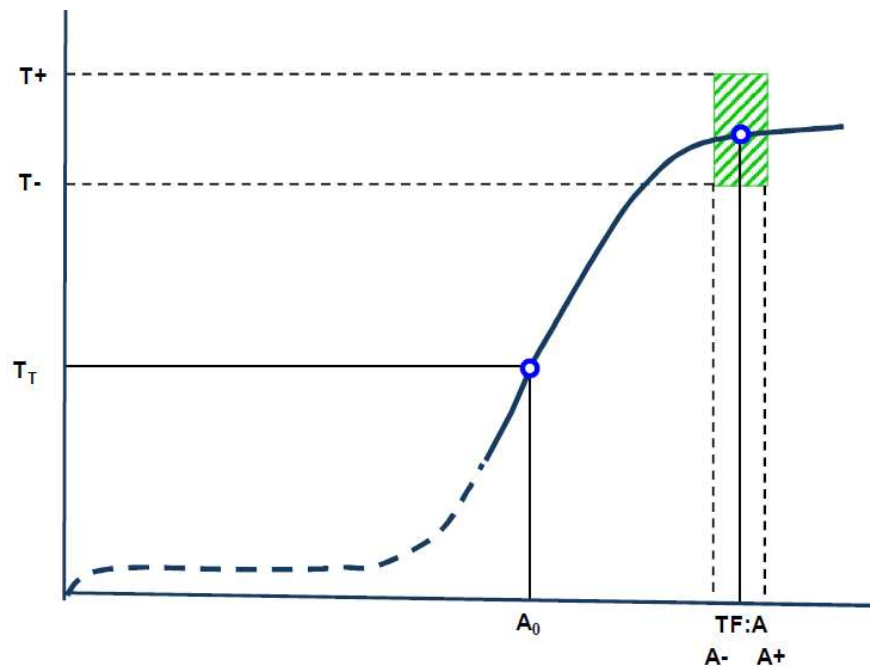


Figura 24 - Método de aparafusamento controlo por ângulo (Bosch Rexroth España, 2016)

Através do gráfico apresentado acima, verificamos que inicialmente existe de igual forma um *Threshold Torque* representado por T_T , considerado confortável, até ao parafuso ser colocado no lugar devido à dificuldade em calcular as deformações por causa da irregularidade destas. Assim que a cabeça do parafuso entrar em contacto com a superfície, o ângulo, através do número de rotações do parafuso procede ao

aparafusamento com recurso ao binário que posteriormente será controlado entre T_+ e T_- . O número de rotações do parafuso permite a relação direta com o comprimento do próprio parafuso. Depois de ultrapassado o ponto de *Threshold*, o ângulo é utilizado no aparafusamento segundo o objetivo que é pretendido no aperto. Esse aparafusamento será feito até ao número de voltas correspondentes ao ângulo de rotação estar completo. Este ângulo será auxiliado pela janela de binário de forma a que o aparafusamento se dê na zona plástica do parafuso, zona essa onde a característica de deformação fica horizontal, fazendo com que os erros de ângulo tenham pouco efeito. Por último, esta zona plástica torna-se um elemento fundamental para o aparafusamento a realizar através deste método (Bosch Rexroth, 2013). No gráfico da figura 25 podemos verificar que existem curvas que são definidas de acordo com a elasticidade existente do material utilizado e que contribuem de forma direta para o aperto a realizar e para o cálculo de ângulo a obter segundo esse aperto.

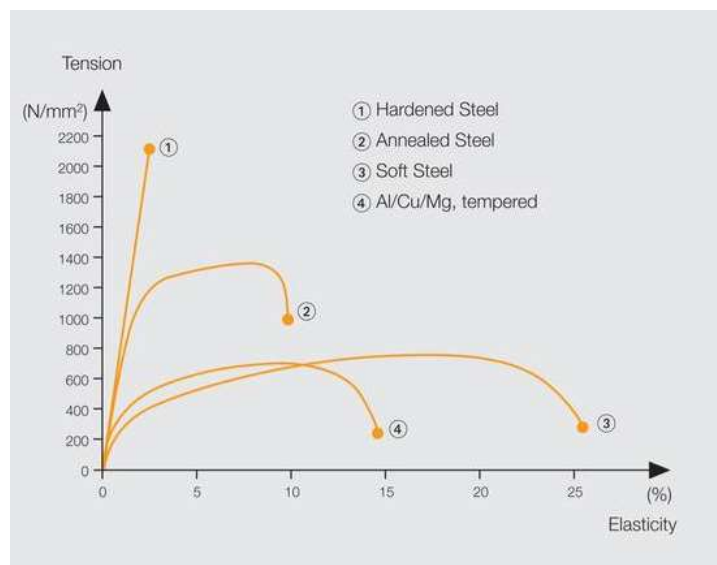


Figura 25 - Diagrama Elasticidade (Deprag, n.d.)

2.7.3 Aperto controlado por tensão de cedência

Este método de aparafusamento é normalmente utilizado quando pretendemos fazer um aperto com parafusos especiais, que deva ter determinadas características. A tensão de cedência é calculada pela aparafusadora industrial de forma automática. Esta medição é normalmente realizada com recurso à medição de binário e ângulo de rotação

durante o aparafusamento através da razão diferencial $\frac{\Delta M_A}{\Delta \varphi}$, também conhecida por gradiente que diminui, abruptamente, possibilitando o cálculo da tensão de cedência. Esta razão é também conhecida por permitir o cálculo da tangente da característica. A tensão de cedência serve essencialmente para controlar a pré-carga de montagem. Este valor vai baixando até a uma determinada fração do valor máximo armazenado na memória do computador que quando é atingido, ativa automaticamente o sinal de desligamento (Bosch Rexroth, 2013). Como no controlo de ângulo, inicialmente o processo é submetido a um binário confortável. A figura 26 apresenta um gráfico para melhor compreensão do método pela tensão de cedência do parafuso.

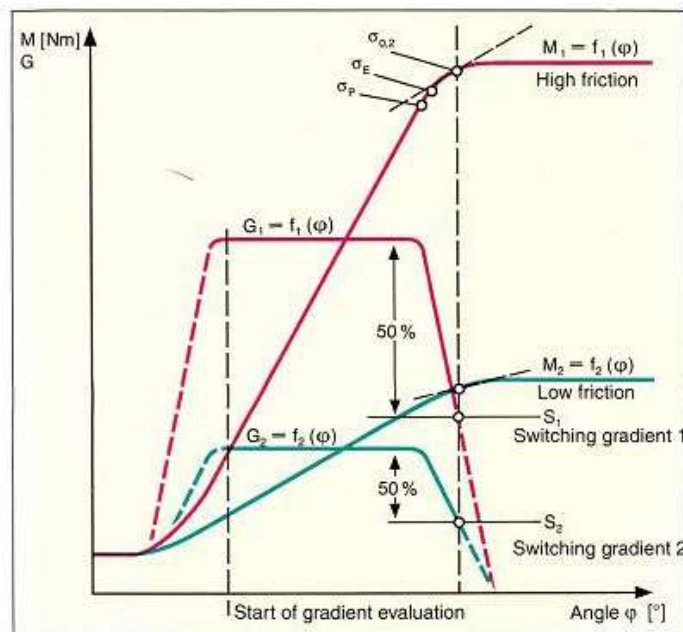


Figura 26 - Método pela tensão de cedência (SV Enterprises, n.d.)

Tendo em conta a figura 26 apresentada anteriormente, conseguimos reparar que a principal diferença entre este método e o método controlado por ângulo é que este método permite fazer o aparafusamento no limite da zona elástico-plástica. No entanto, previamente, deve ser dimensionada a junta aparafusada adequada para o processo, de forma a que não haja risco de rutura da cabeça ou corpo do parafuso utilizado. O gradiente apresentado na figura é fortemente influenciado pelos coeficientes de atrito existentes na cabeça e rosca do parafuso, na qualidade do parafuso e no comprimento de aperto (SV Enterprises, n.d.).

Existem duas questões que são extremamente importantes para que o aperto seja realizado de maneira a que junta fique conectada da forma mais adequada (SV Enterprises, n.d.):

- O aperto deve continuar desde o ponto onde começa a proporcionalidade até à tensão de cedência que coincide diretamente com a diminuição em 50% do valor da tangente que é utilizado para calcular o local exato do ponto de tensão de cedência;
- O atrito da rosca e a força tensora no parafuso devem ser significativamente menores que o atrito na cabeça e a tensão aplicada no parafuso, de modo a que elasticidade seja atingida tendo em conta a força tensora.

Com a queda previamente definida no gradiente, temos a garantia que o parafuso será sempre alongado em cerca de 0,2% do comprimento de fixação, devido à força de tensão de tração e torção.

2.7.4 Apertos Especiais

O método de aperto especial é considerado um dos elementos mais importantes no aparafusamento industrial, pois permite fazer um aparafusamento por fases, isto é, é permitido num mesmo aparafusamento por exemplo, utilizarmos os três métodos de binário de forma seguida. Este tipo de método será demonstrado com a figura 27.

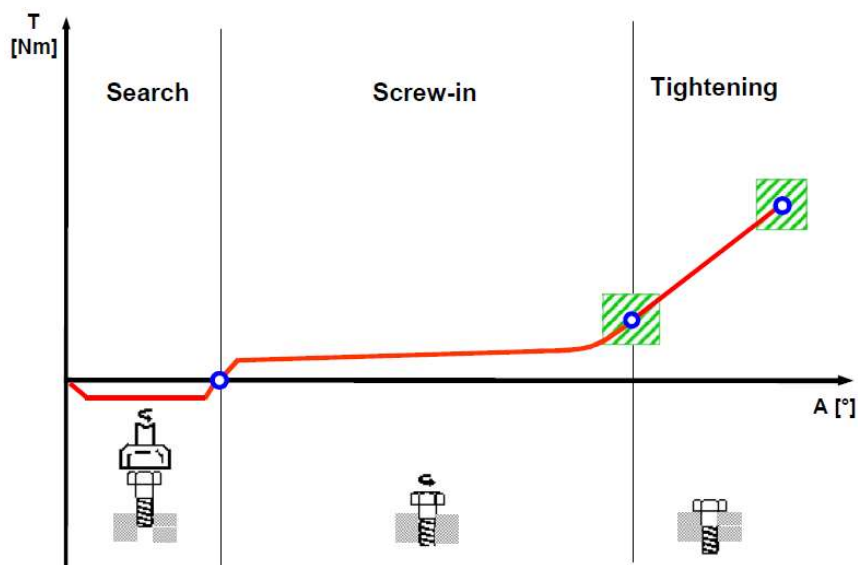


Figura 27 - Aparafusamento por etapas (Bosch Rexroth, 2018b)

Tendo em conta a figura acima apresentada, verificamos que inicialmente o programa de aperto utilizado começa a desapertar o parafuso até encontrar a zona ideal para o aparafusamento, seguindo-se um aperto que é claramente controlado por binário e que finaliza já com o aperto final onde é utilizado na mesma o binário com supervisão do ângulo. Ou seja, este método permite ter o controlo total de cada uma das fases dentro de um mesmo aparafusamento, o que permite criar um programa destinado para cada tipo de aparafusamento necessário a realizar. A versatilidade deste programa permite evitar falhas maiores no aparafusamento aumentando assim a qualidade e segurança do mesmo (Bosch Rexroth, 2018b).

Este tipo de métodos é utilizado em aparafusadoras industriais que são concebidas para fazer todo o tipo de aparafusamentos numa linha de montagem se a sua gama de binário estiver de acordo com o binário necessário a induzir num aperto que seja preciso realizar. Este tipo de métodos permite também reduzir ao número de aparafusadoras usadas numa linha de montagem, porque como já foi dito, estas aparafusadoras permitem criar métodos de aparafusamento especiais para cada tipo de parafuso.

Estas sequências são criadas livremente, através de programas especializados das empresas que produzem as ferramentas. Todas as etapas do aparafusamento estão conectadas de forma a parecer um único aparafusamento. Também os critérios de supervisão são completamente versáteis podendo utilizar-se diferentes critérios em diferentes etapas.

2.7.5 Exemplos de Aplicação

Como já foi dito em 2.7.4, o aparafusamento por etapas permite fazer inúmeros aparafusamentos que normalmente têm em conta o material utilizado, a superfície onde são realizados, os apertos e a forma como os apertos devem ser realizados em cada aparafusamento específico. Este método pode ser utilizado para processos de aperto como parafusos autorroscantes, porcas ou então para reconhecer defeitos nas roscas, diminuir assentamentos ou para controlo de profundidade (Bosch Rexroth España, 2016). A figura 28 exibida a seguir, representa as etapas de aperto de um parafuso autorroscante.

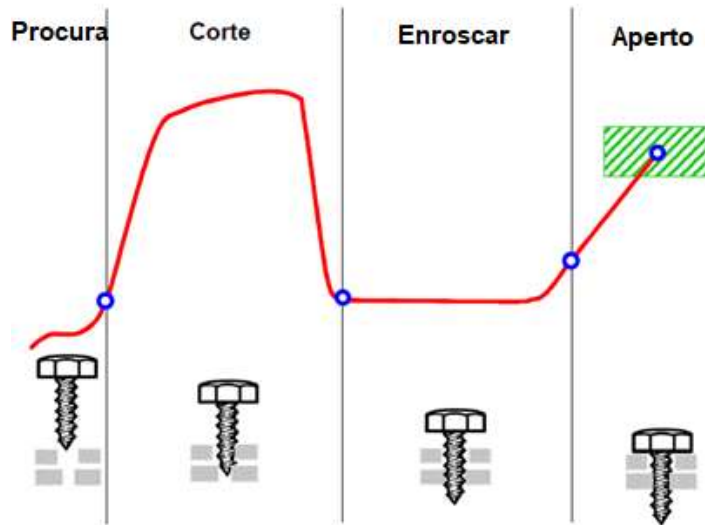


Figura 28 - Etapas de aparafusamento de um parafuso autorroscante (Bosch Rexroth España, 2016)

Através da figura 28, analisamos que o processo de aperto deste parafuso autorroscante é composto por quatro fases, sendo que a primeira fase começa com um desaperto do parafuso de forma a colocá-lo no furo pronto para fazer o aparafusamento, fase esta que é controlada pelo binário. Depois de colocado o parafuso no local, passamos à parte do corte onde é realizado um aperto com controlo de ângulo, em que se pretende vencer o atrito que está a ser colocado pela superfície onde o parafuso está a ser inserido. Seguidamente, e depois de vencido o atrito provocado pelas superfícies que não têm rosca, é feito um aparafusamento controlado por binário, de forma a apertar o parafuso na superfície. Por último é realizado o aperto final de forma controlada por binário e supervisionado por ângulo de forma a não atingir a zona plástica do parafuso.

Por outro lado, o controlo da profundidade de um aparafusamento também pode ser feito através deste sistema versátil como é verificado através da figura 29.

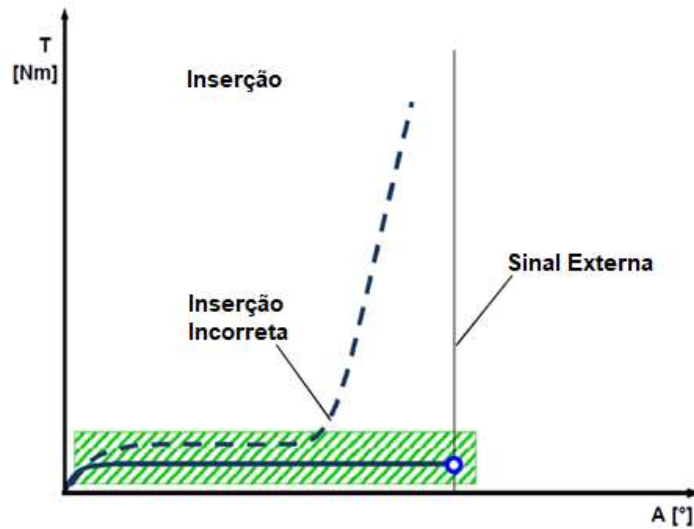


Figura 29 - Aparafusamento com controlo de profundidade (Bosch Rexroth España, 2016)

Esta figura 29, é também um excelente exemplo para justificar o uso de tipos de controlo diferentes. Com a figura, é possível constatar que é dado como objetivo fazer um aperto com um número de voltas suficiente para atingir o ponto azul, mas esse número de voltas tem de ser realizado a muito baixo binário para não romper, por exemplo, a superfície onde está a ser colocado o parafuso ou para controlar a profundidade a que ficou o aperto para fazer outros apertos iguais com a mesma profundidade (Bosch Rexroth España, 2016).

Como já foi dito acima, estes tipos de etapas também permitem verificar defeitos em roscas como se pode constatar através da figura 30.

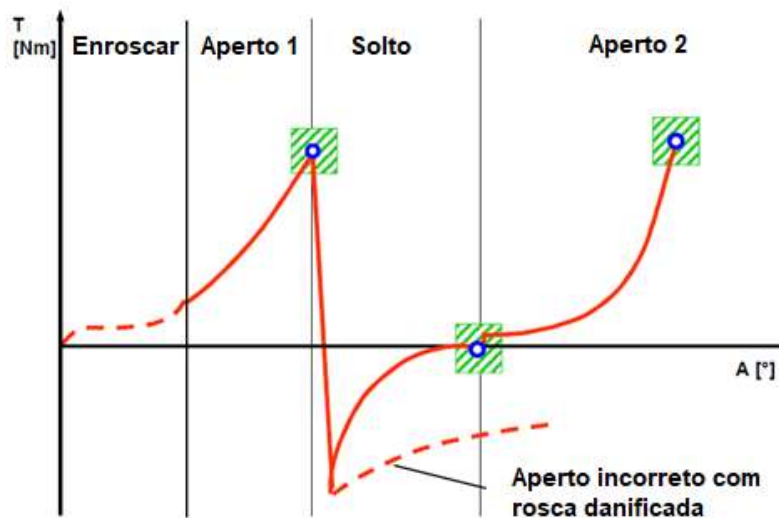


Figura 30 - Reconhecimento de defeitos na rosca (Bosch Rexroth España, 2016)

Atendendo à figura 30, verificamos que o aparafusamento por vezes é necessário ser feito mais do que uma vez para que o parafuso forme uma ligação de maior qualidade, no entanto, esse tipo de ações também permitem verificar outro tipo de falhas, como falhas na rosca depois de um desaperto, como se pode verificar pela fase 3 através da linha tracejada. Este aparafusamento é realizado através do controlo do binário no primeiro aparafusamento, seguido de um desaperto por controlo de ângulo que é supervisionado por binário e por último o aperto final que pode ser realizado por intermédio de qualquer método de controlo.

Este tipo de aperto normalmente é realizado quando estamos na presença de materiais rugosos e com baixa qualidade.

Existem também outro tipo de apertos que podem ser realizados, nomeadamente o aperto através do bloqueio com porcas que permite fixar as duas contra-peças de uma maneira segura. Na figura 31, é possível comprovar a forma como o aperto deve ser realizado no caso das porcas de travamento automático.

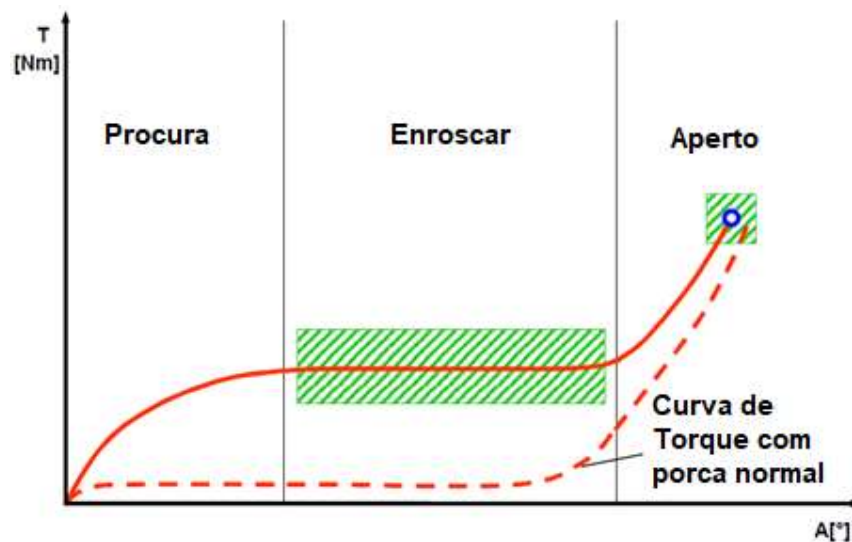


Figura 31 - Aparafusamento de porcas (Bosch Rexroth España, 2016)

Consultando a informação apresentada na figura 31, esta aplicação demonstra o aperto realizado para o aparafusamento de porcas de bloqueio que no caso da fase 2 precisam de fazer um controlo por ângulo, não aumentando o binário, que posteriormente é utilizado para realizar o aperto final necessário.

Existem também outro tipo de aplicações como a diminuição dos assentamentos melhorando qualidade do aparafusamento, como pode ser verificado através da figura 32 apresentada a seguir.

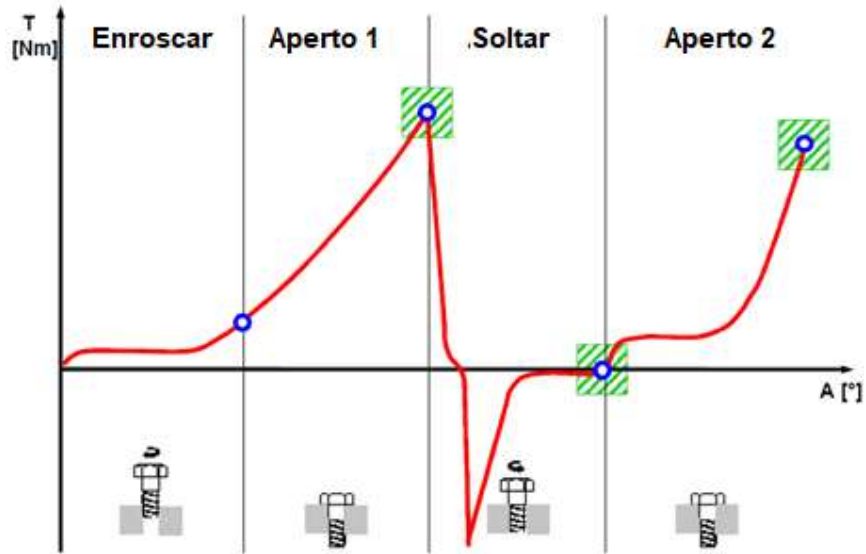


Figura 32 - Aparafusamento com diminuição de assentamentos (Bosch Rexroth España, 2016)

Este tipo de aparafusamentos como o apresentado na figura 32, normalmente são aparafusamentos que devem ser utilizados para parafusos revestidos de plástico ou cera.

2.7.6 Possíveis causas de erros durante o processo de aparafusamento

A indústria automóvel normalmente analisa e ajusta os aparafusamentos que pretende realizar, tendo em conta as curvas apresentadas por cada aparafusamento. Existem gráficos que permitem fazer uma análise cuidada sobre o aparafusamento e que demonstram que um aparafusamento mal realizado pode ter acontecido por diversas razões, o que permite fazer um despiste mais rápido e eficaz.

Normalmente, as empresas fazem um trabalho cuidado de forma a perceber como devem melhorar o seu próprio aparafusamento e as possíveis causas apresentadas no gráfico da figura 33, são usadas como causas de rastreamento rápido, que depois podem ter outros fatores relacionados que devem ser explorados.

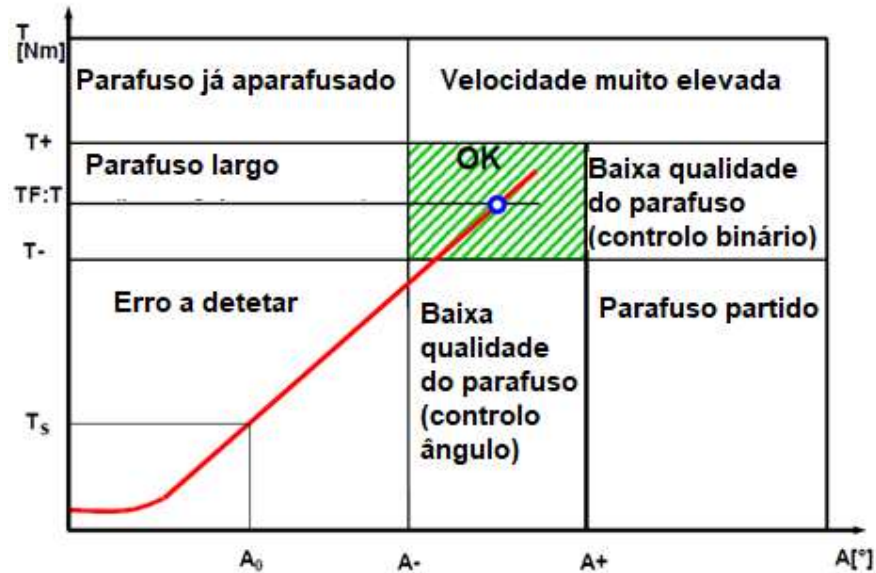


Figura 33 - Possíveis erros relacionados com o Aparafusamento (Bosch Rexroth España, 2016)

Por vezes, existem erros no aperto que estão relacionados com fatores que intervêm de forma indireta no processo, como o fenómeno do *Stick-Slip*. Este fenómeno pode surgir durante o aparafusamento de um parafuso com junta dificultando a linearização da força de aperto a realizar (Baramsky et al., 2018).

O stick-slip pode ser considerado um fenómeno de variação que surge no contacto entre dois corpos que sejam superfícies rugosas ou pintadas, sistemas de perfuração de petróleo e sistemas de travagem.

Este evento pode ser dividido em duas fases principais: o *stick* e o *slip*. A fase *stick* está relacionada com a velocidade relativa entre corpos que se mantém baixa ou nula e o atrito estático continua a reger o sistema, momento em que é aumentada a força de aperto que acaba por vencer a barreira criada pelo atrito estático entrando na fase *slip* (Fernandes, 2018). Este fenómeno encontra-se explicado na figura 34.

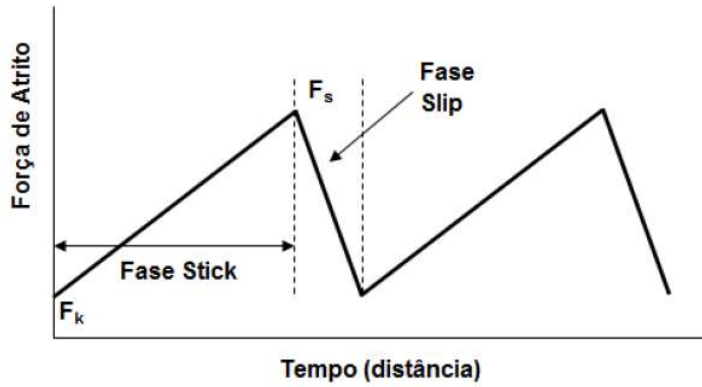


Figura 34 - Fenómeno Stick-Slip (Fernandes, 2018)

No seguimento desta explicação será apresentada uma figura com a curva relativa à instabilidade de valores provocada pelo fenómeno *stick-slip*. É possível verificar através da figura 35 que a curva simbolizada pela linha vermelha é sujeita a uma instabilidade, sendo que o aumento de binário não vai aumento de forma proporcional com o aumento do ângulo.

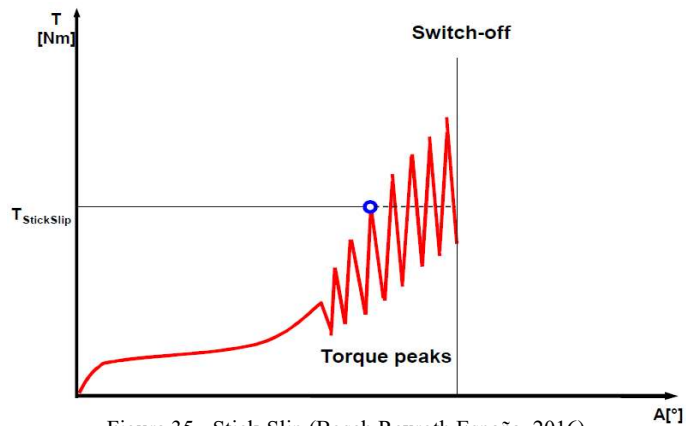


Figura 35 - Stick-Slip (Bosch Rexroth España, 2016)

2.8 Aparafusamento Elétrico Industrial

Atualmente, diversas indústrias apresentam equipamentos de aparafusamento para a realização de diferentes tipos de trabalhos de ligação. As aparafusadoras assumem assim, um papel preponderante na produção de diferentes produtos. A diversidade na realização de diferentes tarefas permite que haja uma grande variedade de aparafusadoras diferentes, tendo em conta a geometria, dimensão e acessibilidade.

Em virtude da grande quantidade de aparafusadoras existentes no mercado, é mais fácil entender a utilidade de cada uma dividindo-as em dois grandes grupos, como se pode verificar através da figura 36.

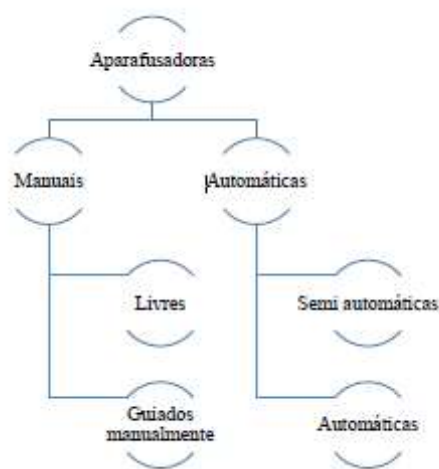


Figura 36 - Tipos de aparafusadoras (Gaspar, 2017)

Nos próximos subtópicos, será abordado cada tipo de aparafusadora de forma individual.

2.8.1 Aparafusamento Manual

2.8.1.1 Livres

As aparafusadoras livres são máquinas compactas e as mais simples do mercado, mas de igual forma competentes no processo industrial. Estas ferramentas são de fácil instalação em infraestruturas e de grande fiabilidade em processos de aperto em pontos

de difícil acesso (Gaspar, 2017). Isto, significa que são extremamente flexíveis e permitem ao operador utilizá-las da forma que for necessária. Inclusive, se não prejudicar o processo produtivo, estas aparafusadoras podem ser usadas para vários tipos de apertos na produção numa mesma linha de montagem. A figura 37 demonstra duas aparafusadoras livres produzidas pela *Bosch Rexroth*.



Figura 37 - Aparafusadora ErgoSpin à esquerda e Nexo à direita (Bosch Rexroth, 2018a)

Através da figura 37, verificamos que estes equipamentos devem ser utilizados em linhas de produção para processos de difícil aparafusamento, ou seja, de complicado acesso. Por outro lado, não devem ser usadas quando há uma cadência muito elevada como em alguns processos produtivos. A capacidade é diminuída devido à necessidade de presença do operador (Bosch Rexroth, 2018a).

2.8.1.2 Guiadas Manualmente

Esta aparafusadora, quando comparada com a anterior, apresenta menor flexibilidade devido a ser uma ferramenta que se encontra fixa à espera do sinal de aperto, que é dado pelo operador. Normalmente, é utilizada em locais onde não é possível a colocação de um sistema completamente autónomo. No entanto, confere uma grande rapidez e precisão na realização de apertos bem-sucedidos. As aparafusadoras mostradas anteriormente também são capazes de realizar este tipo de trabalho, no entanto, não foi

para serem usadas desta forma que foram concebidas. Através da figura 38, é possível verificar a maneira como são colocadas este tipo de aparafusadoras (Gaspar, 2017).



Figura 38 - Aparafusadora guiada manualmente (Bosch Rexroth, 2018a)

Com a figura 38, podemos verificar que neste tipo de aparafusadoras não há o risco de fadiga associada ao aparafusamento porque estas máquinas encontram-se fixas. Estas máquinas permitem o aparafusamento simultâneo de vários parafusos, o que também constitui uma vantagem quando nos referimos à cadência de produção (Gaspar, 2017).

2.8.2 Aparafusamento Automático

2.8.2.1 Semi-Automáticas

O sistema semi-automático é mais usado do que o guiado manualmente, pois atualmente, a maior parte dos sistemas de aparafusamento possuem controlador de forma a permitir o aperto com um nível de automação superior. Por outro lado, este sistema automático pode ser ativo por um operador através da utilização de entradas e saídas para a realização do aparafusamento, ou então, de forma completamente automática precisando apenas de um PLC para conseguir realizar o aperto (Bosch Rexroth, 2018). A figura 39 apresenta um sistema semi-automático.

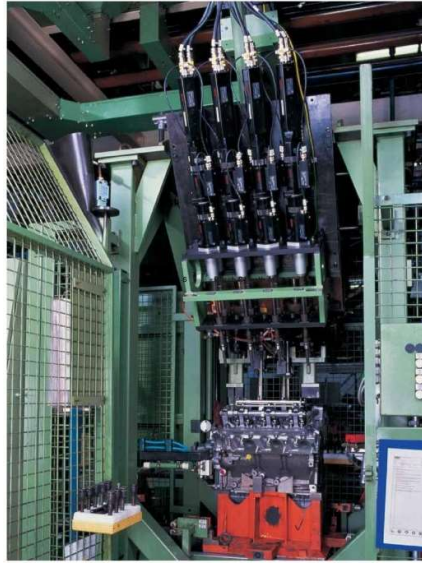


Figura 39 – Aparafusadora semi-automática (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.2.2 Automática

Estes são os sistemas com maior nível de automação e permitem realizar a operação de aparafusamento sem a existência de intervenção humana (Gaspar, 2017). Neste tipo de sistemas, as aparafusadoras são usualmente colocadas em robôs com alimentação automática de parafusos, como se pode visualizar através da figura 40.



Figura 40 - Aparafusamento Automático (Bosch Rexroth, 2018a)

São sistemas indicados para um grande volume de produção e para tornar a operação extremamente rápida, dito isto, apresentam-se como a solução mais

dispendiosa, sendo também a mais complexa, logo, é necessário um esforço acrescido de programação e exige que haja operários mais especializados (Gaspar, 2017).

2.8.3 Características Principais das Aparafusadoras

Todas as aparafusadoras apresentadas anteriormente possuem características em comum e algumas podem ser construídas de acordo com as necessidades do cliente.

As aparafusadoras são usualmente constituídas por controlador, motor, transdutor e ponteira, no entanto, cada um destes componentes pode ser dimensionado de acordo com o tipo de trabalho que a ferramenta vai ter de realizar. Estes tipos de ferramentas são extremamente versáteis devido ao elevado número de diferentes aplicações destas máquinas.

Através da figura 41, é possível verificar a existência de vários tipos de ponteiras, a possível redundância ou não dos transdutores, o tipo de redutora associada ao motor *brushless* e o próprio motor, além de todos os adaptadores necessários para conectar todos os componentes entre si (Bosch Rexroth, 2018a).

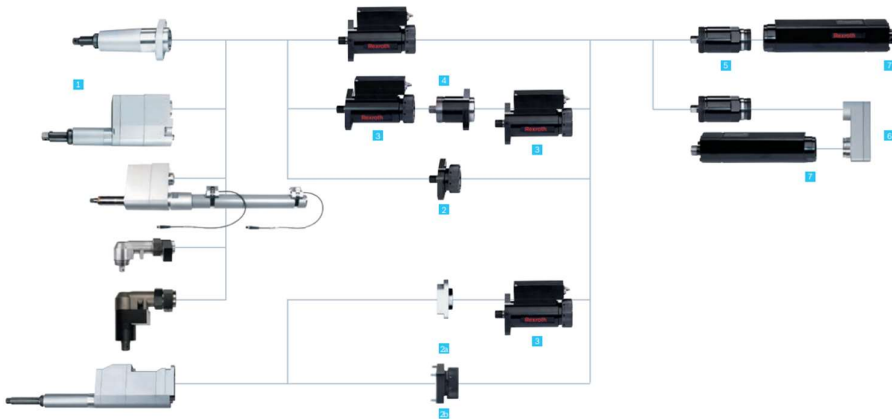


Figura 41 - Diferentes montagens associadas a uma mesma aparafusadora (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.3.1 Ponteiras

As ponteiras são componentes fundamentais na construção de aparafusadoras devido à sua interação direta com o parafuso. No entanto, estes acessórios têm disponíveis diferentes unidades de saída, de forma a que cada uma delas seja utilizada no tipo de aplicação adequada. Em seguida, serão apresentados os diferentes tipos de ponteiras que são usualmente utilizados nas aparafusadoras.

Ponteira reta

Esta unidade é geralmente utilizada em aplicações de fácil acesso e que permitam um aperto feito de forma reta. Estas ponteiras utilizam um eixo estriado com mola que permite guiar a ferramenta pelo comprimento do engate sem ter de guiar todo o eixo de aperto, permitindo a este tipo de máquinas um rendimento elevado, o que é possível verificar através da figura 42 (Bosch Rexroth, 2018a).



Figura 42 - Ponteira Reta (Bosch Rexroth, 2018a)

Ponteira suplementar estreita

A ponteira suplementar estreita é conhecida por ser uma unidade de fácil montagem e que é utilizada para aperto em sítios onde haja uma perfuração estreita, que seja de difícil acesso para outras ponteiras de aparafusamento (Bosch Rexroth, 2018a). É possível perceber o tipo de ponteira através da figura 43.



Figura 43 - Ponteira Suplementar Estreita (Bosch Rexroth, 2018a)

Esta unidade pode apresentar um transdutor de medição integrado, de modo a aumentar a confiabilidade do sistema de aperto em processos deslocados em zonas de difícil acesso. Este tipo de apertos normalmente é utilizado para montar as tampas dos rolamentos do motor. Com qualquer adaptador, torna-se também possível adicionar mais transdutores no sistema desta aparafusadora, no entanto, com possibilidade de objetivos bem diferentes. Os transdutores podem ser utilizados de forma estratégica para uma emergência no caso de um dos transdutores falhar, por exemplo. Por outro lado, e como já foi dito anteriormente, existe também a possibilidade de fazer uma medição redundante utilizando os dois transdutores. A unidade de saída deve ser levada em consideração quando se proceder à comparação dos valores medidos pelos transdutores de medição (Bosch Rexroth, 2018a). A figura 44 apresenta a ponteira com o transdutor incorporado.



Figura 44 - Ponteira estreita com transdutor (Bosch Rexroth, 2018a)

Ponteira angular

A ponteira angular é extremamente importante, pois permite um aparafusamento ligeiramente diferente quando não existe a possibilidade de um posicionamento perpendicular relativamente à superfície de aperto. Por outro lado, estas cabeças devem ser auxiliadas por uma ponteira reta de forma a aumentar a qualidade dos apertos (Bosch Rexroth, 2018a). Prontamente, é possível mostrar a ponteira angular através da figura 45.



Figura 45 - Ponteira Angular (Bosch Rexroth, 2018a)

Ponteira com alimentação

Esta ponteira é utilizada com alimentadores automáticos de parafusos devido ao cilindro pneumático colocado com dois sensores que permite a movimentação para cima quando é necessária a alimentação do parafuso e o movimento para baixo quando é necessário realizar o aperto, como se pode verificar através da figura 46 (Bosch Rexroth, 2018a).



Figura 46 - Ponteira com Alimentação (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.3.2 Motor

O motor utilizado nas aparafusadoras elétricas industriais é um motor DC *brushless* que se distingue, como o seu nome diz, por não necessitar de escovas diminuindo assim exponencialmente as avarias em relação ao desgaste. Este motor apresenta densidade de desempenho, elevada eficiência energética e garante tempos de aparafusamento curtos com uma grande dinâmica associada (Bosch Rexroth, 2014a).

Este motor sem escovas tem uma estrutura parecida com os motores DC convencionais, no entanto, não apresenta enrolamento na armadura e o sistema coletor/escovas. Os enrolamentos do estator são alimentados por fonte exterior. No rotor do motor são colocados ímanes permanentes (Melo, 2019).

O motor *BLDC* tem dois aspetos que são essenciais para entender o seu funcionamento, sendo eles (Melo, 2019):

- O coletor/escovas é substituído por um sistema eletrónico que faz a comutação das correntes induzidas no estator, tendo em conta a posição do campo magnético rotórico. Usualmente são utilizados três sensores de efeito de Hall para este fim;
- A distribuição espacial do campo magnético do rotor no entreferro é do tipo trapezoidal.

Através da figura 47, podemos ver o motor *brushless* utilizado nas aparafusadoras.



Figura 47 - Motor DC Brushless (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.3.3 Redutor

Os redutores são um elemento mecânico que pode ser instalado de duas formas diferentes, sendo elas a engrenagem planetária e a transmissão de desvio, que é também a engrenagem planetária, mas colocada de forma a reduzir o comprimento da aparafusadora. A figura 48 apresenta a engrenagem planetária e o adaptador para a transmissão de desvio que podem ser utilizados (Bosch Rexroth, 2018a).



Figura 48 - Engrenagem Planetária e Adaptador Transmissão (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.3.4 Transdutor

Os transdutores são aplicados de forma a determinarem o ângulo de giro, o binário, o gradiente e transmitem os dados digitalmente para o comando. Como já foi dito, os sistemas de aparafusamento apresentam elevada qualidade e precisão devido à precisão dos transdutores, que quando utilizados de forma redundante tornam estes sistemas extremamente fiáveis. A redundância é feita através da comparação dos resultados medidos pelos dois transdutores. Por outro lado, estes equipamentos também são usados com o objetivo de suportar em caso de falha do outro (Bosch Rexroth, 2014a).

Estes equipamentos colocados nas aparafusadoras têm um contador de ciclo integrado e os dados que são medidos são imediatamente encaminhados para o controlador da ferramenta permitindo, posteriormente, a análise minuciosa devido ao envio completo de toda a informação necessária para proceder a uma análise correta. A figura 49 mostra o transdutor.



Figura 49 – Transdutor (Bosch Rexroth, 2018a)

2.8.3.5 Controlador

O controlador é o único elemento das aparafusadoras que usualmente não se encontra no corpo da ferramenta. Os sistemas compactos são dotados de grande capacidade de memória para guardar dados de aperto. Por outro lado, é possível colocar um controlador compacto em comunicação com todo um sistema, mas neste caso, este equipamento apenas pode alocar uma aparafusadora (Bosch Rexroth, 2013). Na figura 50 é apresentado um sistema compacto.



Figura 50 - Sistema compacto (Bosch Rexroth, 2018a)

Existe também controladores modulares que são usualmente utilizados quando se necessita de um grupo de aparafusadoras. Possuem vários canais, permitindo controlar várias máquinas em simultâneo como se pode verificar através da figura 51.



Figura 51 - Sistema Modular (Bosch Rexroth, 2018a)

2.9 Caraterísticas da aparafusadora NEXO

2.9.1 Bateria

A caraterística principal que distingue as aparafusadoras de segurança crítica é que esta utiliza uma bateria que está previamente projetada segundo a categoria A da VDI 2862 já referida. A aparafusadora NEXO apresenta duas baterias recarregáveis.

As baterias utilizadas na máquina são de iões de lítio permitindo assim ter uma tensão de célula mais elevada, diminuindo a quantidade de células necessárias para uma bateria com tensão elevada. Por outro lado, quando comparadas com as baterias de níquel-cádmio, são precisas menos células nas baterias de iões de lítio (Bosch Rexroth, 2017).

O efeito de memória nas baterias é outro ponto extremamente importante, no entanto, as baterias de iões de lítio não são danificadas dependendo do seu estado de carregamento quando comparadas com as de NiCd que na existência de descargas parciais frequentes, forma-se uma parte cristalina que impede um melhor funcionamento destas baterias (Bosch Rexroth, 2017).

Também, o lítio é uma matéria muito mais leve permitindo a construção de dispositivos mais leves. Por outro lado, a capacidade de reação muito elevada do lítio leva à utilização de areia ou sal em caso de incêndio, daí as baterias serem consideradas como

matérias perigosas, sendo assim imprescindível cumprir determinadas medidas de segurança, quando é preciso realizar um transporte (Bosch Rexroth, 2017).

Na figura 52, é possível ver um conjunto de bateria deslizante utilizado na máquina de aparafusamento.

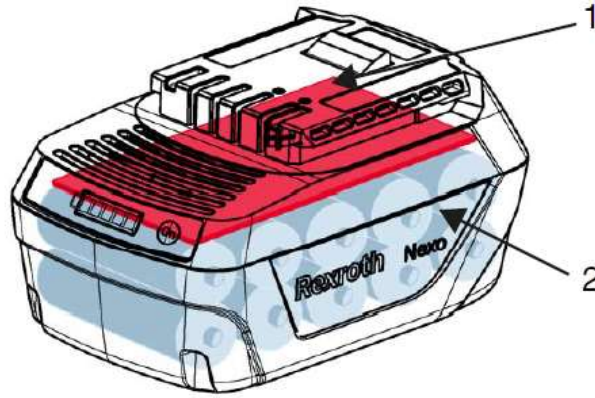


Figura 52 – Bateria da aparafusadora NEXO (Bosch Rexroth, 2017)

Analisando a figura 52, estão assinaladas as partes mais importantes da bateria. Primeiramente, identificado com o número 1 temos o sistema eletrónico de gestão da bateria que é essencialmente usado para funções de proteção, monitorização de células individuais, proteção contra curto-circuito e comunicação inteligente permitindo ver por exemplo, a capacidade da bateria, a temperatura ou o estado de carregamento. Este estado de carregamento é possível ver através de um botão *on* que se encontra na própria bateria. Por outro lado, quando existe um carregamento irregular, o *balancing* das células permite comparar a tensão das células ligadas em série, seguindo-se a regulação retirando uma pequena corrente à célula que apresentar uma tensão maior. O conjunto de baterias em série utilizado na bateria deslizante da NEXO encontra-se mencionado na figura 52 através do número 2. Seguidamente, é exibida a ligação em série das células através da figura 53.

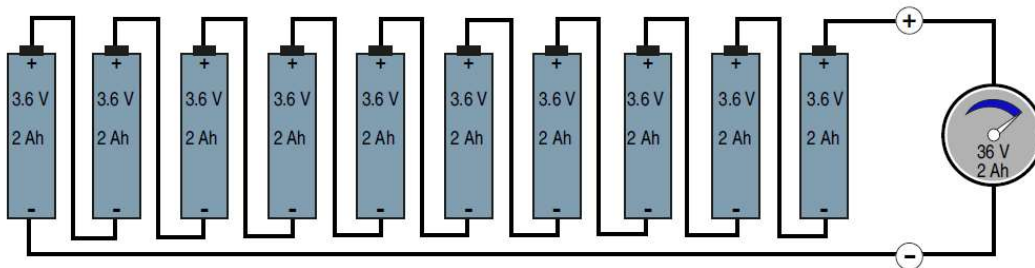


Figura 53 - Bateria de íões de lítio (Bosch Rexroth, 2017)

Através da figura 53 podemos verificar a existência de 36 volts de tensão da bateria dividido por 10 células com 2 amperes-hora de capacidade em cada uma. Por outro lado, este conjunto de bateria deslizante permite a troca de bateria durante a realização de aparafusamento, devido à capacidade de se manter ligada durante 20 segundos desde que é retirada uma bateria. Isto deve-se à existência de um condensador que permite armazenar energia que é utilizada quando a bateria é desligada, iniciando-se o descarregamento gradual que tem a duração já referida atrás (Bosch Rexroth, 2017).

Por outro lado, a bateria necessita de ser recarregada e para isso é necessário utilizar o carregador *Rexroth* apresentado na figura 54.



Figura 54 - Carregador (Bosch Rexroth, 2017)

De acordo com a figura 54, podemos verificar a existência de uma ranhura onde são colocadas as baterias de íões de lítio para carregamento. O carregamento da bateria é normalmente realizado através do processo CC/CV. Este processo encontra-se dividido em duas zonas de carga (Marcelino, 2013):

- Corrente constante, corrente aplicada inicialmente no processo e que é dada pela corrente nominal da própria bateria. A corrente mantém-se constante até ser atingida a tensão de carga final;
- Tensão constante, processo que se inicia na parte final do carregamento quando é atingida a tensão máxima e que é feito até se atingir o limite da bateria. Quando a corrente desce abaixo de $0.1C$, a bateria está carregada.

A figura 55 demonstra todo o processo através de um gráfico corrente/tensão-tempo.

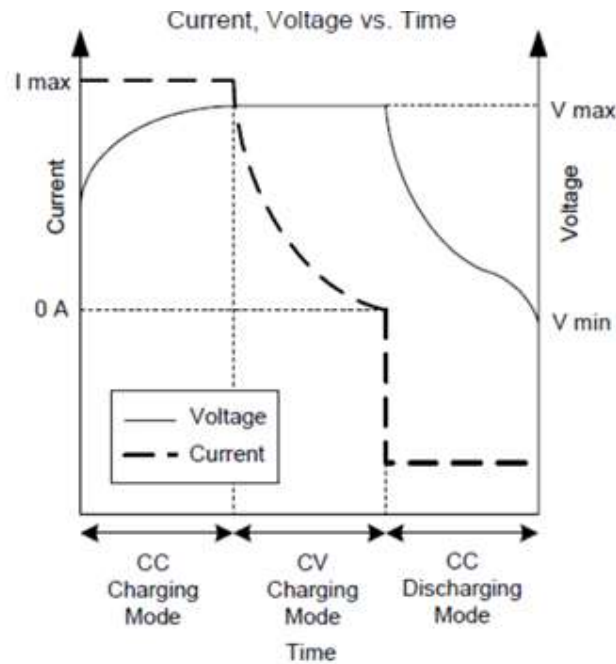


Figura 55 - Processo de Carregamento da Bateria de Iões de Lítio (Marcelino, 2013)

2.9.2 Acessórios

A aparafusadora NEXO apresenta inúmeros acessórios que podem ser utilizados para melhorar a performance da máquina no aperto. Usualmente, muitos destes acessórios existem para haver uma integração simples em infraestruturas já existentes ou para a realização de apertos em condições de difícil acesso ou especiais. A figura 56 expõe todos os acessórios que existem disponíveis.



Figura 56 - Acessórios para Bosch Rexroth Nexco (Bosch Rexroth España, 2019)

Através da figura 56, é possível verificar a existência de proteções para cabeça angular e proteções para montagem de baterias. Existem também acessórios de montagem que permitem colocar a aparafusadora numa estrutura fixa. Da mesma forma, é possível verificar os tipos de anéis de suspensão e suportes de braço existentes para segurar a máquina. Por último, existe um adaptador de programação, o cartão Micro SD e as argolas de cor que permitem distinguir as máquinas, sendo um acessório meramente estético.

2.9.3 WLAN

A WLAN são redes locais sem fios que permitem a interação de diversos dispositivos que se encontrem igualmente na mesma rede. Tendo em conta que, as aparafusadoras utilizadas são sem fios, é necessário existir um ponto de acesso para ser possível transmitir dados entre uma aparafusadora e um servidor de forma rápida e simples. As máquinas de aparafusamento utilizadas são usualmente projetadas para funcionar no modo infraestrutura, ou seja, é necessária a existência de um ponto de acesso que permita a comunicação de forma indireta entre dois dispositivos. Desta forma, será apresentada a figura 57 onde está exemplificado os dois tipos de ligação mais usuais (Bosch Rexroth, 2013).

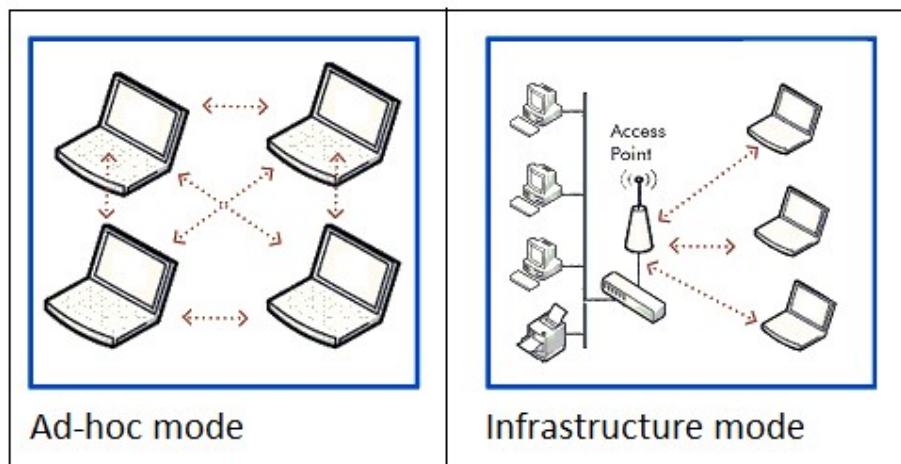


Figura 57 - Modo Adhoc vs Modo Infraestrutura (Shah, n.d.)

Com a figura 57, podemos então verificar que em modo *Ad-Hoc* todos os dispositivos conseguem comunicar entre si, em quanto que no modo infraestrutura a comunicação é feita de forma indireta através de um ponto de acesso.

Depois de existir um ponto de acesso, é necessário colocar este ponto em rede com a aparafusadora através da opção WLAN. Quando ligado, o ponto de acesso tem uma rede própria onde ficará automaticamente conectada a máquina depois de ser previamente configurada. Posto isto, é finalmente possível estabelecer a ligação entre a aparafusadora e o computador, ligando-o ao mesmo ponto de acesso que está ligada a máquina e colocando um IP estático que permita encontrar a máquina dentro da sua rede (Atlas Copco, n.d.-b).

Está também claro que, a utilização exagerada de um mesmo ponto de acesso para transmitir dados provocará uma diminuição na velocidade de transferência, apesar de ser possível utilizar até 8 aparafusadoras num mesmo ponto de acesso. Por outro lado, a flexibilidade das aparafusadoras industriais atuais permite a utilização dos mais variados pontos de acesso (Bosch Rexroth, 2017).

Como já foi referido anteriormente, a transmissão de dados por parte das aparafusadoras é muito importante para aferir de forma minuciosa a necessidade de retrabalho de uma peça ou para evitar ao máximo o erro humano, que possa existir na produção e que posteriormente ponha em risco os utilizadores desses produtos com defeitos de fabrico, causando por vezes, acidentes gravíssimos no caso da indústria automóvel.

2.9.4 Controlo e memória de resultados

A memória de resultados é um dos processos mais importantes de um aparafusamento, visto que permite-nos consultar todos os dados referentes a um aperto que tenha sido realizado. Estes resultados são utilizados para variadíssimos efeitos, entre os quais, a qualidade do aperto ou a despistagem constante de erros. Os resultados guardados proporciona-nos a capacidade de perceber qual a peça que saiu com defeito e que deve ser retrabalhada (Bosch Rexroth, 2017).

Usualmente, a máquina, mais concretamente, a *Bosch Rexroth Nexo* apresenta duas formas de salvar os dados, nomeadamente, o cartão micro SD que se encontra na aparafusadora, onde é criado um ficheiro de dados com a extensão *.json (Bosch Rexroth, 2017). Na figura 58 é possível verificar que a transmissão de dados pode ser feita sem ter

qualquer ponto de acesso, mas é um processo pouco utilizado, pois os dados para serem tratados têm de ser colocados manualmente, o que por si só constitui uma grande perda de tempo.

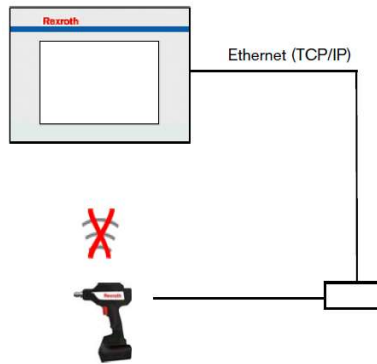


Figura 58 - Transferência de Resultados sem WLAN (Bosch Rexroth, 2017)

Na figura 58 é possível verificar a possibilidade de ligação de uma aparafusadora industrial a um computador ou base de dados pela utilização de um adaptador, que é ligado diretamente à máquina. Por outro lado, é também possível ler dados guardados no cartão microSD através dos convencionais leitores de cartões.

No entanto, é praticável também transmitir esses dados através de um ponto de acesso, como já tinha sido dito. Quando falamos em transmissão sem fios, existem quatro maneiras de transferir dados, designadamente (Bosch Rexroth, 2017):

- Servidor *FTP* – protocolo de transferência de dados, onde os dados são enviados para o servidor pretendido. Por exemplo, é possível ter um servidor FTP em qualquer computador que recebe todos os dados enviados pela aparafusadora;
- *HTTP* – protocolo de comunicação, que permite a transferência de dados de forma mais segura por causa do encriptamento;
- *FileShare* – protocolo que permite o acesso a arquivos de uma rede;
- *Rexroth Open Protocol* – protocolo especial para comandos de aparafusamento, mas que também permite o envio de dados.

A figura 59 apresenta a base de todos os protocolos acima descritos.

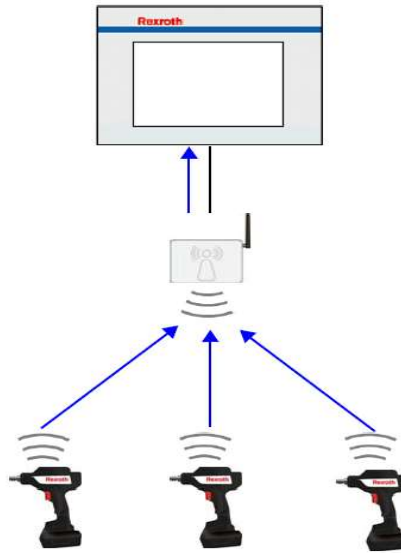


Figura 59 - Transferência de Resultados WLAN (Bosch Rexroth, 2017)

A figura 59 mostra a ligação já anteriormente mencionada entre um PC industrial, computador ou base de dados e a máquina através do ponto de acesso. Por outro lado, o *Rexroth Open Protocol* é único dos protocolos anteriormente mencionados que permite o controlo da máquina de aperto.

2.9.5 Controlador

O controlador da aparafusadora NEXO constitui uma das grandes vantagens desta máquina em relação às concorrentes devido à integração do próprio controlador no interior da máquina proporcionando muitas vantagens, entre as quais (Bosch Rexroth España, 2019):

- Versatilidade e liberdade de aparafusamento da ferramenta, pois tendo o controlador a bordo, não necessita de mais nada para poder realizar um aparafusamento, permitindo assim o aperto em sítios de difícil acesso;
- Impacto mínimo provocado no tráfego de WIFI, porque apenas utiliza as redes sem fios para proceder à transmissão de dados;
- Possibilidade de trabalhar em zonas onde se perca a ligação entre a aparafusadora e a rede de transferência de dados, à qual a máquina

pertença. Em caso disto acontecer, assim que seja restabelecida a comunicação, a aparafusadora envia os dados de todos os aparafusamentos que foram realizados durante a falha de comunicação, não se perdendo assim, qualquer dado de aperto;

- Precisão das máquinas, quando comparadas com as pneumáticas;
- Possibilidade de criação de programas de aperto, de acordo com aquilo que o cliente pretende, sendo possível adicionar inúmeras etapas a um aparafusamento e colocar diferentes parâmetros de velocidade, binário, ângulo, etc.
- Aperfeiçoamento da rastreabilidade de dados, permitindo aferir de forma pormenorizada a qualidade de um aparafusamento;
- Possibilidade de comunicação com computadores e PLC's.

O controlador da NEXO constitui uma grande vantagem para todos os clientes que queiram adquirir a máquina devido a esta ser a única máquina do mercado que tem o controlador integrado, o que permite monitorizar e enviar resultados sem necessidade de qualquer fio (Bosch Rexroth España, 2019). Por outro lado, as outras aparafusadoras têm um grave problema no caso de se encontrarem longe do ponto de acesso, as máquinas não permitem realizar mais alterações no controlador, como por exemplo a mudança de programa, pois perdem a comunicação com o ponto de acesso e perdem também a comunicação com o controlador, impossibilitando assim tanto a transferência de dados como a comunicação com o controlador (Bosch Rexroth, 2017). Na figura 60 é possível ver quais os elementos necessários para a realização de aparafusamento na *NEXO* e na *ATLAS Copco Tensor STB*.



Figura 60 - Bosch Rexroth Nexo à esquerda (Bosch Rexroth, 2018a) e Atlas Copco STB à direita (Atlas Copco, n.d.-b)

Com a figura 60, podemos verificar a grande diferença entre as aparafusadoras da *Bosch* e as máquinas pertencentes a outros concorrentes de mercado. No caso da *Nexo*, é possível confirmar que apenas necessita de um ponto de acesso para a transferência de dados. Por outro lado, a máquina da *Atlas Copco* necessita do controlador que comunica com a aparafusadora via rádio e também de um ponto de acesso que permita o envio de dados. Podemos então concluir que durante cada ciclo, o controlador integrado monitoriza todo o processo e transmite os resultados através de uma conexão *wireless* recetora.

2.9.6 Sistema operacional NEXO-OS

A *Bosch Rexroth* foi pioneira no mercado, na perspetiva em que decidiu colocar um controlador dentro da própria aparafusadora de forma a conseguir utiliza-la sem qualquer restrição ao nível do controlo.

O controlador permite aos seus utilizadores fazerem a programação através do sistema operacional da máquina chamado NEXO-OS, software completamente gratuito e que é possível aceder através da colocação do *IP* da aparafusadora no navegador *web*. Assim como na memória de resultados é possível aceder a estes sem ponto de acesso, no caso da configuração e programação da aparafusadora também existem duas formas de conseguir programar a mesma, ou usando um ponto de acesso onde é necessário ligar-se a ele previamente para ter acesso à parte de comando da máquina ou utilizar o mesmo

adaptador que permite a transferência de dados para conseguir aceder a esta (Bosch Rexroth, 2017).

Posteriormente, será exibida a figura 61 que está relacionada com os menus apresentados pelo sistema NEXO-OS. A grande vantagem deste sistema é que ele é simples e fácil de trabalhar, permitindo ao cliente utiliza-lo da forma que mais lhe convém.

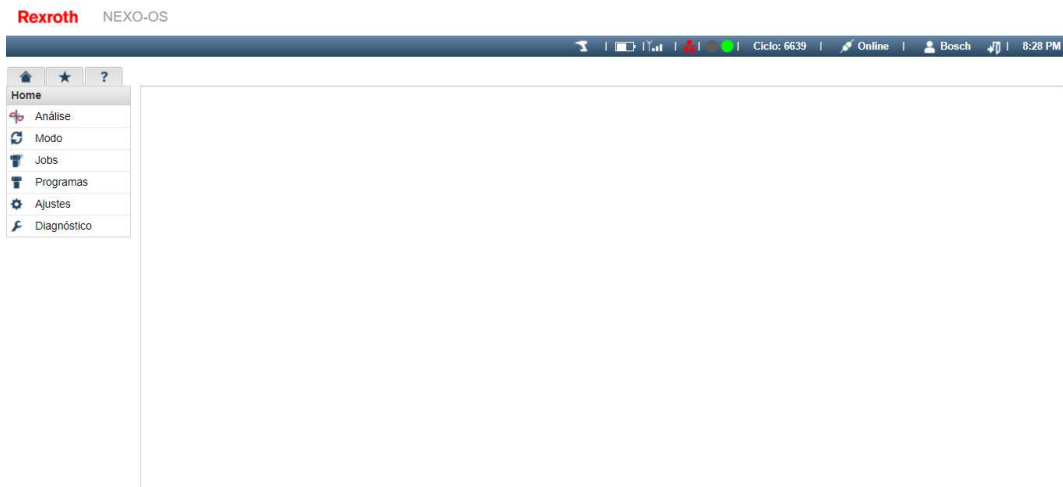


Figura 61 - Menu NEXO-OS

Este sistema permite a criação de até 100 programas que podem ser futuramente chamados na aparafusadora de forma voluntária pelo utilizador. Além da possível criação de programas, este sistema permite fazer um grande número de funções entre as quais (Bosch Rexroth, 2017):

- Análise – é possível fazer uma análise exaustiva de todos os aparafusamentos já realizados, desde os resultados à representação gráfica do próprio aparafusamento;
- Modo – ajustar o modo de operação entre automático e manual;
- Job – criação de um trabalho que permita a realização de uma sequência de programas;
- Configurações – é possível criar novos utilizadores, alterar a data e hora, escolher a melhor forma de transferir e memorizar dados;
- Configurações de LED – ajustar a iluminação consoante aquilo que a máquina faz;

- Configuração de Scanner – Configuração muito importante para a identificação de produtos antes do aperto;
- Backups – permite guardar todas as configurações anteriormente realizadas a qualquer momento através do cartão MicroSD, adaptador USB ou através do *software de browser*;
- Diagnóstico – é possível ver todos os tipos de erros que o sistema possui.

2.10 Certificação nos sistemas de aparafusamento

As aparafusadoras elétricas industriais são máquinas de alto desempenho concebidas para a realização de aparafusamentos críticos, ou seja, são utilizadas em indústrias como a automóvel, onde é necessário que haja ferramentas de extrema precisão que permitam a realização de apertos que têm de ser controlados antes, durante e após o processo de aparafusamento. Por exemplo, atualmente, não é aceitável que um automóvel tenha uma falha técnica no aperto de uma roda que, futuramente, possa provocar um acidente a um indivíduo que use esse veículo. Por isso, é necessário perceber-se como foi realizado cada aparafusamento e quem o realizou durante a construção desse veículo. Posteriormente, estas informações podem absolver ou condenar uma pessoa que possa ter sido incompetente na construção do produto. Seguidamente, serão mencionadas e explicados todos os procedimentos a que as aparafusadoras de alto desempenho devem ser submetidas (Atlas Copco, 2015).

2.10.1 Qualidade

A ISO 9001 é um sistema de gestão de qualidade criado para permitir às empresas melhorarem o seu desempenho. Este sistema concede à empresa melhoramentos na otimização de processos, maior agilidade no desenvolvimento de produtos ou serviços e produção direcionada para satisfazer os vários clientes. A reunião de todos estes pontos, anteriormente referidos, permite às empresas evoluir alcançando um sucesso sustentado (NP EN ISO 9001, 2015).

No entanto, existem diferentes tipos de organizações e apesar de todas terem em comum a possibilidade de usufruírem de um sistema de gestão da qualidade, algumas das organizações apresentam normas que complementam a ISO 9001, como é o caso da norma de sistema de gestão da qualidade automotiva, usualmente conhecida com IATF 16949. Contudo, esta norma não pode ser considerada como uma norma de SGQ independente, sendo compreendida como um suplemento a utilizar em conjunto com a ISO 9001 (IATF 16949, 2016).

Segundo a IATF 16949 e a ISO 9001, as organizações devem determinar e providenciar as pessoas que são necessárias para a implementação do sistema de gestão da qualidade e operacionalização e controlo dos processos necessários a realizar. Por outro lado, as organizações devem ter também uma infraestrutura preparada para a operacionalização dos seus processos e obtenção da conformidade de produtos e serviços, pelo que a infraestrutura deve incluir vários recursos, entre os quais, o equipamento como as aparafusadoras (IATF 16949, 2016).

As organizações têm um papel extremamente importante porque devem assegurar que as máquinas são adequadas para a realização das atividades específicas a realizar. Para que essas atividades sejam realizadas, é necessário fazer calibrações às máquinas e testar a capacidade das máquinas para a produção (NP EN ISO 9001, 2015).

2.10.2 Calibração

A calibração é a determinação e documentação do desvio entre a leitura de um instrumento de medição e o valor indicado referenciado previamente para este dispositivo. Isto significa, que os dois valores são comparados entre si. Durante a calibração de um instrumento, a correlação entre as entradas e saídas é determinada e documentada sob condições definidas (Atlas Copco, 2015).

A entrada é o parâmetro físico a ser medido, por exemplo, o binário ou o ângulo de rotação, enquanto que a saída é um sinal elétrico do instrumento de medição (Bosch Rexroth, 2013).

No caso das ferramentas, estas precisam de ser medidas e verificadas em intervalos regulares. O equipamento de medição é utilizado com essa finalidade e permite que as aparafusadoras funcionem corretamente e com precisão. A calibração é um

procedimento essencial devido à responsabilidade final do produto a que o fabricante está sujeito, pois somente ferramentas que foram bem ajustadas permitem evitar medições incorretas, que podem ser caras e críticas à segurança (Atlas Copco, 2015). Por isso, atualmente os laboratórios de calibração oferecem inúmeros tipos de calibração aos clientes, no entanto, inicialmente é preciso perceber que tipo de calibração realizar, existindo as seguintes opções:

- Calibração do equipamento, isto é, a calibração dos elementos de medição da máquina, como transdutores, quer ao nível de binário, quer ao nível de ângulo;
- Calibração da máquina para a produção, onde existe a necessidade que a máquina atenda a requisitos de reprodutibilidade e estabilidade na linha de fabricação.

Os dois tipos de calibração apresentados acima apesar de terem objetivos diferentes, ambos apresentam rastreabilidade dos resultados (Atlas Copco, 2013).

Por isso, os clientes devem fazer estes dois tipos de calibração e medições regularmente a fim de evitarem problemas de produção e consequências legais em relação ao produto (Atlas Copco, 2013).

As medições são fundamentais para o sistema de gestão da qualidade, responsabilidade do produto, proteção ambiental e posteriormente, em caso de conformidade, é emitido um certificado (Atlas Copco, 2015).

2.10.2.1 Laboratórios de medição e calibração

Os fornecedores e clientes podem escolher os laboratórios de calibração, tendo em conta a finalidade específica que pretendem (Atlas Copco, 2015).

Em Portugal, o organismo de creditação responsável pela qualidade dos laboratórios é o IPQ, sendo que por isso, os laboratórios credenciados estão sempre sujeitos a avaliações e monitorizações imparciais e contínuas, permitindo aos laboratórios ter a garantia de alta qualidade e confiabilidade nos processos realizados (Maurício, n.d.).

Por outro lado, a maior parte dos organismos nacionais são membros do ILAC, permitindo que os certificados de calibração emitidos sejam reconhecidos em outros países membros (Atlas Copco, 2015).

A rastreabilidade descreve um processo pelo qual o valor indicado por um instrumento de medição é comparado com o padrão nacional por meio de uma ou mais etapas. Em cada etapa, o instrumento de medição é comparado com a referência. Qualquer valor medido está sujeito a uma incerteza de medição (Atlas Copco, 2013).

A incerteza associada à medição aumenta quanto mais baixo for o nível da hierarquia, como se pode verificar através do diagrama apresentado na figura 62 (Atlas Copco, 2015).



Figura 62 - Hierarquia da calibração (Atlas Copco, 2015)

Tendo em conta a hierarquia retratada acima, podemos verificar que a incerteza de medição vai aumentando à medida que descemos de nível. Por outro lado, quando subimos na hierarquia, verificamos um aumento de rastreabilidade, querendo isto dizer que nem sempre os padrões de medição são extremamente precisos. Por isso, devemos utilizar sempre padrões de níveis mais altos na hierarquia para diminuirmos a nossa incerteza de medição.

2.10.2.1.1 Laboratórios credenciados

Os laboratórios credenciados segundo o SPQ, elaboram trabalhos de calibração para equipamentos de medição dentro das medidas e faixas de medição definidas pela a sua acreditação. Estes laboratórios realizam os seus processos de calibração sendo rastreáveis aos padrões nacionais de medição.

2.10.2.1.2 Laboratórios não credenciados

Os laboratórios não credenciados elaboram trabalhos de calibração para equipamentos de medição tendo em conta as suas próprias medidas e procedimentos, ou seja, não obtiveram a acreditação necessária e por isso não são supervisionados por nenhum instituto independente (Atlas Copco, 2013).

O problema associado a este tipo de laboratórios prende-se com o facto do cumprimento das normas e padrões aplicáveis não estarem sempre garantidos, levando à emissão de certificados que possam não vir a ser reconhecidos por um tribunal em caso de processos de responsabilidade do produto (Atlas Copco, 2015).

2.10.2.2 Tipos de calibração

2.10.2.2.1 Calibração de equipamentos

Calibração credenciada

As calibrações credenciadas são realizadas segundo as normas e padrões definidos usando processos de calibração que são apenas aplicados em laboratórios credenciados. Como já foi dito precedentemente, os equipamentos utilizados nos processos são rastreáveis aos padrões nacionais, sendo necessário declarar a incerteza associada ao dispositivo. Por outro lado, permitem a validação do certificado internacionalmente e constitui uma forte defesa na segurança para qualquer problema de responsabilidade, que possa vir a surgir por causa do produto, devido à segurança crítica associada em indústrias como a automotiva (Atlas Copco, 2015).

As calibrações credenciadas da medição de binário das máquinas são realizadas segundo a norma europeia EURAMET/cg-14 e a norma alemã DIN 51309. Usualmente, para a realização de calibrações certificadas utilizam-se transdutores de grande precisão que são colocados nos sistemas de aparafusamento (EURAMET/cg-14, 2007).

Por outro lado, quando nos referimos a calibrações de ângulo, a acreditação é obtida de acordo com a norma alemã VDI/VDE 2648, utilizando os procedimentos de medição direta ou indireta apresentados seguidamente (Atlas Copco, 2015):

- Medição direta – procedimento que envolve definir um ponto de 0° e fazer medições em diferentes etapas a partir deste ponto.
- Medição indireta – procedimento que não necessita de definir um ponto de 0° devido à utilização de giroscópio. Devido à ausência dessa definição, podemos referir que estes sistemas são sem referência. Este tipo de medições são realizadas apenas por alguns laboratórios credenciados com equipamentos especiais. Em seguida será apresentada uma figura de um sistema de calibração de ângulo de rotação para medição direta e indireta de sistemas.

Na figura 63 está apresentado um tipo de laboratório onde são realizadas medições diretas e indiretas de ângulo (Atlas Copco, 2015).



Figura 63 - Medição de ângulo (Atlas Copco, 2015)

Quando se realiza qualquer calibração de uma máquina de forma a obter a certificação, é sempre necessário realizar o seguinte procedimento (Atlas Copco, 2015):

1. Teste de funções e inspeção visual – permite identificar qualquer dano existente no equipamento calibrado. É feita a verificação dos contactos e

dos cabos se for o caso. Esta inspeção também abrange todos os acessórios da ferramenta bem como a documentação técnica útil à calibração;

2. Calibração ou reparação – fase onde é necessário perceber se o equipamento está apto a ser calibrado ou se é necessária uma reparação. O laboratório entra em contacto com o cliente de forma a acordar o custo e o momento do trabalho de reparo;
3. Realização da calibração – é realizada a calibração e se for necessário, é realizado também o ajuste e depois repetido o procedimento de calibração;
4. Análise dos dados obtidos – verificação dos dados medidos e em caso de desvios volta a ser feita a calibração ou o equipamento tem de ser reparado;
5. Emissão do certificado – documentação de certificação de acordo com as normas e padrões internacionais e rotulagem do equipamento.

Na figura 64 é possível visualizar um rótulo de calibração (Atlas Copco, 2015).



Figura 64 - Rótulo de Calibração Credenciada (Atlas Copco, 2015)

Calibração não credenciada

Tendo em conta o que já foi exposto, a calibração de fábrica normalmente utiliza procedimentos de medição da exclusiva responsabilidade do laboratório pelo que, os padrões utilizados podem ser muito diferentes dos padrões nacionais e internacionais. Isto permite que cada laboratório tenham o seu próprio procedimento utilizando instrumentos de medição que podem ser rastreáveis ou não aos padrões nacionais. Usualmente não há declaração da incerteza de medição (Atlas Copco, 2015).

2.10.2.2.2 Calibração da máquina para o processo

Teste de capacidade da máquina

O teste de capacidade de uma máquina permite avaliar a capacidade de um produto produzido, verificando a adequação da máquina, ou seja, perceber se as especificações pretendidas pelo cliente são cumpridas e se possibilita ao cliente a fabricação do produto de forma consistente dentro da especificação (SCS Concept Group, n.d.).

Por exemplo, uma linha de produção tem como já foi referido, diversos parafusos críticos, como o aperto dos travões ou o aperto de peças do motor. Para isso é necessário assegurar a qualidade dos apertos devido à elevada quantidade de apertos necessários. Está apresentada na figura 65, uma linha de produção que se refere à importância de saber qual a capacidade da máquina para o trabalho a realizar.

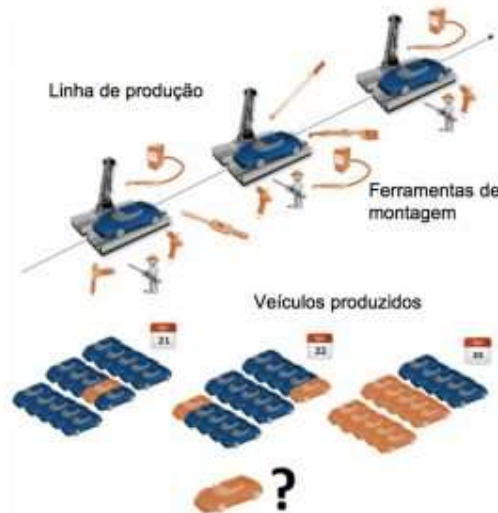


Figura 65 - Linha de produção (SCS Concept Group, n.d.)

Como se pode verificar através da figura 65, a produção em massa pode por vezes complicar o controlo a realizar pelos apertos, por isso é possível apurar o que aconteceu nos veículos já produzidos através da avaliação da capacidade da máquina.

Quando nos referimos à capacidade da máquina, podemos retirar informações sobre uma aparafusadora relativamente à possibilidade de realizar determinado aperto em condições quase constantes. É obvio que existe a possibilidade de haverem perturbações por causa de operadores, influências ou componentes defeituosos, que devem ser minimizados o máximo possível. Normalmente, para a realização deste teste é necessário

a existência de pelo menos 50 resultados, não sendo necessário saber informações sobre o tempo útil da máquina ou a capacidade do processo. Neste caso, também são necessários dois índices relevantes o C_m e o C_{mk} (Atlas Copco, 2015).

O C_m descreve a capacidade da máquina para fazer a operação no ponto com a qualidade pretendida. Permite-nos relacionar a capacidade da máquina com a largura de tolerância fornecida na forma de um índice de capacidade. O C_m é obtido a partir do seguinte cálculo (VDI 2647, 2017):

$$C_m = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad (6)$$

Onde:

LSE – Limite Superior de Especificação,

LIE – Limite Inferior de Especificação.

6 sigma – variação do processo, onde sigma é obtido com base numa estimativa quando não é conhecido o seu valor.

Por outro lado, o índice C_{mk} descreve a capacidade da máquina na zona crítica no valor de desvio entre o funcionamento da ferramenta e o valor alvo. O C_{mk} é dado pelo valor mínimo como pode ser comprovado pela seguinte expressão (VDI 2647, 2017):

$$C_{mk} = \min \left\{ \frac{(LSE - \mu)}{3\sigma}, \frac{(\mu - LIE)}{3\sigma} \right\} \quad (7)$$

Onde:

LSE – Limite Superior de Especificação,

LIE – Limite Inferior de Especificação.

3 sigma – variação do processo, onde sigma é obtido com base numa estimativa quando não é conhecido o seu valor,

μ - Média.

Para o cálculo destes dois índices é também necessário calcular a média e o desvio-padrão para a distribuição normal através das seguintes fórmulas (VDI 2647, 2017):

$$\mu = \frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n M_i \quad (8)$$

Onde:

n – Número de apertos realizados para o teste;

M_i – Valor obtido em cada medição.

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum_{i=1}^n (M_i - \mu)^2} \quad (9)$$

Onde:

n – Número de apertos realizados para o teste;

M_i – Valor obtido em cada medição.

Os dois indicadores previamente referidos permitem avaliar a capacidade da máquina, sendo que não adianta muito ter um C_m alto se a configuração da máquina estiver muito fora do centro em relação ao meio da faixa de tolerância (Atlas Copco, 2015).

O índice C_{mk} alto significa que a máquina está centrada e longe das larguras de tolerância, querendo então dizer que a máquina está muito bem adequada ao processo. Através da figura 66 é possível verificar a influência dos dois indicadores (Nielsen, n.d.).

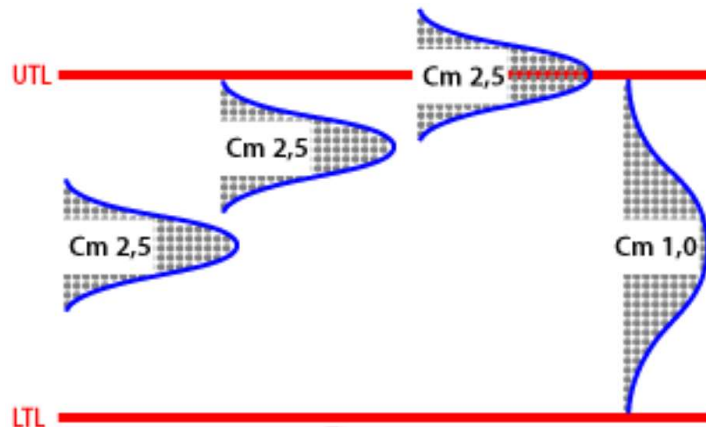


Figura 66 - Influência do Cm e do Cmk na amostra (Nielsen, n.d.)

Segundo a figura 66, podemos verificar que quanto maior for o Cm menor é largura da amostra, assim como quanto maior for o Cmk, a amostra permanecerá na zona central a maior distância dos dois limites de especificação. Normalmente, quando são realizados estes estudos estatísticos recorre-se a uma amostra aleatória (Nielsen, n.d.).

A figura 67 permite-nos compreender melhor como funcionam os dois índices.



Figura 67 - Exemplos da influência dos índices Cmk e Cm (Atlas Copco, 2015)

Na figura 67, podemos constatar que à esquerda a aparafusadora trabalhou com alta repetibilidade, mas alcançou sempre os resultados errados porque o valor Cm apesar de ser alto, tinha um valor de Cmk baixo. Quando nos referimos ao alvo central, verificamos a existência em simultâneo de um Cmk e Cm baixo e por isso todos os aparafusamentos foram diferentes e por último quando um aparafusamento é realizado com o Cmk e um Cm alto (Atlas Copco, 2015).

A precisão descreve a capacidade de medição da máquina para a realização de apertos próximos do valor pretendido. Por outro lado, os índices já referidos, são frequentemente mencionados quando nos referimos à conexão com precisão. Podemos

concluir que o C_m se refere à precisão da máquina enquanto que o C_{mk} vai um pouco mais longe e permite à máquina além de ser precisa, ser também exata. Ao fim ao cabo, interessa que os componentes tenham grande repetibilidade e reprodutibilidade (Atlas Copco, 2015).

Agora, será apresentado um conjunto de pontos a seguir para se obter uma boa análise da capacidade da máquina (Bosch Rexroth, 2013):

- Seleção de um programa de aparafusamento com binário pretendido, valores máximos e mínimos limites para a monitorização e velocidade de rotação;
- Qualidade utilizada de parafusos e porcas;
- Dispersão de binário em função da tolerância, obrigando o aperto a ser realizado dentro dos limites especificados e a ser dentro da dispersão detalhada para permitir uma qualidade maior no aperto e consequentemente na qualidade do produto.
- A quantidade de apertos bem-sucedidos necessários para a realização do teste e a elaboração em condições realistas para não haver um teste errado da capacidade da máquina
- Cálculo dos índices C_m e C_{mk} .

A realização de todo este processo é feita sempre em 6 desvios padrões como já foi referido.

O binário utilizado no procedimento do teste de capacidade pode ser calculado através do transdutor interno da máquina ou através de um transdutor de medição acoplado externamente (Bosch Rexroth, 2013).

Finalmente, é apresentada a figura 68 que permite retirar conclusões quanto à capacidade de qualidade através dos índices calculados, tanto na capacidade do processo como na capacidade da máquina (Bosch Rexroth, 2013).

Tightening is	C_m	C_{mk}	C_p	C_{pk}
quality-capable	>2.00	>1.67	>1.67	>1.33
conditionally quality capable	>1.67	>1.33	>1.33	>1.00
not quality capable	≤1.67	≤1.33	≤1.33	≤1.00

Figura 68 - Índices Limite (Bosch Rexroth, 2013)

Homologação

A homologação é um tipo de teste de ferramenta. Para a realização deste teste, são necessárias três máquinas do mesmo tipo que são submetidas a procedimentos extremamente demorados. Alguns testes são realizados segundo condições extremas, devido ao tipo de aplicação que se quer fazer. Este tipo de teste é parecido com o teste de capacidade de máquina, no entanto, o tempo de realização é consideravelmente maior porque existe a necessidade de calcular vários Cm e Cmk para diferentes ângulos e binários nas três máquinas, pelo que o número de ensaios final é consideravelmente elevado. Este teste é normalmente utilizado quando estamos na presença de um novo produto antes de ser colocado à venda no mercado (Atlas Copco, 2015).

Este teste é utilizado para obter a aprovação da máquina num processo de produção específico (Atlas Copco, 2015).

Como já foi acima dito, o teste de homologação é realizado para 4 binários diferentes (VDI 2647, 2017). A tabela 1 demonstra todos os Cm e Cmk calculados.

Tabela 1 – Medições realizadas para binário (Bosch Rexroth, 2014b)

Werkzeug	SerienNr.	Testdaten	0%		30%		80%		100%		
			30 °±5°	360 °±15°	30 °±5°	360 °±15°	30 °±5°	360 °±15°	30 °±5°	360 °±15°	
NXA015S		Prüfmoment	3,0 Nm		6,6 Nm		12,0 Nm		15,0 Nm		
		Drehzahl 1.Stufe	630 U/min								
		Drehzahl Endanzug	50 U/min								
		Start Winkelzählung	1,50 Nm		3,30 Nm		6,00 Nm		7,50 Nm		
	Maschine 1	cm	2,27	3,07	2,89	4,37	2,71	5,05	2,43	4,89	
		cmk	2,05	2,85	2,79	4,22	2,46	4,93	2,32	4,63	
	Maschine 2	cm	2,43	4,18	2,79	4,25	2,56	5,26	2,49	5,55	
		cmk	2,24	3,94	2,56	4,04	2,32	4,94	2,33	5,34	
	Maschine 3	cm	3,22	4,77	3,21	4,56	2,58	4,49	2,50	4,87	
		cmk	3,08	4,73	3,19	4,34	2,49	4,43	2,42	4,87	
Min cm/cm		cm	2,27	3,07	2,79	4,25	2,56	4,49	2,43	4,87	
		cmk	2,05	2,85	2,56	4,04	2,32	4,43	2,32	4,63	

A tabela 1 como se pode verificar apresenta as medições das máquinas realizadas para 4 binários diferentes (3 Nm, 6,6Nm, 12Nm e 15Nm) segundo a VDI/VDE 2647, começando com 50% do binário final a atingir. Por outro lado, para cada binário é realizada a simulação para juntas de aperto rígidas e para juntas de aperto flexíveis. Nos testes de homologação também são realizados os mesmos testes para o ângulo como apresenta a tabela 2.

Tabela 2 – Medições realizadas para ângulo (Bosch Rexroth, 2014b)

Werkzeug	SerienNr.	Testdaten	60% von Mnom 40°		80% von Mnom 180°	
NXA015S		Prüfmoment	9,00 Nm		12,00 Nm	
		Drehzahl	50 U/min			
		Start Winkelzählung	3,00 Nm		3,00 Nm	
	Maschine 1	Drehmoment	±	3,55%	±	5,43%
		Drehwinkel	±	4,2°	±	7,7°
	Maschine 2	Drehmoment	±	6,39%	±	6,71%
		Drehwinkel	±	2,7°	±	8,1°
	Maschine 3	Drehmoment	±	3,92%	±	3,84%
		Drehwinkel	±	3,0°	±	6,4°




A tabela 2 representa as medições de ângulo necessárias a realizar segundo a VDI/VDE 2647. Os testes são também realizados para juntas de aperto rígidas e flexíveis com 60% e 80% do binário (VDI 2647, 2017).

2.10.3 Segurança

As aparafusadoras de acordo com a norma VDI/VDE 2862 é a solução para aplicações críticas, garantindo a máxima liberdade de uso num nível consistentemente alto de confiabilidade do processo. Existe a necessidade de controlar uma variável além do binário. A verificação de ângulo é normalmente a variável mais viável. O controlador integrado permite o armazenamento temporário dos resultados de aperto e as transferências sem fio para a estação recetora, posteriormente. Seguidamente, é exibida a tabela 3 que avalia as três categorias que são aplicadas às montagens a realizar na indústria automotiva (VDI 2862, 2012).

Tabela 3 - Categorias de aperto (VDI 2862, 2012)

VDI2862 - Part1	Category			
	A	B	C	
Description	Danger to life	Breakdowns	Noncritical	
M i n i m u m r e q u i r e m e n t	Control and monitoring variable	One directly measured control variable (e.g. torque / angle)	One directly or indirectly measured control variable (not fastening time)	One directly or indirectly measured control variable
		One directly measured monitoring variable (e.g. torque / angle)	One directly or indirectly measured monitoring variable (not fastening time)	-
		Control variable and monitoring variable must not be identical	-	-
	Further processing results	Provision of fastening results for further processing		-
	Monitoring fastening system	Monitoring of the fastening system via self tests / redundant design	-	-
	Detection of malfunctions	The digital interface of the fastening system control and manufacturing control system must allow for detection of malfunctions in signal communication	-	-
	Checking tool	Regular dynamic testing of measuring accuracy and repeatability of the fastening system must be carried out by the user		
	Checking workpiece	Random sampling of the joints tightened with production equipment by trained personnel using appropriate test methods	-	-
	Example	Steering, brake, airbag	Motor, gears	Subordinate fittings in the vehicle interior

 Properties and selection criteria for tightening systems
 MCT
 PCT

Tendo em conta a tabela apresentada acima, podemos verificar que a norma VDI/VDE 2862 apresenta três categorias específicas:

- Montagens críticas de segurança – a falha de uma junta crítica de segurança pode causar problemas de saúde ou até mesmo a perda da vida. Por esta razão, é necessário uma monitorização redundante através de transdutores, além de uma medição direta do processo de aparafusamento. Cada ciclo de aparafusamento deve ser documentado permitindo posteriormente a análise minuciosa do aperto em caso de necessidade;
- Montagens críticas para a função – a falha deste tipo de juntas críticas leva a uma falha funcional do veículo. Nestes casos, é sempre necessária uma medição direta e uma medição indireta de monitorização e controlo. O aparafusamento deve ser documentado tal como nas montagens críticas;
- Montagens não críticas – estes casos são todos aqueles que não são considerados críticos para a segurança. Uma medição direta ou indireta pode ser usada para controlar o aparafusamento.

2.10.3.1 Lei da responsabilidade do produto

Segundo a Diretiva 85/374 CE, os equipamentos devem ser constantemente verificados de forma a manter os padrões e requisitos necessários para diminuir a produção de produtos defeituosos, permitindo ao produtor ter maior facilidade de se defender contra reivindicações de responsabilidade do produto. Por vezes, os fabricantes

de produtos são mesmo obrigados a pagar grandes indenizações porque as calibrações não são realizadas da forma devida. Por isso, as calibrações permitem ao fabricante do produto ter as seguintes vantagens (Atlas Copco, 2015):

- Segurança para o fabricante ou fornecedor;
- Segurança para o utilizador;
- Incerteza de definição definida;
- Garantia de qualidade na produção;
- Cumprimento dos padrões de qualidade;
- Maior satisfação do cliente;
- Reconhecimento internacional;
- Conformidade com requisitos rigorosos;
- Evidências relacionadas à responsabilidade do produto.

3. Caso de estudo aparafusamento NEXO

O caso prático desenvolvido foi um programa criado que permite realizar todas as tarefas fulcrais de um sistema de aparafusamento NEXO. Tendo em conta toda a introdução teórica anteriormente mencionada, foi desenvolvida uma *Windows Form App* através da linguagem de programação C# que permite enviar e receber os pacotes de dados através do *Open Protocol*. Além da produção do programa, foi também criado um servidor FTP local no computador, de forma a poder receber todos os dados enviados pela máquina de cada aparafusamento que esta realiza, sendo posteriormente todos estes dados tratados e colocados de forma organizada numa base de dados, onde todos os dados são demonstrados de forma pormenorizada.

3.1 Desenvolvimento de aplicação de apoio

A aplicação desenvolvida foi feita com a linguagem C# através da *framework dotnet*. Esta ferramenta criada permite ao utilizador realizar todos os comandos que estão disponíveis na aparafusadora NEXO. Por outro lado, apesar de permitir a realização de todos os comandos, quando nos referimos especificamente ao aperto da ferramenta, esta necessita sempre que seja pressionado o gatilho, mesmo que através do programa seja desbloqueada a máquina porque estamos na presença de uma ferramenta livre, que usualmente é utilizada por um operador. O programa desenvolvido assenta na comunicação da máquina com o computador através de *Open Protocol*, protocolo baseado em TCP/IP que permite o envio e receção de dados através de um *socket* (Bosch Rexroth, 2017). Existe em simultâneo a transferência de ficheiros *.json, assim que é realizado um aperto com todos os dados detalhados desse mesmo aperto. Por último, esses dados são tratados e armazenados numa base de dados *MySQL*.

3.2 Protocolos de comunicação

A aplicação desenvolvida apresenta dois protocolos de comunicação diferentes. O *Open Protocol* é utilizado para enviar e receber comandos da aparafusadora, sendo o protocolo mais utilizado durante o funcionamento da aplicação. Devido ao elevado

número de opções de comando apresentado por este protocolo, o *Open Protocol* é também capaz de enviar dados de resultados obtidos em aparafusamento. Por outro lado, o *File Transfer Protocol* dedica-se apenas à transmissão de dados através da criação de um ficheiro *.json, que pode ser aberto para análise através de um simples *notepad*. Os ficheiros de dados criados vão permitir ao programa carregar os dados do ficheiro e enviá-los de forma organizada para uma base dados.

3.2.1 Open Protocol

O *Open Protocol* é um protocolo de comunicação criado para permitir a comunicação com um controlador de aparafusamento ou qualquer outro equipamento que use este protocolo. Este protocolo é muito utilizado por quase todos os produtores de máquinas de aparafusamento industrial elétrico. Para se utilizar este protocolo de comunicação, é sempre necessário fazer uma conexão TCP/IP, ou seja, é preciso estabelecer uma ligação entre um servidor e um cliente de modo a posteriormente poder utilizar a ligação para transferir dados. Os elementos que são enviados entre os dois dispositivos são denominados de pacotes de dados e têm a sua própria estrutura usualmente adaptada, consoante a máquina que vai ser utilizada (Assay, 2018).

Quando falamos de sistemas de aparafusamento, os pacotes de dados enviados entre emissor e recetor são denominados de *MID*'s. Estes pacotes permitem enviar todo o tipo de informação existente na aparafusadora, desde informações acerca de aparafusamentos já realizados até habilitar a própria máquina para realizar o aperto automaticamente, sendo apenas necessário carregar no gatilho. Por isso, os tamanhos das palavras variam conforme o pedido que é feito à máquina. Por outro lado, estes pacotes de dados sofrem algumas pequenas transformações consoante a marca e a máquina de aparafusamento apesar de ser tudo praticamente igual. A figura 69 demonstra um exemplo de uma troca de dados feita entre uma aparafusadora e um computador supraordenado.

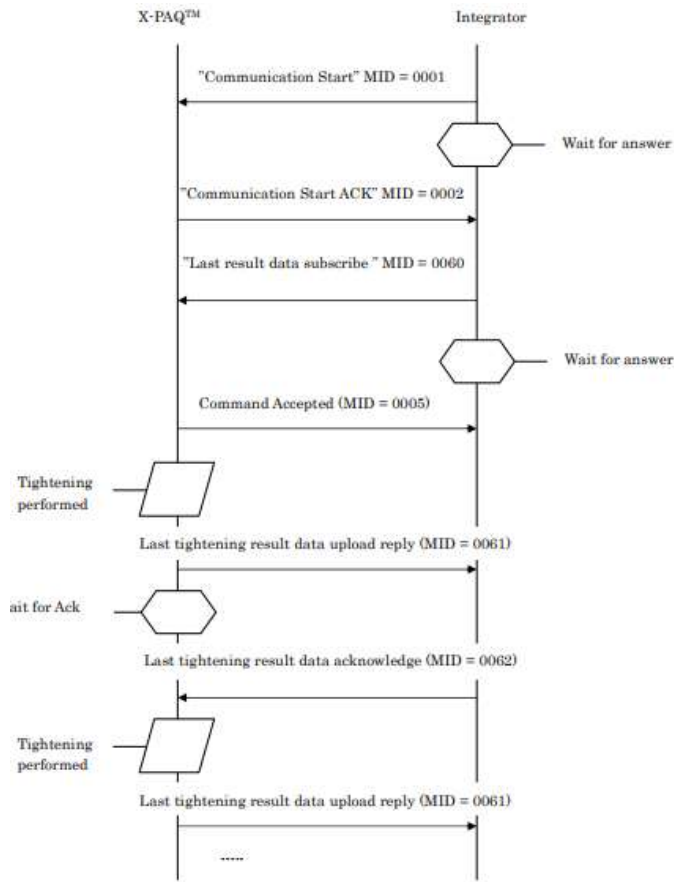


Figura 69 - Exemplo de troca de dados entre aparafusadora e computador supraordenado (Assay, 2018)

Os pacotes de dados enviados entre emissor e recetor encontram-se no formato ASCII. Além disso, cada uma das palavras enviadas e recebidas são constituídas por três partes fundamentais:

- Cabeçalho – primeiros 20 bytes da palavra contendo a informação relativa ao tamanho, número, revisão e bytes de reserva;
- Corpo da Mensagem – parte da mensagem onde se encontra a informação daquilo que foi previamente pedido;
- Fim de Mensagem – parte final da mensagem que permite ao recetor perceber o tamanho total de bytes da palavra.

Seguidamente, a figura 70 mostra as três partes constituintes de cada *MID*.

Cabeçalho				Corpo da Mensagem	Fim de Mensagem
Comprimento	MID	Revisão	Reserva	NUL (ASCII 0x0)
20 Bytes				Max 1004 Bytes	

Figura 70 - Pacote de dados (Assay, 2018)

Tendo em conta a figura 70, podemos verificar que o cabeçalho é dividido em 4 partes (Bosch Rexroth, 2017):

- Comprimento – primeiros 4 bytes em ASCII que apresentam o tamanho total do pacote.
- *MID* – apresenta 4 bytes de comprimento e é também especificado por 4 dígitos em ASCII. O *MID* descreve à aparafusadora como deve ser interpretada a mensagem enviada, permitindo a esta saber previamente quantos bytes vai receber. Obviamente, que se não receber o número de bytes que está destinado ao *MID* escolhido, existirá um erro no envio do pacote.
- Revisão – constituída por 3 bytes de comprimento que se referem a 3 dígitos em ASCII, tem um papel fundamental no tipo de resposta que o utilizador pretende receber. A revisão influencia diretamente o comprimento do pacote, pois trata-se das diferentes versões que existem para um mesmo *MID*. Por exemplo, existem *MID*'s que apresentam diversas versões com tamanhos e graus de complexidade diferentes, consoante o tipo de resposta que é pretendido pelo o utilizador. Cabe, por isso, ao utilizador selecionar a versão que é mais adequada para o tipo de trabalho que está a ser realizado.
- Reserva – são bytes de reserva que servem para ser usados no cabeçalho futuramente, assim que seja necessário. Trata-se do último elemento do cabeçalho e tem um tamanho total de 9 bytes.

Posteriormente, é colocado o corpo da mensagem, que varia de acordo com o tipo de pacote pretendido, seguindo-se a parte final da palavra. A seguir, será possível ver um exemplo de um pacote enviado através da figura 71.



Figura 71 - Exemplo de pacote MID 0018

Com a figura 71 exposta acima, podemos verificar os vários segmentos que constituem este pacote e verificamos que neste exemplo, o corpo do pacote é de apenas 3

bytes. Por último, é possível ver o fim do pacote que é sempre representado pelos caracteres “\0”.

Como já havia sido dito anteriormente, tendo em conta a máquina e a marca da própria, os *MID's* variam de forma substancial, por isso, aparafusadoras como as da *Atlas Copco* têm alguns pacotes diferentes em relação aos pacotes apresentados pela *Bosch Rexroth Nexo*. Em seguida, podemos verificar todos os pacotes disponíveis na aparafusadora NEXO através da tabela 4.

Tabela 4 – Pacotes disponíveis na aparafusadora NEXO (Bosch Rexroth, 2017)

MID 0001	Início da comunicação
MID 0002	Confirmação do início da comunicação
MID 0003	Fim da comunicação
MID 0004	Comando de erro
MID 0005	Comando aceite
MID 0010	Pedido de upload do número do programa de aparafusamento
MID 0011	Resposta de upload dos números do programa de aparafusamento
MID 0012	Pedido de upload dos dados do programa de aparafusamento
MID 0013	Resposta de upload dos dados do programa de aparafusamento
MID 0014	Subscrição do programa de aparafusamento selecionado
MID 0015	Programa de aparafusamento selecionado
MID 0016	Confirmação do programa de aparafusamento selecionado
MID 0017	Anulação da subscrição do programa de aparafusamento selecionado
MID 0018	Selecionar programa de aparafusamento
MID 0019	Definição de pré-ajuste para o contador OK/NOK
MID 0020	Redefinição do contador OK/NOK
MID 0021	Desativação do contador OK/NOK
MID 0030	Pedido de upload do contador OK
MID 0031	Resposta do upload do contador OK
MID 0040	Pedido de upload dos dados da ferramenta
MID 0041	Upload dos dados da ferramenta
MID 0042	Desativar ferramenta
MID 0043	Ativar ferramenta
MID 0045	Definição de valor de calibragem
MID 0150	Pedido de download do código ID
MID 0051	Subscrição de upload do código ID
MID 0052	Upload do código ID

MID 0053	Confirmação de upload de código ID
MID 0054	Anulação da subscrição de upload de código ID
MID 0060	Subscrição dos últimos dados de resultado de aparafusamento
MID 0061	Resposta de upload dos últimos dados de resultado de aparafusamento
MID 0062	Confirmação dos últimos dados de resultado de aparafusamento
MID 0063	Anulação dos últimos dados de resultado de aparafusamento
MID 0064	Pedido de upload do resultado arquivado de aparafusamento
MID 0065	Resposta do resultado de aparafusamento arquivado
MID 0070	Subscrição do erro de sistema que ocorre
MID 0071	Upload do erro de sistema que ocorre
MID 0072	Confirmação de upload do erro de sistema
MID 0073	Anulação da subscrição para o erro de sistema
MID 0074	Erro de sistema no comando de aparafusamento confirmado
MID 0075	Confirmação de erro de sistema no comando de aparafusamento confirmado
MID 0076	Estado do erro de sistema
MID 0077	Confirmação do estado do erro de sistema
MID 0079	Confirmar o erro de sistema no comando de aparafusamento
MID 0080	Pedido da hora do comando de aparafusamento
MID 0081	Upload de hora
MID 0082	Definição da hora no comando de aparafusamento
MID 0111	Indicação no visor gráfico de aparafusamento
MID 0127	Interromper job
MID 0400	Subscrição Modo automático/manual
MID 0401	Upload Modo automático/manual
MID 0402	Confirmação de upload Modo automático/manual
MID 0403	Anulação Modo automático/manual
MID 0404	Seleção de modo automático/manual
MID 0410	Ajuste do requisito de AutoDisable
MID 0411	Ajuste da resposta de AutoDisable
MID 0500	Subscrição da alteração aos sinais de saída
MID 0501	Upload da alteração aos sinais de saída
MID 0502	Confirmação de upload da alteração aos sinais de saída
MID 0503	Anulação da alteração aos sinais de saída
MID 0504	Alterar valor dos sinais de entrada
MID 0570	Ativar job

MID 0571	Iniciar processo do job
MID 0573	Selecionar número de job
MID 0800	Requisito do estado de carregamento da bateria
MID 0801	Resposta do estado de carregamento da bateria
MID 0802	Subscrição de alteração do estado de carregamento da bateria
MID 0803	Upload alteração do estado de carregamento da bateria
MID 0804	Anulação da subscrição de alteração do estado de carregamento da bateria
MID 0805	Requisito de intensidade de receção
MID 0806	Resposta de intensidade de receção
MID 0807	Subscrição alteração de intensidade de receção
MID 0808	Upload alteração da intensidade de receção
MID 0809	Anulação da subscrição alteração de intensidade de receção
MID 9999	Keep-Alive

Anteriormente já havia sido referido que as aparafusadoras são extremamente versáteis e permitem transferir os resultados tendo em conta aquilo que o cliente pretende.

3.2.2 File transfer protocol

O *File Transfer Protocol* permite, como o próprio nome indica, fazer transferência de dados entre cliente e servidor. Este tipo de protocolo tem por base o protocolo TCP/IP, mas apenas permite enviar dados para o servidor e ler dados a partir deste (Bosch Rexroth, 2017).

Neste caso, o nosso cliente será a aparafusadora, pois esta envia os dados para o servidor, neste caso o computador, sem necessitar de qualquer pedido de envio. O servidor apenas recebe e organiza os dados como bem entender.

Os envios realizados pela máquina podem ser previamente configuráveis, permitindo fazer diversas alterações, como enviar dados de forma codificada, criar arquivos e o conteúdo de acordo com as necessidades do cliente.

Estes dados são enviados de forma síncrona, ou seja, alguns segundos depois, no entanto, se não for possível fazer esse envio, os dados são guardados na máquina até haver a possibilidade de enviar esses dados para o servidor, daí este processo ser realizado sem que seja perdido qualquer tipo de resultado. Obviamente, por vezes, o envio de dados

pode ser complicado devido à quantidade e complexidade do aparafusamento realizado, que aumenta a quantidade de dados a enviar, que se encontra dependente dos seguintes critérios (Bosch Rexroth, 2017):

- Número configurado de pontos de curva no programa de aparafusamento;
- Faixa de valores dos parâmetros de curva;
- Número de estágios de aparafusamento;
- Número no destino ativo e as funções de monitorização do respetivo nível.

Este protocolo obriga a uma configuração prévia através do programa *web browser* da máquina. É possível constatar através da figura 72, todos os parâmetros de configuração necessários.

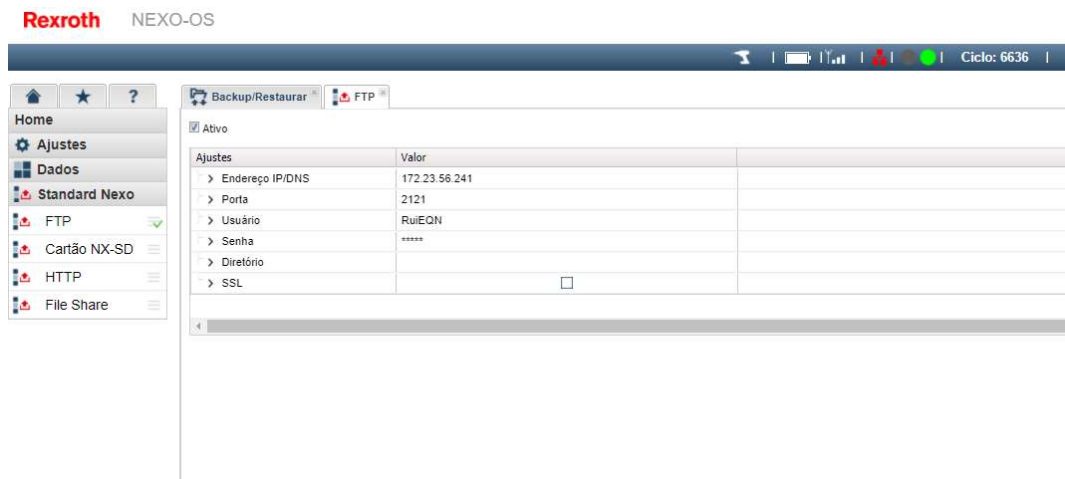


Figura 72 - Web Browser da máquina

Como se pode confirmar através da figura 72, é possível ver a necessidade de colocar o endereço do servidor, o utilizador, a palavra-passe, a senha, o diretório e a possibilidade de codificação de dados. Estes elementos são fundamentais para possibilitar a conexão entre cliente e servidor, no entanto, do lado do servidor tudo deve estar correto e corresponder de forma igual para evitar erros de envio. Para realizar esta conexão, foi também necessário recorrer ao *Filezilla Server* que foi colocado a ouvir a porta 2121, porta pela qual recebe os dados de aparafusamento que foram sendo realizados como se pode ver através da figura 73.

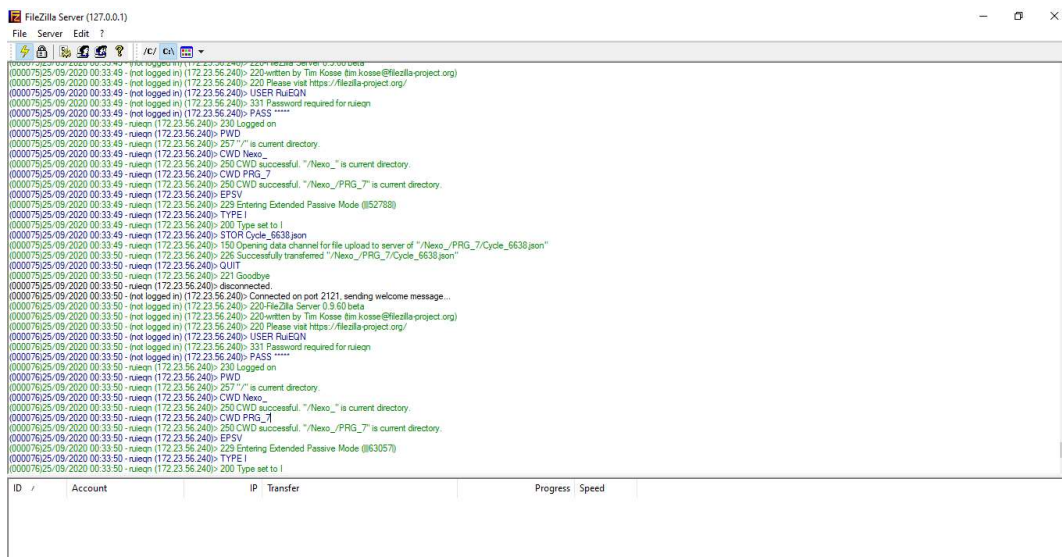


Figura 73 - Envio de dados por File Transfer Protocol através do "Filezilla"

3.3 Funcionalidades da aplicação

A aplicação apresenta inúmeras funcionalidades que demonstram a versatilidade da própria máquina. Depois de criada a ligação ao ponto de acesso, o utilizador será capaz de estabelecer uma ligação com a rede, que possibilita a comunicação com máquina. Posto isto, é finalmente possível estabelecer a ligação entre a aparafusadora e o computador, colocando um IP estático que permita encontrar a máquina dentro da mesma rede.

Depois da comunicação entre computador e máquina estar estabelecida, todas as funcionalidades existentes na aplicação podem ser utilizadas.

Login

Primeiramente, quando o utilizador liga o aplicativo depara-se com as credenciais de segurança para iniciar a sessão no programa de forma a poder utilizar todas as funções da aplicação. Estas credenciais podem ser alteradas consoante a necessidade do cliente e de forma a que só uma pessoa ou um grupo restrito de pessoa tenha acesso. Este login torna-se extremamente importante pois, permite identificar o operador da máquina

quando é efetuado um aperto, ou seja, vai de encontro ao controlo e monitorização que é necessário ter na realização de cada aparafusamento, permitindo assim a identificação do operador para cada aperto que é executado.

A figura 74 mostra a janela da aplicação onde é realizado o login.

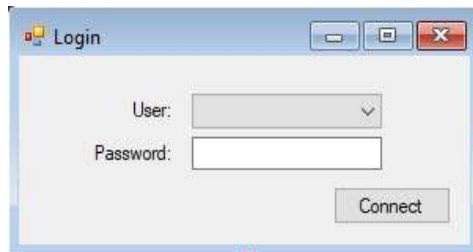


Figura 74 – Login da aplicação

Após o início da sessão, é finalmente possível criar um *socket* entre o computador (cliente) e a *Bosch Rexroth Nexo* (servidor), parte extremamente importante para o funcionamento da aparafusadora de forma completamente remota. Antes demais, dizer que o *socket* é constituído por 3 pontos fundamentais:

- *IP Address* – o IP que deve ser colocado aqui é o do servidor onde o cliente se vai ligar, neste caso seria 172.23.56.240;
- Tipo de protocolo – o protocolo utilizado foi o TCP/IP, protocolo onde assenta o *Open Protocol*, que permite o envio e receção de palavras e também permite verificar se o envio chegou ao destino pretendido;
- Porta – a porta utilizada foi a 4545 que é a porta padrão usada pela máquina.

Seguidamente como mostrado na figura 75, é exposto onde é possível colocar o *IP* e a porta necessária para criar um *socket*, que permita realizar a comunicação entre máquina e computador.

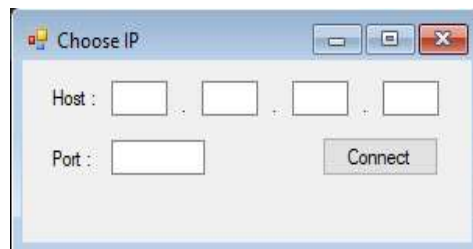


Figura 75 – Conexão TCP/IP

Através da figura 75, é possível verificar a existência de 2 dos 3 pontos necessários para criar um *socket*. Como a biblioteca utilizada já é própria para *sockets* TCP/IP, não é necessário colocar que tipo de protocolo vai ser utilizado. Finalmente, quando os dados colocados estiverem de acordo com os dados utilizados pela aparafusadora, o programa abre através do *socket* um canal para a emissão e recepção de dados. Por último, a porta é considerada um elemento fundamental para a transmissão de dados porque permitem ao utilizador usar mais do que um serviço em simultâneo, ou seja, possibilita ao dispositivo saber que tipo de ligação está a realizar. A seguir, é possível verificar o código referente à criação do *socket* através da figura 76.

```

var ip = this.textBox1.Text+"." + this.textBox2.Text + "." + this.textBox3.Text + "." + this.textBox4.Text;
var port = Int32.Parse(this.textBox5.Text);
var server = new TcpClient(ip, port);
var migText = "00200001001000000000\0";
var m01 = Encoding.ASCII.GetBytes(migText);

if (server.Connected)
{
    var stream = server.GetStream();
    stream.Write(m01, 0, m01.Length);

    if (stream.CanRead)
    {
        var midSize = 57;
        var resp = new byte[midSize];

        var coisas = stream.Read(resp, 0, midSize);
        var converter = Encoding.ASCII.GetString(resp, 0, resp.Length);

        var mid = converter.Substring(4, 4);

        if (mid.Equals("0002"))
        {
            Console.WriteLine("Sucesso");
            KeepAlive(ip, port);

            var programForm = new Menu(ip, port);
            this.Hide();
            programForm.ShowDialog();
        }
        else
        {
            if (mid.Equals("0004"))
            {
                MessageBox.Show("Error when sending MID0001");
            }
        }
        Console.WriteLine("recebi");
    }
    stream.Flush();
    stream.Close();
    server.Close();
}
else
{
    MessageBox.Show("IP Invalido");
}

```

Figura 76 - Socket TCP/IP e conexão com aparafusadora

Como se pode verificar através da figura 76, nas 3 primeiras linhas podemos observar a criação do *socket* TCP/IP. Seguidamente, está apresentada a palavra que vai ser enviada correspondente ao *MID* 0001 que permite a abertura da conexão. Posteriormente, é criado o canal de escrita onde é enviada a palavra previamente referida. De seguida, são realizadas algumas verificações que se encontram diretamente relacionadas com a receção da palavra enviada pela aparafusadora.

Main Menu

A seguir, é apresentada a figura 77, que exhibe todas as funcionalidades que este aplicativo permite ao utilizador realizar. De referir que quando é realizado o carregamento desta janela, o aplicativo atualiza automaticamente o estado atual da bateria.

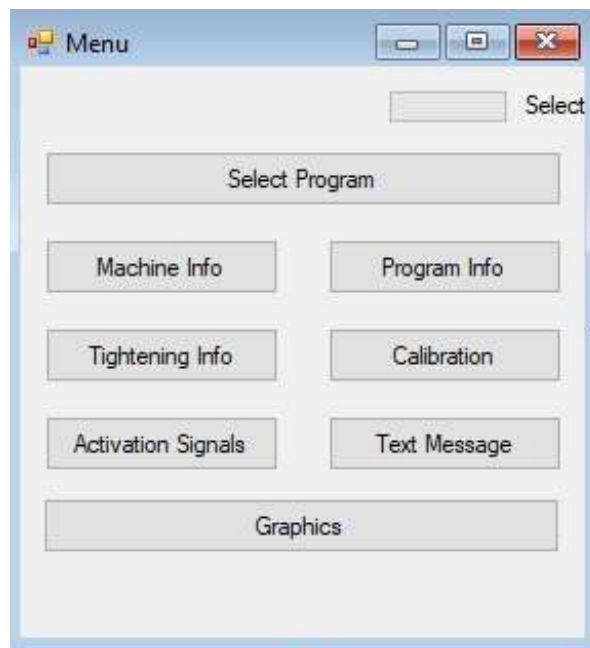


Figura 77 - Menu Principal da aplicação

Tendo em conta a figura 77, podemos verificar a existência de 8 opções possíveis que serão seguidamente explicadas de forma detalhada.

Select Program

O *Select Program* é opção principal do programa porque permite ao utilizador realizar um aparafusamento. Como já foi mencionado anteriormente, este tipo de aparafusadoras são

capazes de gravar uma elevada quantidade de programas, pelo que é possível escolher qual o programa que se quer usar previamente. Por outro lado, é possível usar a máquina em modo manual ou automático, sendo que essa opção está declarada na janela apresentada imediatamente através da figura 78.

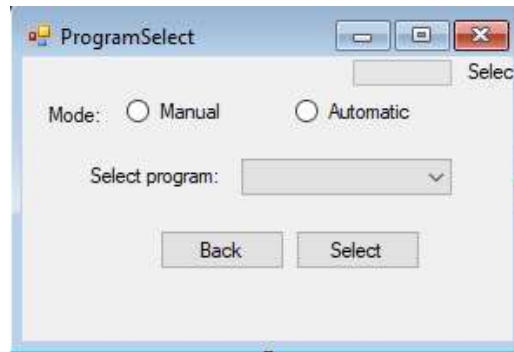


Figura 78 - Seleção de programa da aplicação

Considerando a figura 78, verificamos que estão apresentados os dois modos de trabalho possíveis que são obtidos através do envio do *MID* 0404:

- Manual – modo que permite escolher os programas e ter acesso a todos os menus disponíveis na consola da máquina, ou seja, permite ao operador usar a máquina sem ordens de controlo;
- Automática – modo que permite enviar o programa a realizar e efetuar qualquer tarefa da aparafusadora de forma automática. No processo de aparafusamento, é possível dar permissão à máquina para aparafusar, mas é sempre necessário pressionar o gatilho pois, a máquina utilizada é semi-automática e não foi desenhada para realizar aparafusamentos sem qualquer contacto manual.

A figura apresentada acima, permite-nos também ter acesso à lista de programas disponíveis na aparafusadora através do *upload* dos programas de aperto usando o *MID* 0010. Prontamente, são apresentados os vários programas na caixa de seleção que quando seleccionados enviam automaticamente o *MID* 0018 que torna o programa selecionado ativo.

Por último, os botões *back* e *select* são botões de retorno ao menu principal e de permissão de aparafusamento, respetivamente.

Todo o processo que decorre desde o login do programa até ao aparafusamento utiliza inúmeros pacotes de dados para permitir, verificar e realizar todas as tarefas pretendidas pelo programa.

Logo, será apresentado através da figura 79, parte do código que demonstra o envio final necessário a realizar para se poder fazer o aparafusamento.

```
stream.Flush();
var server2 = new TcpClient(ip, port);

var stream2 = server2.GetStream();
var mid43 = "00200043001000000000\0";
var packedmid43 = Encoding.ASCII.GetBytes(mid43);
stream2.Write(packedmid43, 0, packedmid43.Length);

if (stream2.CanRead)
{
    var mid43Size = 57;
    var response43 = new byte[mid43Size];
    var networkResp = stream2.Read(response43, 0, mid43Size);
    var converter43 = Encoding.ASCII.GetString(response43, 0, response43.Length);

    var midResponse = converter43.Substring(4, 4);

    Console.WriteLine("recebi" + midResponse);
}
```

Figura 79 – Habilitação da máquina para realizar aperto

Através da figura 79 apresentada acima, pode-se verificar o envio do *MID* 0043 que permite a habilitação da máquina, ou seja, representa o desbloqueio da máquina necessitando o utilizador apenas de carregar no gatilho para realizar o aperto.

Machine Info

A opção *Machine Info* é extremamente importante porque concede ao utilizador informações gerais da aparafusadora, tais como:

- Número da ferramenta – número de identificação dado à máquina;
- Ciclos – é possível ver quantos ciclos a máquina já realizou desde que foi comprada. Estas aparafusadoras têm um tempo de vida de 1000000 de ciclos.
- Data da última manutenção – data que é gravada automaticamente a partir do momento em que foi realizada a última manutenção;
- Número de série da máquina – número de identificação da série da máquina;

- Fator MFU – fator de estudo da capacidade para uma qualidade constante da ferramenta;
- Ciclos desde a última manutenção – permite perceber quantos ciclos é possível realizar entre manutenções;
- Tipo de ferramenta – qual o modelo de ferramenta utilizado, ou seja, a Nexo.
- Tamanho do motor – dimensões do motor utilizado pela máquina;
- Fim de corpo de mensagem – últimos 3 bytes do corpo da mensagem.

Para obter estas informações da máquina, é necessário recorrer ao *MID* 0040, pacote de dados que mostra todas as informações de dados apresentadas acima através de uma palavra de 121 bytes. Todas estas informações são apresentadas numa caixa de texto com todos os parâmetros acima mencionados, depois de se carregar no botão *Machine Info*.

Program Info

Quando nos referimos à opção *Program Info*, podemos retirar inúmeras informações acerca da última fase de aparafusamento. A última fase de aparafusamento é extremamente importante porque é o momento em que é realizado o aperto final, ou seja, parte do aparafusamento onde o binário colocado é mais alto e por vezes, é necessário obter informações acerca do programa para ter em atenção se é o programa indicado a realizar em determinado aperto. Este programa faz uma descrição aprofundada sobre todos os parâmetros colocados para o aperto final.

O *MID* 0012 é o comando utilizado para fazer o pedido à máquina que responde posteriormente através do *MID* 0013 com as seguintes informações:

- Número do programa de aparafusamento – o número apresentado encontra-se sempre entre 0 e 99 como já tinha sido referido;
- Nome do programa de aparafusamento – nome dado ao programa normalmente para identifica-lo e distingui-lo de todos os outros programas;
- Direção de rotação – é possível perceber se estamos perante um programa de aperto ou desaperto;

- Binário mínimo – binário mínimo que pode ser atingido pelo aparafusamento sem que seja detetada anomalia no aperto;
- Binário máximo – binário máximo que pode ser atingido sem por em risco o aperto realizado;
- Binário alvo – valor ideal para o aperto final. Usualmente, é valor que se localiza exatamente no centro entre o intervalo de binário mínimo e binário máximo;
- Ângulo mínimo – número de voltas mínimas a realizar pela ponteira de aperto;
- Ângulo máximo – número de voltas máximas a realizar pela ponteira de aperto;
- Ângulo alvo – valor ideal de voltas a realizar no aperto final.

Seguidamente, através da figura 80 podemos verificar que apesar de ser pedida a informação sobre o programa, antes é necessário disponibilizar todos os programas disponíveis através do *MID* 0010

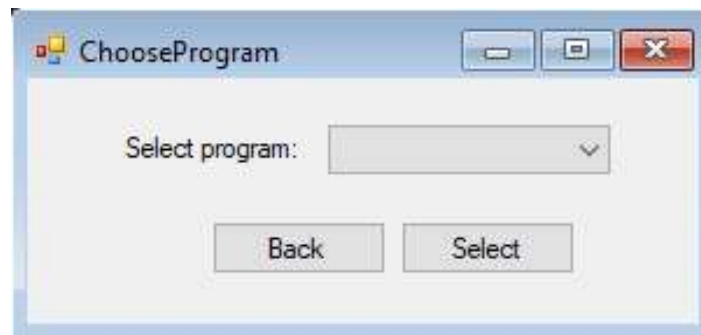


Figura 80 - Informação sobre programa de aperto

Tightening Info

Os dados de aparafusamento são extremamente importantes para que o utilizador possa analisar intensivamente de forma a otimizar o processo. Sempre que é necessário pedir informações sobre o aperto, o *MID* 0064 permite fazer um pedido à máquina de todas as informações retiradas durante e após a realização do processo. Por outro lado, o *MID* 0065 é o pacote de dados utilizado pela aparafusadora para disponibilizar todos os dados importantes através de uma caixa de texto apresentada pelo aplicativo. Este pacote de dados apresenta 3 revisões diferentes, sendo que aquela que é utilizada é a versão mais

completa. Por isso, e tendo em conta que existem diversos parâmetros usados neste pacote, existem várias informações que podem ser obtidas através deste *MID*, sendo que das mais importantes destacam-se:

- ID de aparafusamento – número que é incrementado para cada resultado obtido de aperto;
- Número do programa de aparafusamento – é possível saber qual foi o programa realizado;
- Valor do contador OK – contador de aparafusamentos bem-sucedidos;
- Estado de aparafusamento – permite perceber se o aparafusamento foi bem realizado ou não;

Calibration

Este pacote permite colocar o fator da capacidade da máquina para produção quando se realiza um teste e se pretende realizar a calibração da máquina para determinado processo, definindo o valor de requisito de forma a calibrar da melhor forma a máquina. O *MID* 0045 é o pacote utilizado para a realização da calibração, no entanto, o comando de resposta não retorna qualquer dado, sendo apenas enviado um comando de aceitação ou erro do pacote.

Activation Signals

O *Activation Signals* permite ao controlador da aparafusadora ter inputs e outputs através do Rexroth Open Protocol. Por isso, são apresentadas 16 entradas possíveis que quando devidamente parametrizadas podem ser utilizadas para ativar as entradas através da colocação no pacote de uma palavra em binário. Por outro lado, essas palavras também podem originar saídas, saídas essas que podem ser ativadas através do *MID* 0501. O *MID* utilizado para a ativação de entradas é o *MID* 0504. Na figura 81 é mostrada a janela onde é possível introduzir a palavra binária de 16 dígitos.

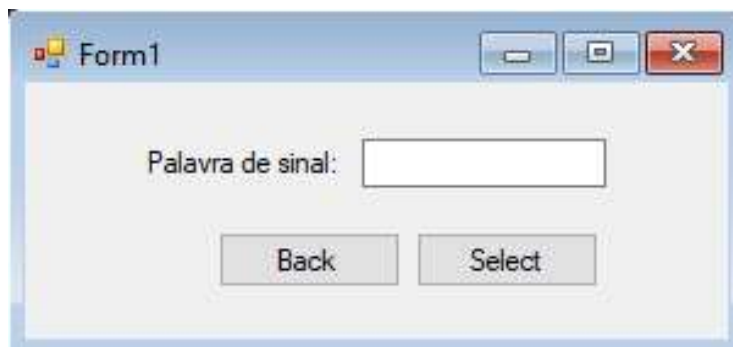


Figura 81 – Palavra de sinal a enviar através de MID 0504

Através da figura 81, podemos verificar que é possível colocar a palavra já referida anteriormente, que deve ser escrita tendo em conta a tabela 5 apresentada em seguida.

Tabela 5 - Palavra do MID 0504

OPEN PROTOCOL INPUTS	NÚMERO DO BIT NA PALAVRA
0.0	1ºbit
0.1	2ºbit
0.2	3ºbit
0.3	4ºbit
0.4	5ºbit
0.5	6ºbit
0.6	7ºbit
0.7	8ºbit
1.0	9ºbit
1.1	10ºbit
1.2	11ºbit
1.3	12ºbit
1.4	13ºbit
1.5	14ºbit
1.6	15ºbit
1.7	16ºbit

Text Message

A opção *Text Message* permite ao utilizador escrever uma mensagem que posteriormente será possível ver no *display* da aparafusadora. Esta opção pode ser realizada através do pacote de dados *MID* 0111, que permite ao utilizador escrever 4 linhas de texto tendo em cada linha 16 caracteres. Seguidamente, será possível verificar a janela onde é possível escrever o texto através da figura 82.

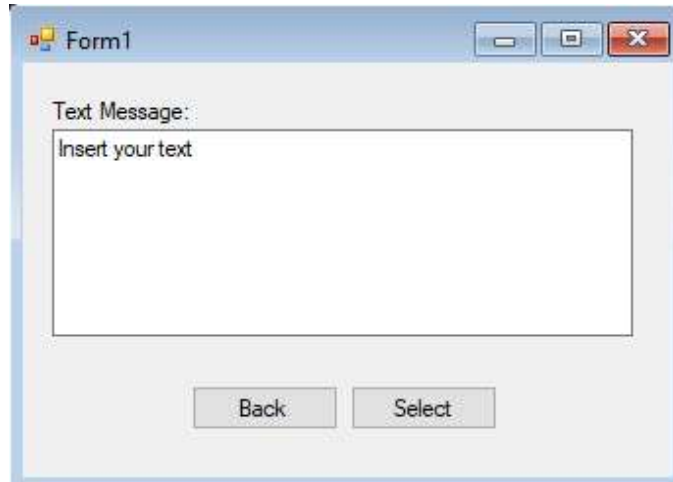


Figura 82 – Janela de texto para MID 0111

Através do *MID* apresentado acima, podemos verificar que é possível criar mensagens de texto para cada tarefa realizada na aparafusadora. É possível por exemplo, colocar mensagens quando os aparafusamentos são bem ou mal realizados. Podemos então concluir que, este *MID* pode ser utilizado de forma extremamente versátil para criar avisos ou informações.

Na figura 83, é possível verificar o envio do *MID* 0111 referente à mensagem de texto.

```

var mid00040 = "0137" + "0111" + "001" + "0" + "00000000" + "100001" +
"11111" + linha1 + "11111111111111" + linha2 + "11111111111111" + linha3 + "11111111111111" + linha4 + "111111111111" + "\0";

var mid = Encoding.ASCII.GetBytes(mid00040);

var stream = server.GetStream();

stream.Write(mid, 0, mid.Length);

if (stream.CanRead)
{
    var size = 101;

    var midResp = new Byte[size];

    var aux = stream.Read(midResp, 0, size);

    var textResp = Encoding.ASCII.GetString(midResp, 0, size);
}

```

Figura 83 - Código do envio da mensagem de texto

Através da figura 83 acima representada, podemos verificar a existência de 4 linhas disponíveis para a introdução de caracteres. Cada linha é composta por 15 caracteres, podendo o utilizador colocar um máximo de 60 caracteres em simultâneo no display da

aparafusadora. Este *MID* 0111 é extremamente importante, principalmente quando se pretende programar mensagens de texto personalizadas.

3.4 Dados e resultados

O envio e receção de resultados concede a possibilidade ao utilizador de controlar cada fase dos apertos que efetua de forma minuciosa e detalhada, permitindo com isso melhorar o método de aperto tornando-o otimizado e controlando qualquer tipo de falha que possa surgir.

Para conseguir receber os dados, foi preliminarmente necessário configurar um servidor no computador que permitisse trocar informação com a máquina. O servidor foi criado localmente de forma a poder simular a possibilidade de colocação de informações numa base dados ou noutra dispositivo qualquer. Para conseguir estabelecer a ligação entre o computador e aparafusadora, foi necessário recorrer ao programa *Filezilla*.

O envio de dados é feito através da aparafusadora de forma automática assim que é realizado um aperto, sendo recebido os dados no servidor, neste caso o computador, que armazena o ficheiro num diretório, como se pode verificar através da figura 84.

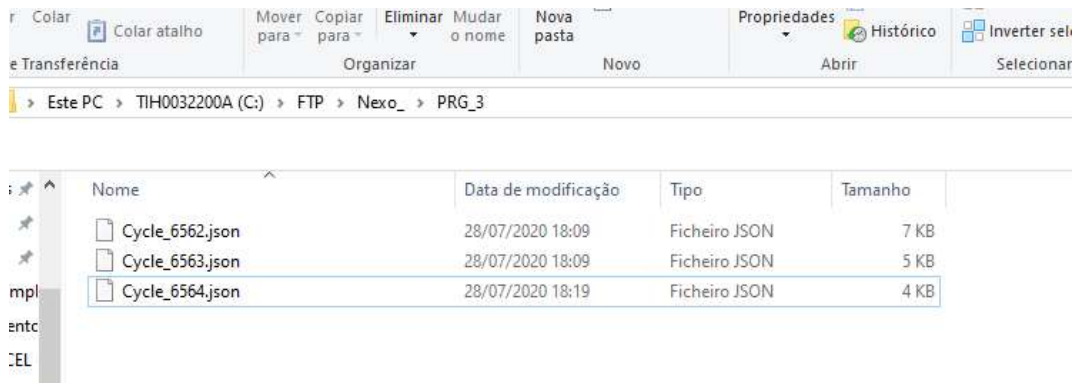


Figura 84 - Diretório de receção de dados

Como indicado na figura 84 previamente apresentada, podemos verificar que os dados são colocados no diretório C: numa pasta chamada *FTP* e, posteriormente, a própria

aparafusadora cria as pastas e os ficheiros enviando cada ficheiro para a pasta do programa correspondente.

Os ficheiros criados pela máquina são ficheiros com a extensão **json* porque este tipo de ficheiro permite ao utilizador usar um programa simples, como o *notepad* para conseguir analisar os dados obtidos, como se pode ver através da figura 85 apresentada abaixo.

```

R
  "nr": 1,
  "result": "NOK",
  "channel": "",
  "prg nr": 3,
  "prg name": "Apriete 8Nm",
  "prg date": "2020-07-14 11:38:34",
  "cycle": 6562,
  "nominal torque": 31,
  "date": "2020-07-28 18:09:06",
  "id code": "",
  "torque unit": "Nm",
  "last cmd": "Cw->0",
  "quality code": "130",
  "total time": "0.686000",
  "tool serial": "717902753",
  "rework code": 0,
  "rework text": "",
  "cell id": "0000",
  "job nr": -1,
  "MCE factor": 1.234000,
  "batch nr": "-1",
  "batch canceled": -1,
  "batch direction OK": -1,
  "batch direction NOK": -1,
  "batch max OK": -1,
  "batch max NOK": -1,
  "batch OK": -1,
  "batch NOK": -1,
  "tightening steps": [{
    "result": "NOK",
    "name": "Soltado",
    "step type": "standard",
    "row": "2",
    "column": "A",
    "category": 0,
    "last cmd": "Cw->0",
    "torque": -1.497000,
    "angle": 194.580000,
    "duration": 0.686000,
    "quality code": "130",
    "speed": -50,
    "angle threshold nom": 0,
    "angle threshold act": -1.934000,
    "tightening functions": [{
      "name": "TF Angle",
      "nom": 720,
      "act": 193.170000
    }, {
      "name": "MFs TimeMax",
      "nom": 10,
      "act": 0.686000
    }, {
      "name": "MF TorqueMin",
      "nom": -10,
      "act": -1.497000
    }, {
      "name": "MFs TorqueMax",
      "nom": 10,
      "act": -1.497000
    }, {
      "name": "MF AngleMin",
      "nom": 700,
      "act": 194.580000
    }, {
      "name": "MFs AngleMax",
      "nom": 750,
      "act": 194.580000
    }
  ]
}, {
  "name": "MFs TimeMax",
  "nom": 10,
  "act": 0.686000
}, {
  "name": "MF TorqueMin",
  "nom": -10,
  "act": -1.497000
}, {
  "name": "MFs TorqueMax",
  "nom": 10,
  "act": -1.497000
}, {
  "name": "MF AngleMin",
  "nom": 700,
  "act": 194.580000
}, {
  "name": "MFs AngleMax",
  "nom": 750,
  "act": 194.580000
}
], {
  "graph": {
    "angle values": [0, 1.180000, 2.350000, 3.5300
0, 110.690000, 111.860000, 113.040000, 114.210000, 115.390000, 116.560000, 117

```

Figura 85 - Dados apresentados no ficheiro **json*

Considerando a figura 85 precedentemente apresentada, verificamos que o ficheiro enviado pela máquina é extremamente completo, apresentando todos os valores que foram retirados durante o aperto. Este ficheiro permite retirar muitas informações e é muito mais completo do que o pacote de dados *MID 0065* porque proporciona ao utilizador a possibilidade de verificar todos os valores de ângulo medidos no aperto, possibilitando a criação de gráficos posteriormente, através do tratamento de dados.

O ficheiro de dados apresenta diversos dados sobre o aparafusamento, informação essa que necessita de tratamento para que seja mais fácil analisar pelo utilizador. Existem várias formas de tratar a informação recebida pelo utilizador, usualmente recorre-se a bases de dados que sejam capazes de tratar esta informação de forma completamente automática. Este tratamento é possível devido ao corpo de texto apresentado no ficheiro ser sempre similar, o que permite recolher a informação sempre da mesma forma, isto é,

os parâmetros que são utilizados em qualquer aperto são sempre os mesmos, a única informação que muda é valor de cada parâmetro devido às diferenças entre apertos.

A aplicação criada trata também os dados sempre que há um aparafusamento sem que o utilizador necessite de fazer nada. Os dados são tratados de forma automática e enviados para uma base de dados *MySQL* local, que é criada através do programa *Xampp* como se pode verificar através da figura 86.

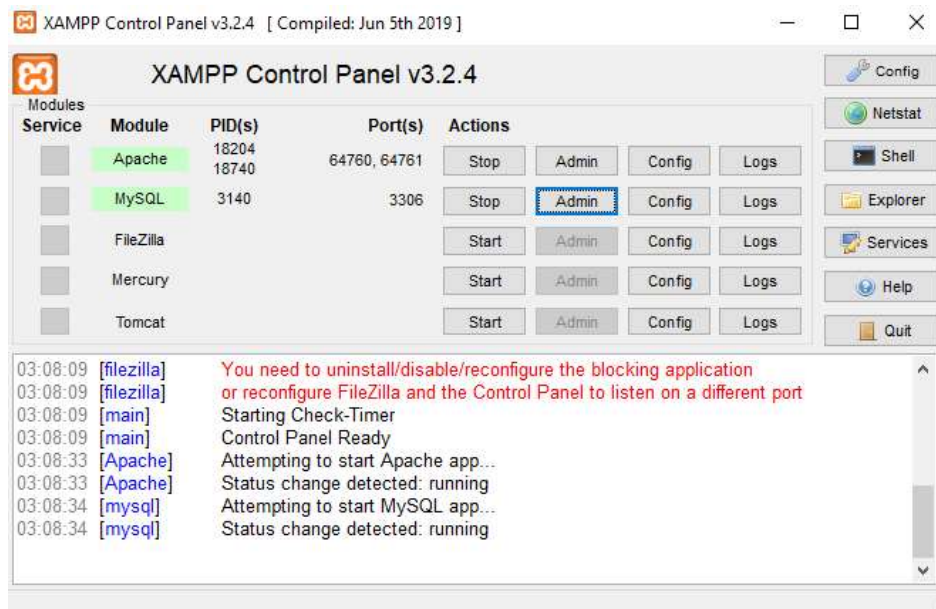


Figura 86 - Programa "Xampp"

Posteriormente, os dados são colocados na base de dados *MySQL*. A aplicação escreve todas as informações que obtém dos ficheiros **json* e coloca de forma organizada. No entanto, inicialmente é imprescindível criar as tabelas necessárias através do código, colocando todas as colunas pretendidas e com a respetivas formatações como apresenta a figura 87.

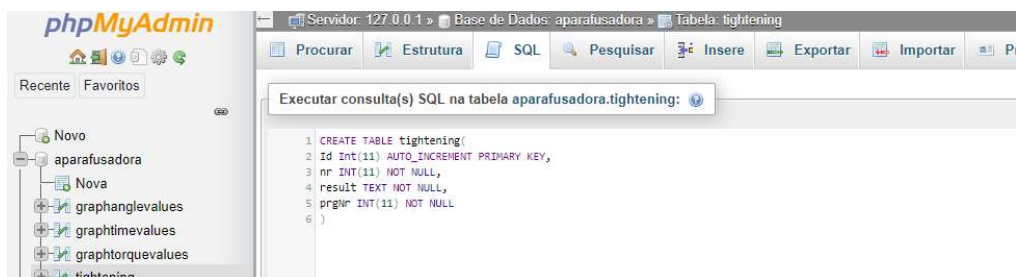


Figura 87 - Código de criação de uma tabela na base de dados

Tendo em conta a figura 87, podemos ver como se cria uma tabela numa base de dados. Por outro lado, verificamos que a tabela criada apresenta uma coluna de autoincremento, isto é, a coluna faz a contagem automaticamente sempre que recebe um aperto sem que haja necessidade de ser a aplicação a organizar a contagem. Por outro lado, a coluna é também a *primary key*, ou seja, nunca pode ser nula.

As tabelas geradas devem ir de encontro à solução que o utilizador pretende. Neste caso, a aplicação desenvolvida ia buscar os dados do ficheiro *.json do aparafusamento realizado e organizava a informação da melhor forma. Todas as informações contidas no ficheiro são colocadas em tabela sendo que para a colocação de toda a informação sobre um aperto, é necessário recorrer a 4 tabelas que apresentam dependências entre elas de forma a compactar a informação. As tabelas utilizadas para a colocação dos dados são:

- Tabela geral, onde são apresentados os principais dados de aparafusamento;
- Tabela das etapas do aparafusamento, onde são apresentados os dados que foram previamente parametrizados;
- Tabela das funções de aperto, onde é especificado os limites e as funções de binário e ângulo;
- Tabelas de gráficos, onde são apresentadas respetivamente as coordenadas de binário, ângulo e tempo do aparafusamento realizado permitindo posteriormente a criação de gráficos para análise.

No seguimento do trabalho, está apresentada a tabela geral de aparafusamento através da figura 88. Esta figura apresenta as colunas de uma das tabelas necessárias para guardar de forma correta toda a informação proveniente do aparafusamento.

#	Nome	Tipo	Agrupamento (Collation)	Atributos	Nulo	Predefinido	Comentários	Extra	Ações
<input type="checkbox"/>	1 nr	int(11)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	2 result	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	3 channel	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	4 prgNr	int(11)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	5 prgName	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	6 cycle	int(11)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	7 prgDate	datetime			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	8 nominalTorque	int(11)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	9 date	datetime			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	10 idCode	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	11 torqueUnit	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	12 lastCmd	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	13 qualityCode	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	14 totalTime	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	15 toolSerial	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	16 reworkCode	int(11)			Não	Nenhum			Muda Elimina Mais
<input type="checkbox"/>	17 reworkText	mediumtext	utf8mb4_general_ci		Não	Nenhum			Muda Elimina Mais

Figura 88 - Tabela geral do MySQL

Na figura 88, estão colocadas todas as colunas da tabela geral, que serão utilizadas para organizar a informação proveniente da aplicação. A informação obtida é guardada nas suas 4 tabelas que se encontram conectadas entre si. Para haver a conexão entre as diversas tabelas, é necessário recorrer a *foreign keys* que permite criar a ligação entre tabelas. A figura 89 mostra o código necessário para a alteração da tabela para tornar uma coluna *foreign key*.

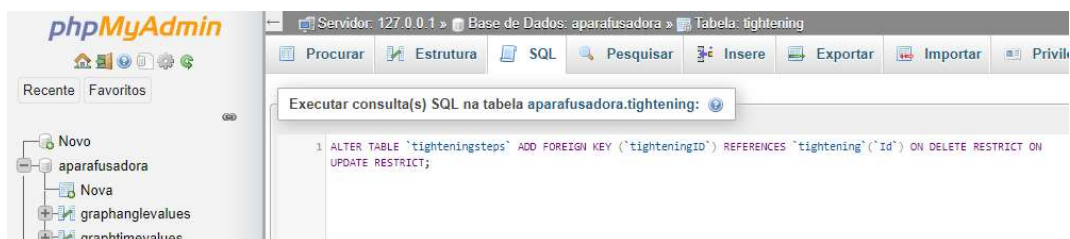


Figura 89 - Código para criar uma foreign key

De seguida, e a partir do momento em que as tabelas estão configuradas da forma pretendida, são introduzidos todos os dados obtidos no ficheiro *.json. Para se colocar a informação dos dados na tabela, é necessário recorrer à aplicação que é capaz de tratar os dados do aperto e enviá-los para as tabelas através do código apresentado na figura 90.

```

var connectionString = "Server=127.0.0.1;Database=aparafusadora; Uid=equinotec;Pwd=h3isqNIq^VWT;";

var queryTightening =
@"INSERT INTO tightening (
nr,
result,
channel,
prgNr,
prgName,
cycle,
prgDate,
nominalTorque,
date,
idCode,
torqueUnit,
lastCmd,
qualityCode,
totalTime,
toolSerial,
reworkCode,
reworkText,
cellId,
jobNr,
MCEFactor,
batchNr,

```

Figura 90 – Código de introdução das informações na base de dados através da aplicação

Na figura 90, podemos atestar a existência de uma conexão criada para o envio de dados através do aplicativo utilizando o comando *insert*, que permite escrever os dados que se encontram no ficheiro **json* na base de dados.

3.5 Interpretação de resultados

A interpretação de resultados é uma das partes mais importantes quando estamos na presença de aparafusamentos críticos, como os da indústria automóvel, por isso, a existência de uma base dados que seja capaz de guardar todos apertos e que disponibilize os dados quando pedido, torna-se parte fundamental do processo.

Quando queremos consultar uma base de dados, existe a necessidade de efetuar uma leitura de um determinado elemento. Essa leitura permite-nos obter informações sobre os dados do aperto que foram previamente guardados. Na figura 91, é possível constatar que através do comando *select* é possível obter os dados.

```

var query = " SELECT time, torque FROM graph WHERE tighteningStepId = 6;";

```

Figura 91 - Comando para leitura da base de dados

Tendo em conta o comando apresentado anteriormente, este permite-nos ir à base de dados ler as colunas pretendidas da tabela mencionada.

Este comando tornou-se fundamental na realização dos resultados gerados pois permitiu a criação de três gráficos. Subsequentemente, está apresentado o gráfico Ângulo/Tempo através da figura 92.

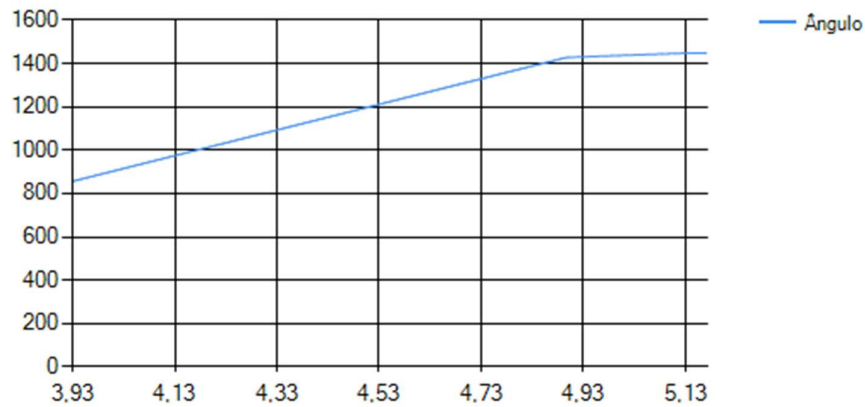


Figura 92 – Gráfico Ângulo/Tempo

A figura 92 permite ao utilizador saber qual o ângulo de aparafusamento durante o tempo de aperto, permitindo uma prevenção por parte dos utilizadores que recorrem a uma exaustiva avaliação de um grande número de apertos, ou seja, permite ao utilizador verificar ao fim de dois ou três meses se a máquina continua, por exemplo, a realizar o mesmo ângulo de aperto para o mesmo processo, daí a importância de salvar todos os dados para mais tarde estes serem analisados.

Além do gráfico de ângulo, foi também criado o gráfico de binário apresentado na figura 93, que permite ao utilizador analisar o comportamento do binário ao longo do aparafusamento permitindo verificar as possíveis falhas do processo que possam vir a existir e otimizar da melhor forma o aperto.

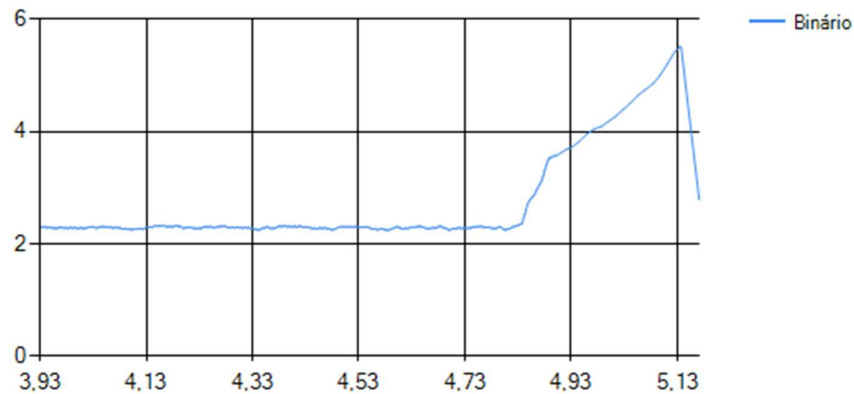


Figura 93 – Gráfico Binário/Tempo

Por último, foi também realizado um gráfico que permite a relação direta entre ângulo e binário de forma a analisar o comportamento de ambos em simultâneo.

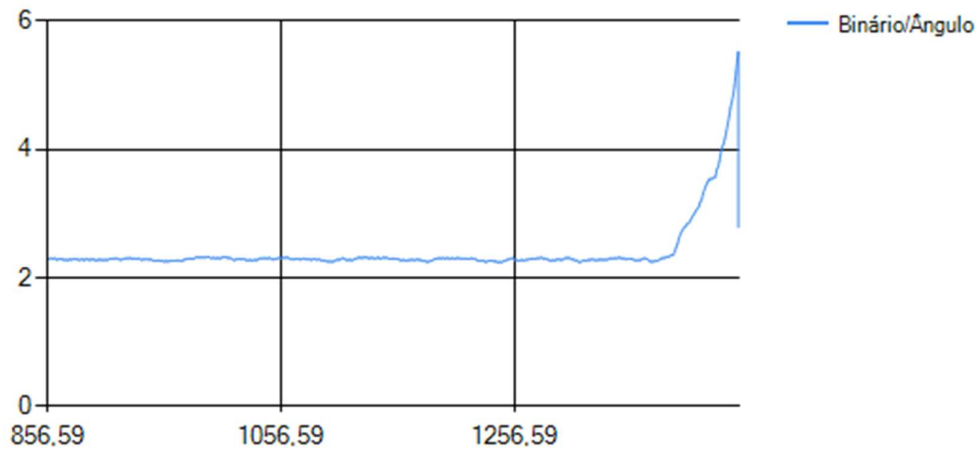


Figura 94 - Gráfico Binário/Ângulo

Levando em conta os gráficos apresentados, podemos verificar também que é possível realizar inúmeras outras análises com as informações sobre os apertos que estão na base de dados. Existe por exemplo, a possibilidade de comparar vários aparafusamentos com o mesmo programa e conseguir perceber quais os desvios que há em cada um dos apertos realizados, ou seja, a informação armazenada pode ser diretamente utilizada para ajudar a calibrar a máquina. Por outro lado, este relatório de todos os apertos realizados no dia, permite-nos ir buscar outros detalhes como o operador que executou o aperto, o aperto em que a máquina atingiu maior binário realizado ou o rácio de apertos bem e mal-sucedidos.

Por último, é necessário referir que todos estes elementos são muito importantes para que seja realizada uma análise bem feita de todas as operações que a máquina fez de forma a corrigir erros, otimizar ao máximo o aperto e garantir que o produto produzido cumpre todas as normas de qualidade e segurança.

4. Conclusões

4.1 Análise Conclusiva

A realização deste estudo teve como principal objetivo desenvolver uma aplicação que permitisse utilizar comandos da aparafusadora *Bosch Rexroth Nexo* de forma completamente automática, de modo a simular o controlo que os *PLC's* têm sobre os sistemas de aparafusamento. Este relatório permitiu demonstrar também a grande capacidade de transmissão de dados que as aparafusadoras industriais têm, de forma a fornecer todos os dados importantes de um aparafusamento ao utilizador.

Inicialmente, para ser possível perceber todo o tipo de dados enviados pela aparafusadora e todo o tipo de comandos, foi necessário perceber o processo de aparafusamento e principalmente os tipos de controlo de aperto que são realizados pelos transdutores redundantes deste tipo de máquinas. As máquinas industriais apresentam, além dos tipos de controlo de aperto, programas de aparafusamento que podem ser realizados por fases permitindo a utilização de cada controlo de aperto de acordo com a fase em que está o processo. Posto isto, podemos verificar a elevada versatilidade de aparafusamento da máquina.

Além da versatilidade, as máquinas são submetidas a diversos testes de calibração do equipamento de forma a aumentar a precisão e a reduzir o erro associado ao aparafusamento. São também realizados testes de máquina para o processo como o teste de capacidade da máquina e o teste de homologação que permitem calcular o C_m e o C_{mk} de forma a perceber se para um determinado processo, a máquina apresenta repetibilidade e precisão nos apertos que realiza. O teste de homologação permite também perceber se a máquina está bem adequada a realizar determinado processo.

A calibração é extremamente importante para o normal funcionamento da máquina e deve ser realizada periodicamente de forma à ferramenta apresentar o melhor funcionamento possível. Na indústria automóvel, é necessário que as máquinas estejam sempre extremamente bem calibradas de forma a evitar a produção de produtos não conformes, que posteriormente possam colocar a vida do utilizador em risco, em caso do fabricante não identificar o erro de produção.

Assim sendo, a transmissão de dados assume-se como uma das tarefas mais importantes a realizar pelas aparafusadoras industriais permitindo ao fabricante controlar minuciosamente cada parâmetro de um dado aperto. Deste modo, a aplicação criada apresenta além da possibilidade de controlo remoto, a transmissão de dados entre aparafusadora em base de dados *MySQL* onde são armazenados todos os dados obtidos dos apertos. A base de dados permite também ao utilizador manipular os dados que estão armazenados permitindo por isso, a criação de gráficos de binário, ângulo e binário-ângulo de forma a ajudar o utilizador a corrigir possíveis falhas existentes durante um processo de aparafusamento.

Para concluir, a transmissão de dados permite ao utilizador reduzir substancialmente a produção indevida de produtos, aumentando a produtividade e segurança das máquinas de aparafusamento, diminuindo a probabilidade de uma empresa produtora ser responsável pela produção de um produto que coloquem em risco um utilizador.

4.2 Trabalhos futuros

O presente trabalho apresenta alguns pontos que, no futuro, podem ser alvo de nova abordagem tendo em vista o seu melhoramento.

Um dos pontos que pode ser melhor explorado é, então, as características relacionadas com as aparafusadoras elétricas, de um modo mais aprofundado, permitindo a compreensão de forma mais pormenorizada do processo de funcionamento.

Outro elemento, que seria fundamental ter um estudo mais aprofundado, é a exploração do resto das tarefas que a aparafusadora elétrica industrial é capaz de realizar, como a possibilidade de identificação de um parafuso que seleciona automaticamente um programa antes do aparafusamento ser realizado.

O aplicativo criado apresenta inúmeras funções do sistema de aparafusamento, no entanto, existem outras funções que não foram utilizadas e que também devem ser exploradas de forma a complementar e completar a aplicação.

Por fim, um trabalho futuro iria ter um papel importante na complementação deste relatório pois, apesar da complexidade apresentada, as aparafusadoras elétricas industriais

são um assunto de grande magnitude e que tem muitas vertentes que necessitam de ser exploradas.

Referências

- Assay, B. (2018). *Open Protocol. October*, 11–80. [http://products.asg-jergens.com/Asset/ASG EH2 Series Open Protocol.pdf](http://products.asg-jergens.com/Asset/ASG_EH2_Series_Open_Protocol.pdf)
- Atlas Copco. (n.d.-a). *Como fazer controle de qualidade com medição de torque estática e dinâmica?* Atlas Copco. <https://fabricasinteligentes.atlascopco.com/2018/10/medicao-de-torque/>
- Atlas Copco. (n.d.-b). *TENSOR STB Cordless freedom*.
- Atlas Copco. (2013). Calibration and testing of tightening systems pocket guide Calibration services. *Atlas Copco*, 1–38. [https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/pocketguides/5124_Pocket Guide on Callibration.pdf](https://www.atlascopco.com/content/dam/atlas-copco/industrial-technique/general/documents/pocketguides/5124_Pocket_Guide_on_Callibration.pdf)
- Atlas Copco. (2015). MEASUREMENT AND CALIBRATION FOR TIGHTENING SYSTEMS. *Atlas Copco*, 1–52.
- Baramsky, N., Seibel, A., & Schlattmann, J. (2018). Friction-Induced Vibrations during Tightening of Bolted Joints—Analytical and Experimental Results. *Vibration*, 1(2), 312–337. <https://doi.org/10.3390/vibration1020021>
- Bolt Science. (2018). *Tutorial on the Basics of Bolted Joints*. <https://www.boltscience.com/pages/basics4.htm>
- Bosch Rexroth. (2013). *Rexroth Tightening System 350* (3 608 878 303).
- Bosch Rexroth. (2014a). *Fuso de parafusamento da Rexroth* (3 608 870 0PT).
- Bosch Rexroth. (2014b). *Homologation*.
- Bosch Rexroth. (2017). *Parafusadeira a bateria Nexo da Rexroth*.
- Bosch Rexroth. (2018a). *Rexroth Tightening Systems*. 163.
- Bosch Rexroth. (2018b). *Tightening System - EST-Sys350-I-Prog/Software [Powerpoint]* (pp. 1–100).
- Bosch Rexroth España. (2016). *Teoria Del Atornillado [PowerPoint]* (pp. 1–24).
- Bosch Rexroth España. (2019). *NEXO Atornillador Inalambrico [Powerpoint]* (pp. 1–21).
- Chagas. (2020). *Tabela de preços*. 1–9. [http://www.chagas.pt/ESW/Files/TB 526 - Parafusos Cab. Sext. Zincados.pdf](http://www.chagas.pt/ESW/Files/TB_526_-_Parafusos_Cab._Sext._Zincados.pdf)
- Deprag. (n.d.). *Tightening Process*. <https://www.deprag.com/en/screwdriving-technology/technical-information/tightening-process/>
- DIN 6915, 3 (1999). <http://itc.co.ir/wp-content/uploads/2015/01/DIN-6915.pdf>
- DIN 931, Din 931: Parafusos de cabeça hexagonal M 1,6 a M 39 7 (1987). <http://www.sinofastener.com/uppics/201010161010087778.pdf>
- Enerpac. (n.d.). *Bolting Theory*. Teoria de Aparafusamento. <https://www.enerpac.com/pt-br/treinamento/e/bolting-theory>

- EURAMET/cg-14. (2007). *Guidelines on the Calibration of Static Torque Measuring Devices*. July.
- Fernandes, R. de S. (2018). *Modelagem e Simulação do Processo de Aparafusamento*. Centro Universitário da FEI.
- Frischmann, A. V., & Bittencourt, H. R. (2013). *Procedimento para avaliação de ferramentas pneumáticas de parafusamento baseado na norma ISO 5393*. 12–28.
- Gaspar, J. T. de M. (2017). *Desenvolvimento de um dispositivo para aparafusamento do teto panorâmico de um veículo automóvel*. Universidade Nova de Lisboa.
- IATF 16949, 1 (2016).
- NP EN ISO 9001, Instituto Português da Qualidade 1 (2015).
- Jr., H. N. (2003). *Estudo da relação torque x força tensora e do coeficiente de atrito tensora e do coeficiente de atrito*. 194.
- Lima, N. (2019). *Metodologia Kaizen-Lean e Indústria 4.0 na Manutenção*. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
- Marcelino, R. (2013). *Sistemas de Engenharia - Automação e Instrumentação*. [https://redmine.fe.up.pt/attachments/download/5424/Estado de arte dos carregadores V1.pdf](https://redmine.fe.up.pt/attachments/download/5424/Estado_de_arte_dos_carregadores_V1.pdf)
- Maurício, F. (n.d.). *Qualidade - SPQ [Powerpoints de GISEQ]* (pp. 1–25).
- Melo, P. M. A. de S. (2019). Motores de propulsão em veículos elétricos: tipos, características e perspectivas de evolução. *Neutro à Terra*.
- Nielsen, M. (n.d.). *Statistical Process Control*. <https://www.statisticalprocesscontrol.info/glossary.html>
- Rodrigues, J. P. F. (2015). *Estudo e melhoramento de técnica de aparafusamento de um autorrádio*. Universidade do Minho.
- Santos, R. C. (2018). Proposta de modelo de avaliação de maturidade da Indústria 4.0 [Instituto Superior de Engenharia de Coimbra]. In *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*. <https://comum.rcaap.pt/bitstream/10400.26/25346/1/Reginaldo-Carreiro-Santos.pdf>
- SCS Concept Group. (n.d.). *Statistical process control*. Statistical Process Control. <https://www.scsconcept.com/statistical-process-control/>
- Shah, V. (n.d.). *Adhoc mode vs Infrastructure mode*. https://www.researchgate.net/figure/Ad-hoc-mode-vs-Infrastructure-mode-IEEE80211-introduced-many-types-of-the-Wi-Fi_fig1_316175326
- SV Enterprises. (n.d.). *Torque-controlled Tightening Method*. http://sventer.co.in/Tightening_method.html#Torque
- VDI 2230, Design 117 (2003). https://www.vdi.de/fileadmin/pages/vdi_de/redakteure/richtlinien/inhaltsverzeichnis/2360550.pdf
- VDI 2647, 1 (2017).

VDI 2862, 1 (2012).