

DAS Departamento de Automação e Sistemas
CTC **Centro Tecnológico**
UFSC Universidade Federal de Santa Catarina

Sistema Poka-Yoke para Controle de Torque na Montagem de Motores Elétricos

*Relatório submetido à Universidade Federal de Santa Catarina
como requisito para a aprovação na disciplina
DAS 5511: Projeto de Fim de Curso*

Richard Cristiano Gris

Florianópolis, Agosto de 2015

Sistema Poka-Yoke para Controle de Torque na Montagem de Motores Elétricos

Richard Cristiano Gris

Esta monografia foi julgada no contexto da disciplina
DAS5511: Projeto de Fim de Curso
e aprovada na sua forma final pelo
Curso de Engenharia de Controle e Automação

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira

Assinatura do Orientador

Banca Examinadora:

Daniel Goncalvez Sanchez
Orientador na Empresa

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira
Orientador no Curso

Prof. <nome do professor avaliador>
Avaliador

<nome aluno 1>
<nome aluno 2>
Debatedores

Agradecimentos

Sem a minha família, certamente eu não teria chego tão longe, e tão rapidamente. Por isso agradeço imensamente à minha mãe, que desde muito cedo se esforçou para nos colocar em boas escolas, não medindo esforços para tal. A ela que, por ser professora, sempre teve gosto pelos estudos e sempre soube como isso era importante, que nunca deixou faltar livros de histórias ou gibis quando éramos crianças, tampouco deixou de nos ajudar com as lições conforme seguíamos com os estudos. Ao meu pai que, apesar de vir do campo, sabia da importância de cursar uma universidade e sempre trabalhou muito para prestar como podia seu apoio a mim e ao meu irmão, pois desejava – e deseja - do fundo do coração o nosso sucesso. Ao meu irmão que em momentos difíceis, muitos dos quais ele já havia passado, esteve a postos para me aconselhar. Agradeço a minha namorada que esteve ao meu lado no último ano, o mais difícil e decisivo da minha vida acadêmica, quando nossa linda filha nasceu. E claro, à Catarina, minha filha, que me mostrou que eu realmente podia fazer - e ser – mais, não somente estudar e trabalhar, mas também ser pai e fazer isso com gosto. Ela que me mostrou que “imprevistos” por vezes acontecem por alguma razão e que não devemos parar para nos lamentar ou pensar no que poderia ter sido feito para evitá-los: devemos olhar para o que temos em mãos e fazer o melhor possível com isso, olhando sempre para a frente.

Meus sinceros agradecimentos à empresa WEG Equipamentos Elétricos e seu time de pessoas muito dedicadas, que me permitiram realizar esse estágio de grande aprendizado profissional e pessoal. Também agradeço à empresa por ter confiado e investido recursos em meu projeto. Não apenas nesse projeto, mas em todos os outros trabalhos desenvolvidos durante o estágio, tive grande ajuda de inúmeras pessoas, desde operadores de produção, técnicos e engenheiros, com as mais diversas questões. A eles, meu muito obrigado. Agradeço também ao meu gestor, Daniel Gonzalez Sanchez, pelo apoio prestado, pelas conversas e conselhos e por confiar em mim e no meu trabalho para desenvolver esse projeto. Além disso, agradeço muito a equipe de Poka-Yoke da seção Metrologia da WEG, que me ajudou nesse projeto desde a sua concepção até sua implementação.

Resumo

Com o aumento da concorrência no mercado global, pequenas reduções nos custos ou pequenas melhorias de performance ou qualidade podem determinar o sucesso de um produto. Devido a incertezas nos processos de manufatura, uma parte mecânica sempre mostrará variações nas suas características geométricas. A qualidade então frequentemente reflete o quão bem tolerâncias e, portanto, requisitos funcionais, estão sendo alcançados pelo processo de manufatura no produto final. Os motores elétricos são máquinas que exigem grandes transformações de materiais e envolvem muitos processos produtivos até chegar na sua forma funcional, por isso também estão fortemente sujeitos a variações de processo. Nesse sentido, é um desafio para a WEG aprimorar seus processos produtivos investindo em melhorias contínuas, a fim de atender às exigentes demandas de qualidade dos padrões internacionais bem como dos clientes dispostos em todo o mundo, visando otimizar os gastos, reduzir custos e garantir sua competitividade no mercado internacional. Há alguns anos, o CEO Bob Neurath propôs e estruturou um plano de ação com dez pontos estratégicos, focados em retornar ao básico. Afinal de contas, ele ponderou, se nós não somos capazes de fazer o básico com qualidade, como podemos esperar fazer algo a mais? E é exatamente essa a ideia que queremos ressaltar com um procedimento de controle de torque na montagem de motores elétricos. Diferente de processos mais complexos, o processo de montagem pode ser melhorado com a mudança de métodos e práticas ou com menores investimentos. Em um trabalho objetivando o controle do torque de aperto, é importante começar pelo que sabe-se é simples e de fácil execução: efetuando por exemplo uma boa calibração das ferramentas, fornecendo treinamento adequado aos operadores quanto a utilização destas e desenvolvendo mecanismos que possam minimizar a quantidade de erros operacionais, tirando cada vez mais a decisão das mãos do operador. Nesse sentido, um sistema Poka-Yoke de controle de torque através da seleção das ferramentas corretas e calibradas para cada processo, com indicação visual aos operadores, vem de encontro a essas necessidades e tem grande potencial de melhoria dos indicadores de qualidade dos motores.

Abstract

With the increase in competition in today's marketplace, small savings in cost or small increases in performance or quality may determine the success of a product. Due to uncertainties in manufacturing processes, a mechanical part always shows variations in its geometrical characteristics. Quality then often reflect how well tolerances and hence, functional requirements, are being achieved by the manufacturing processes in the final product. The electric motors are machines that go through a rough series of material transformations and involve a lot of productive processes until they reach their final productive state, hence they are also highly subject to process variations. In that regard, it is a challenge for WEG Industries to better its productive processes investing in continuous improvement, willing to fulfill the exigent quality demands from the international standards as well as the customers', these spread all over the globe, with all sorts of needs, intending then to optimize expenses, reduce costs and assure its competitiveness in the international market. A few years ago, CEO Bob Neurath proposed and structured an action plan containing ten strategic bullets, focused on returning to the basics. After all, he pondered, if we aren't capable of doing the basics right, how do we expect to get anything else done? And that is exactly what we want to highlight with such procedure for torque control in an electric motors assembly line. Apart from more complex processes, the assembly process could be improved with bettering of methods and practices or with smaller investments. In a job that attempts to control tightening torque, it is important to start for what is known is simple and of easy execution: making for example a fine calibration of the tools, supplying proper training for operators regarding to their use and developing mechanisms that could lessen the amount of operational mistakes, trying to no longer leave the decision up to the operator's judgment. In that regard, a Poka-Yoke system for torque control through the selection of the correct and calibrated tool for each process, with visual indication for operators, comes right in line with those needs and has great potential of increasing the motors' quality indicators.

Sumário

Agradecimentos	4
Resumo	5
Abstract	6
Figuras	9
Tabelas	10
Fluxogramas	10
Simbologia	11
1. Introdução.....	12
Definições	17
2. Contexto	27
2.1. A empresa	27
2.2. O Departamento de Engenharia Industrial	27
2.3. O problema de Batimento Axial de Flange na WMO	29
2.4. Controle de torque de aperto na WMO.....	32
2.5. Tecnologia do Aperto.....	35
2.5.1. Ferramentas de aperto	36
2.5.2. Calibração de ferramentas	39
2.6. Medição de um lote de motores	40
2.6.1. Instrumentos de medição utilizados	42
2.6.1.1. Relógio comparador	42
2.6.1.2. Torquímetro.....	43
2.7. Capacitação das Fábricas	43
2.8. Procedimento para controle de torque.....	44
3. Métodos e Sistemas de Assistência Na Manufatura	46

3.1.	Jidoka	46
3.2.	Poka-Yoke	47
3.3.	Sistemas Pick by Light.....	48
4.	O Sistema de Seleção de Ferramentas	50
4.1.	Motivação	50
4.2.	Solicitação de projeto para a Metrologia da WEG	51
4.3.	Projeto Elétrico	52
4.4.	Hardware Utilizado	55
4.5.	Código do CLP	55
4.6.	Montagem dos painéis.....	59
4.6.1.	Painel eletrônico	59
4.6.2.	Painel Pneumático	61
4.7.	Suporte para parafusos	63
4.8.	Depuração de erros e testes	65
4.9.	Instalação na Fábrica VI	66
4.10.	Treinamento de operadores	68
4.11.	Problemas encontrados.....	69
4.12.	Resultados Qualitativos	70
5.	Conclusões e Perspectivas futuras.....	73
6.	Bibliografia	76

Figuras

Figura 1 - Detecção de erros no processo.....	14
Figura 2 - Falhas de um componente ao longo do tempo.....	16
Figura 3 – Fata de retilineidade	19
Figura 4 - Falta de coaxialidade.....	19
Figura 5 - Peça com defeito de perpendicularismo.....	19
Figura 6 - Representação da tolerância de Batimento.....	21
Figura 7 - Medição da tolerância de batimento axial	22
Figura 8 - Medição entre pontas	22
Figura 9 - Superfície apoiada em um prisma	22
Figura 10 - Medição de batimento axial em um motor com relógio comparador e base magnética	23
Figura 11 - Estator bobinado presado na carcaça (Encaixe Acabado)	23
Figura 12 - Medidas da carcaça	24
Figura 13 - Processo com alta variabilidade	25
Figura 14 - Processo não centralizado	25
Figura 15 - Processo pouco variável e centralizado	26
Figura 16 - Vista explodida de um motor	29
Figura 17 - Tampa flangeada FF	30
Figura 18 - Cotas de uma tampa flangeada.....	30
Figura 19 - Posto atual de fechamento da tampa dianteira	33
Figura 20 – Forças aplicadas a um parafuso.....	35
Figura 21 - Curva característica de uma junta flexível.....	36
Figura 22 - Curva característica de uma junta rígida	36
Figura 23 - Princípio das ferramentas de impacto	37
Figura 24 - Princípio das ferramentas de impulso	38
Figura 25 - Verificador de torque	40
Figura 26 - Transdutor de torque estacionário.....	40
Figura 27 - Batimento Axial para montagem com os dois tipos de parafusadeiras.....	41
Figura 28 -Torque nas tampas para montagem com os dois tipos de parafusadeiras.....	42
Figura 29 - Base magnética.....	42

Figura 30 - Relógio comparador analógico	43
Figura 31 - Torquímetro de Estalo	43
Figura 32 - Conceitos de Jidoka (Toyota Motor Corporation)	47
Figura 33 - Alimentação do CLP e Expansões	53
Figura 34 – Saídas do CLP	53
Figura 35 - Saídas das Expansões.....	54
Figura 36 - Entradas	54
Figura 37 – CLIC 02 e Expansão de E/S	55
Figura 38 - Variável auxiliar para acionamento das válvulas	58
Figura 39 - Acionamento das saídas das válvulas.....	58
Figura 40 - Tratamento de possível erro operacional	59
Figura 41 - Início da montagem do painel eletrônico	60
Figura 42 - Painel eletrônico posicionado no suporte	60
Figura 43 - Filtro, regulador e lubrificador	62
Figura 44 - Painel Pneumático.....	63
Figura 45 - Compartimentos disponíveis para a escolha do operador.....	63
Figura 46 - Suporte completo para os parafusos.....	64
Figura 47 - Chapas onde são posicionados os sensores e lâmpadas	64
Figura 48 - Testes de software no painel eletrônico	65
Figura 49 -Vista da parte de trás do sistema	67
Figura 50 - Vista lateral do sistema e dos painéis	67
Figura 51 – Vista frontal do sistema instalado na Fábrica VI.....	68

Tabelas

Tabela 1 - Norma DIN 42955 para batimento axial.....	31
Tabela 2 - Range de torque para parafusos	34
Tabela 3 - Comparativo entre Parafusadeira Hidropneumática e de Impacto	41

Fluxogramas

Fluxograma 1 - Funcionamento do Sistema	57
---	----

Simbologia

WMO: WEG Motores.

WAU: WEG Automação.

PCP: Departamento de Planejamento e Controle de Produção

CEO: Comissão de Especificações Operacionais.

GD&T: Geometric Dimensioning and Tolerance (Tolerâncias e Dimensionamento Geométrico).

Range de torque: Faixa de Torque.

RCM: Reliability Centered Maintenance (Manutenção Centrada na Confiabilidade).

1. Introdução

Uma das principais metas da WEG Motores no ano de 2015 é propor uma revisão dos processos críticos da área produtiva. Nesse projeto, o departamento de Engenharia Industrial tem papel fundamental, visto que é a área que prioritariamente lida com processos na empresa. Em processos críticos, entenda-se, principalmente alguns dos processos presentes na fundição, usinagem e montagem. Esses processos têm grande influência na qualidade do produto final e boa parte deles pode ou deve receber melhorias tanto de forma estratégica, com revitalização de métodos, tempos, *layout* ou práticas de produção, quanto de forma física, através da capacitação das fábricas, seja com novas instalações, maquinários ou ferramentais.

O trabalho desenvolvido e apresentado neste documento foi iniciado em um contexto de acompanhamento e auditoria de diversos processos, visando detectar possíveis falhas ou eventuais melhorias a serem propostas. Os processos acompanhados nesse primeiro momento foram principalmente a usinagem e a montagem final. Na usinagem, foi dada especial importância aos subprocessos de usinagem dos fundidos – tampas e carcaças – bem como usinagem do encaixe acabado. Na etapa de montagem do motor, já com os componentes todos prontos e preparados, foram acompanhados os subprocessos de colocação das tampas dianteira e traseira, colocação da tampa defletora, colocação do rotor e eixo no interior do estator, colocação da caixa de ligação, entre outros.

Quando tratamos de montagem de um produto, sabe-se que as partes individuais com tolerâncias especificadas para cada uma das suas características são suscetíveis a acumular essas tolerâncias e, portanto, erros, durante a etapa de montagem, resultando em uma variação das dimensões finais do produto de acordo com a contribuição das diferentes fontes de incerteza. A variação dessas dimensões analisadas decorre do acúmulo de variações dimensionais e geométricas na cadeia de tolerâncias, devido a soma desses erros nos diversos componentes montados. O processo de mensurar e analisar a combinação dessas tolerâncias em uma etapa de montagem é conhecida como Análise de Tolerâncias, e seu principal objetivo é verificar a natureza das variações nas dimensões assistidas ou nas falhas geométricas. É importante que cada organização tenha

alinhado um método próprio e direcionado ao seu processo de análise e tratamento das suas tolerâncias dimensionais.

É interessante ressaltar que, apesar dos esforços em trabalhos para aumento da qualidade e redução de falhas e defeitos, nem sempre as empresas conseguem atingir os níveis de melhoria desejados. Segundo Moore [3] esta situação resulta de as empresas não selecionarem as ferramentas mais adequadas aos seus processos, tanto no que tange à máquinas ou métodos.

Para o principal objeto de estudo do trabalho, os motores flangeados, o maior indicador de qualidade disponível ao cliente final é o batimento axial. Um motor com batimento axial acima do nominal não atende às normas de qualidade ditadas pelos padrões internacionais e pode resultar em problemas de campo, podendo se tornar menos competitivo em mercados consumidores mais exigentes. Sabe-se que muitos fatores influenciam os valores de batimento axial, entre eles a conformidade dos componentes, as furações e usinagens realizadas, os procedimentos utilizados durante a montagem, o transporte dos componentes entre centros de trabalho ou entre fábricas, além do torque de aperto, que por sua vez tem também importante influência nas medidas de batimento, visto que quaisquer variações nessa grandeza podem mudar o posicionamento ou a força de união entre a tampa e a carcaça, influenciando diretamente no batimento.

Por isso, através de acompanhamento de processo, medição da capacidade de máquinas e de cotas críticas de peças, foi detectado que em mais de uma fábrica montadora o processo de montagem nem sempre era capaz de garantir as cotas críticas, como batimento axial, dentro da especificação exigida. As linhas de montagem de motores na empresa são em geral muito pouco automatizadas, por isso, devido à grande intervenção humana, são mais suscetíveis a erros operacionais. Logo, a montagem é de fato um processo que necessita de especial atenção quando se trata de garantir uma adequada inspeção e prevenção de falhas, visando atender aos requisitos de qualidade desejados.

Detectou-se, por conseguinte que o método de aperto dos parafusos da tampa não era suficientemente robusto, e as ferramentas de aperto utilizadas em algumas fábricas montadoras não eram capazes de atender ao processo. Assim, num primeiro momento foi proposta a capacitação das fábricas com ferramentas mais eficientes e que pudessem atender devidamente ao processo, além de

elaborado um procedimento destinado à área produtiva para utilização, manutenção e calibração de ferramentas de aperto.

Sabe-se que, além de garantir os métodos, os tempos de processo, a capacidade das ferramentas e máquinas utilizadas, é necessário eximir a produção de erros tanto quanto possível. É necessário desenvolver mecanismos que tirem as decisões da mão do operador, que guiem suas operações e facilitem seu trabalho no sentido de evitar falhas e a consequente redução da qualidade ou aumento do custo de retrabalho. É fato que, quanto mais tarde um erro é detectado na montagem, mais custoso é para eliminar tal erro e seus efeitos. Segundo estudos do Atlas Copco Group, durante a montagem de um produto, se o erro for detectado na primeira estação de trabalho, o problema pode ser resolvido em média, em menos de dois minutos. Já se ele for detectado a partir da terceira estação de trabalho, a resolução do erro pode levar mais de 30 minutos. Ademais, se o erro for detectado já em campo, pelo cliente final, os custos podem incluir a totalidade do produto (reposição desse produto), transporte, indenizações, perda de futuras vendas, o que aumenta muito os custos de manufatura desse produto, visto que todos os custos de refugo/retrabalho serão posteriormente incluídos nos custos de produção daquele produto. O fluxo de processo mostrado na Figura 1 demonstra como a detecção precoce do erro pode ser importante na montagem de um produto.

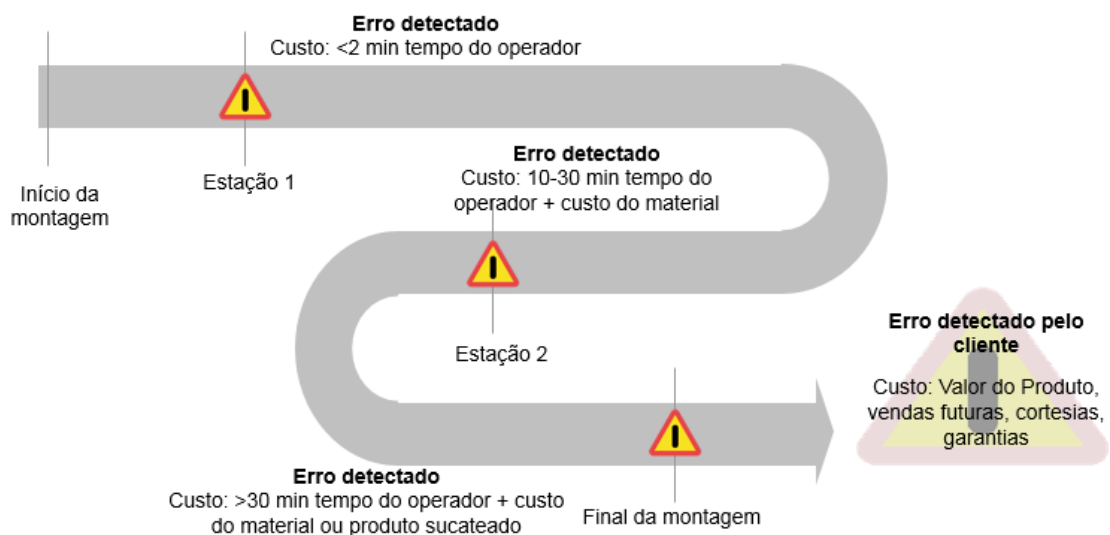


Figura 1 - Detecção de erros no processo

Nesse sentido, com o intuito de minimizar ou evitar erros operacionais com as novas ferramentas de aperto propostas e adquiridas – aquelas consideradas capazes de garantir as especificações de processo, fato esse atestado por testes - foi proposto um sistema Poka-Yoke simples e de baixo custo com o intuito de garantir um torque de aperto controlado, principalmente nas operações de fechamento da tampa dianteira. Esse sistema Poka-Yoke para controle do torque de aperto foi implementado na forma de um sistema *Pick-by-Light*, que, de acordo com a escolha do operador, dá acesso apenas à ferramenta correta para aquela operação. Garantindo a utilização da ferramenta adequada – e previamente calibrada - esperava-se garantir então a faixa de torque exigida para cada tamanho de motor. O projeto foi por conseguinte implementado e posto à prova na linha de montagem de uma das fábricas montadoras, como um projeto piloto para controle de torque na WMO.

Esclarecido o contexto e objetivos desse projeto, bem como o produto final concebido para o controle do torque, é fundamental para o leitor ter em mente a importância do que cita-se nesse trabalho como cotas críticas, devido principalmente ao fato das consequências que podem decorrer do não atendimento delas. Uma máquina que falha no chão de fábrica devido a tolerâncias geométricas ruins implica em perda de produtividade; um componente de um avião que falha em operação pode levar a consequências muito mais severas. A lógica é similar para os motores: se um motor a prova de explosão, inserido em uma atmosfera explosiva, apresenta uma falha de componentes, as consequências podem ser igualmente severas. Independente de quão confiável seja o processo de fabricação, peças importantes, que levam cotas críticas de tolerâncias, devem ter garantias no seu processo produtivo, redundâncias, medição constante dessas tolerâncias, mitigação de erros e investimento constante em melhorias, além de uma manutenção facilitada e bem estruturada, de forma que os fabricantes devem fornecer claramente esse tipo de informações. O autor Michel Baudin fala da importância de essas partes consideradas críticas em um produto terem também uma RCM (manutenção focada na confiabilidade), para que, no caso do avião, o componente possa funcionar ao menos até o avião pousar e, para o caso do motor, que o componente possa suportar até que o motor seja desligado. Na Figura 2, mostrada a seguir, é possível observar que as falhas devido a problemas de

fabricação são detectadas no início da vida útil de um componente, e as falhas devido à utilização e desgaste são detectadas ao longo do tempo. Por isso a importância de se ter padronizado para cada produto o tempo aproximado para a reposição de cada peça – e que os fabricantes deixem tal informação transparente para o cliente. O tempo de reposição, no qual as falhas começam a aumentar, é indicado no gráfico no ponto descrito como “Time to replace”.

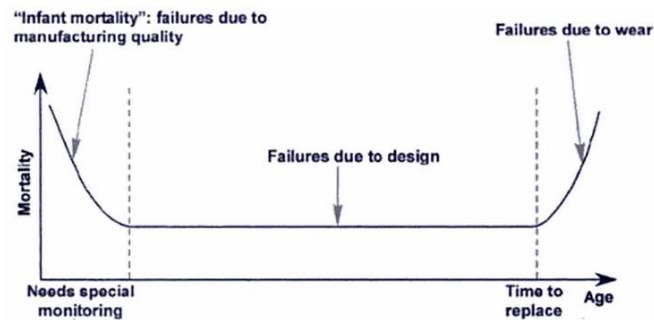


Figura 2 - Falhas de um componente ao longo do tempo

Esse tipo de entendimento em uma organização é uma questão de evolução gradativa das práticas e, com a maior exigência do consumidor, maior competitividade visto a globalização do mercado de equipamentos elétricos, se torna fundamental para uma empresa com a fatia de mercado e a diversidade de produtos como a WEG investir na melhoria contínua dos seus processos, visando a redução de custos e desperdícios e aumento da qualidade.

Definições

- **Tolerâncias geométricas e de posição**

Tolerâncias geométricas são dados de grande importância, não apenas na produção industrial, mas também no desenvolvimento de produtos, melhoramento de equipamentos e manutenção [8]. Apesar da importância do desenho das tolerâncias dimensionais ser bem assimilada na comunidade de engenharia, essa ainda se mantém uma tarefa técnica que depende fortemente de dados experimentais, banco de dados industriais, experiência adquirida e *expertise* das equipes de engenharia (Kaisarlis et al., 2008). Sabemos que uma alta precisão geométrica e dimensional leva a uma elevada qualidade do produto ao mesmo tempo que tolerâncias apertadas levam a um aumento exponencial dos custos de produção. Em desenhos de engenharia, a área de estudo GD&T correlaciona tamanho, forma, orientação e localização dos elementos geométricos do desenho do modelo com o desenho proposto nos requisitos do projeto, portanto tem um grande impacto na sua capacidade de fabricação, facilidade de montagem, performance e custos finais do componente [8].

Nessa seção dá-se uma breve introdução ao assunto de tolerâncias geométricas e de posição, para podermos entender no contexto de revisão dos processos alguns indicadores citados neste trabalho e suas respectivas tolerâncias, bem como o porquê da necessidade de atendê-las.

- **Evolução do sistema de tolerâncias**

Com a primeira Revolução Industrial ocorrida nos fins do século XVIII, o aumento elevado no consumo de produtos e bens de serviço obrigou a indústria a passar da produção artesanal para a produção seriada. Porém, a montagem continuava com grandes limitações devido ao fato de que demandava excessivos ajustes individuais. A montagem era condicionada à perícia do operador e a escolha da tolerância de trabalho era deixada à sensibilidade desse operador sendo, portanto, muito subjetiva.

Na sequência, ainda naquele século, sistemas de intercambiabilidade foram criados com o objetivo de eliminar o demorado e custoso trabalho manual de ajustagem individual de componentes. Em 1910, calibradores de boca diferencial já eram usados na indústria automobilística. Com a fabricação em série e o emprego de calibradores fixos de medida para obtenção de intercambiabilidade, surgiu a necessidade de se estabelecer um sistema de tolerância, com os seguintes objetivos:

- a) Fixar as dimensões limite para cada um dos elementos do conjunto, correspondentes ao tipo de ajuste que se queira obter, o qual determina os jogos ou interferência exigidas para o conjunto.
- b) Observando dimensões limites, estabelecer tolerâncias de fabricação, evitando que o operador trabalhe de acordo com sua sensibilidade.

Com a evolução das máquinas operatrizes constatou-se que estas tolerâncias sem um significado aprofundado eram insuficientes para garantir a montagem final sem necessidade de retrabalhos e ajustes corretivos.

Portanto, um controle dos erros de forma e posição de forma padronizada deveria ser criado. Ai então normas internacionais começaram a surgir, assim como, mais recentemente, as normas brasileiras também foram estabelecidas. As principais normas técnicas brasileiras que tratam dessas tolerâncias e que se relacionam com este trabalho são:

ABNT NBR 6158:1995 – Sistemas de tolerâncias e ajustes. Esta norma fixa o conjunto de princípios, regras e tabelas que se aplicam à tecnologia mecânica, a fim de permitir escolha racional de tolerâncias e ajustes, visando a fabricação de peças intercambiáveis.

ABNT NBR 6173:1980 – Terminologia de tolerâncias e ajustes. Esta norma tem por fim definir os termos técnicos usados na norma de tolerâncias e ajustes.

ABNT NBR 6409: 1997 – Tolerâncias geométricas. Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento: Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho. Esta norma estabelece os princípios gerais para indicação das tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento, e ainda, as definições geométricas apropriadas.

Os exemplos a seguir ilustram defeitos de forma e posição que levam a problemas na montagem, entre outros problemas.

A Figura 3 mostra que não havendo retilidade o eixo não entrará no furo.

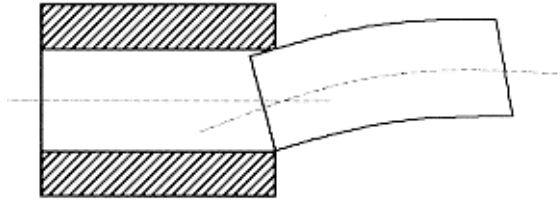


Figura 3 – Falta de retilidade

A Figura 4 mostra que a não coaxialidade não gera montagem.

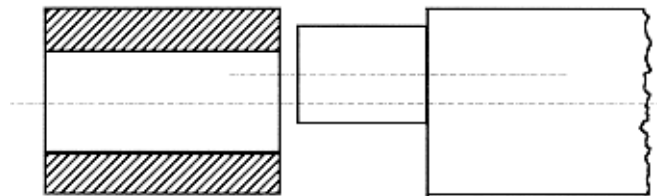


Figura 4 - Falta de coaxialidade

A Figura 5 mostra que o defeito de perpendicularismo não permite a montagem.

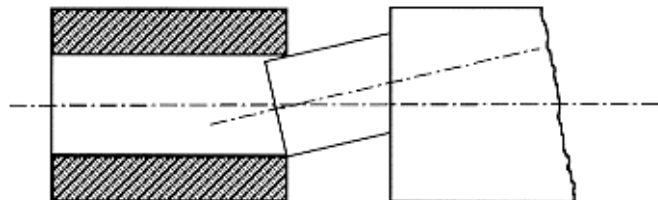


Figura 5 - Peça com defeito de perpendicularismo

Nesse trabalho, a principal tolerância discutida é uma tolerância geométrica, o batimento axial.

Aplicado ao motor, em geral tratamos de batimento axial de flange, contextualizado no Capítulo 2.3. Na sequência, tratamos de tolerâncias geométricas e do batimento axial.

- **Tolerância de batimento**

Na usinagem de elementos de revolução, tais como cilindros ou furos, ocorrem variações em suas formas e posições, o que provoca erros de ovalização, conicidade, excentricidade, entre outros, em relação a seus eixos. Tais erros são aceitáveis até certos limites, desde que não comprometam seu funcionamento – por isso a necessidade de se estabelecer dimensões adequadas para tais elementos - e desde que tais cotas se mantenham dentro das especificações de tolerâncias de forma para aquele elemento. O símbolo utilizado em desenhos e projetos para o batimento é: ↗.

Além desses desvios, nem sempre é trivial determinar ou alcançar na peça o seu verdadeiro eixo de revolução. Nesse caso, a medição ou inspeção deve ser feita a partir de outras referências que estejam relacionadas ao eixo de simetria. Por exemplo, para a medição de batimento de um torno ou de seu mandril expansivo, devemos colocar o instrumento de medição – relógio comparador, sustentado por uma base magnética, essa por sua vez fixada no torno – sobre um anel calibrador, este por sua vez concêntrico com o eixo principal do torno.

Essa variação de referencial geralmente leva a uma composição de erros, envolvendo a superfície medida, a superfície de referência e a linha de centro teórica. Para que se possa fazer uma conceituação desses erros compostos, são definidos os desvios de batimento, que nada mais são do que desvios compostos de forma e posição de superfície de revolução, quando medidos a partir de um eixo ou superfície de referência.

O batimento representa a variação máxima admissível da posição de um elemento, considerado ao girar a peça de uma rotação em torno de um eixo de referência, sem que haja deslocamento axial. A tolerância de batimento é aplicada separadamente para cada posição medida. Se não houver indicação em contrário, a variação máxima permitida deverá ser verificada a partir do ponto indicado pela seta no desenho.

O batimento pode delimitar erros de circularidade, coaxialidade, excentricidade, perpendicularidade e planicidade, desde que seu valor, que representa a soma de todos os erros acumulados, esteja contido na tolerância

especificada. O eixo de referência deverá ser assumido sem erros de reticidade ou de angularidade.

A tolerância de batimento pode ser dividida em dois grupos principais, Batimento Radial e Batimento Axial. Aqui, vamos detalhar apenas o segundo, visto que é a primeira tolerância não foi tratada nesse trabalho.

- **Batimento axial**

A tolerância de batimento axial é definida como o campo de tolerância determinado por duas superfícies, paralelas entre si e perpendiculares ao eixo de rotação da peça, dentro do qual deverá estar a superfície real quando a peça efetuar uma volta, sempre referida a seu eixo de rotação.

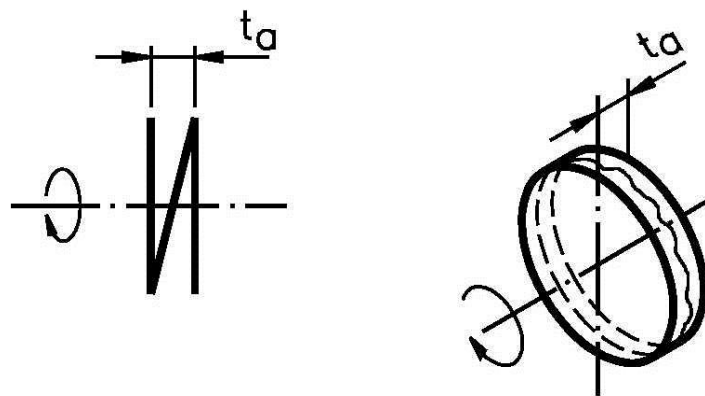


Figura 6 - Representação da tolerância de Batimento

Na tolerância de batimento axial estão incluídos os erros compostos de forma (planicidade) e de posição (perpendicularidade das faces em relação à linha de centro).

- **Métodos de medição de batimento axial**

Para se medir a tolerância de batimento axial, faz-se girar a peça em torno de um eixo perpendicular à superfície que será medida, bloqueando seu deslocamento no sentido axial. A Figura 7 mostra onde o instrumento de medição deve ser posicionado.

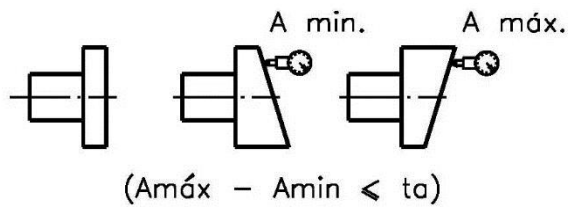


Figura 7 - Medição da tolerância de batimento axial

Caso não haja indicação da região em que deve ser efetuada a medição, ela valerá para toda a superfície.

A diferença entre as indicações $A_{max} - A_{min}$ (obtida a partir da leitura de um relógio comparador) determinará o desvio de batimento axial, que deverá ser menor ou igual à tolerância t_a .

$$A_{max} - A_{min} \leq \epsilon t_a$$

Normalmente, o desvio de batimento axial é obtido por meio das montagens indicadas abaixo.

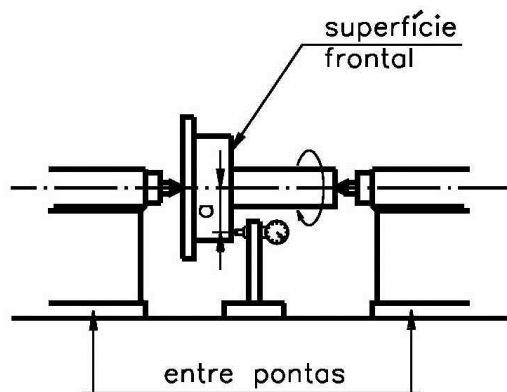


Figura 8 - Medição entre pontas

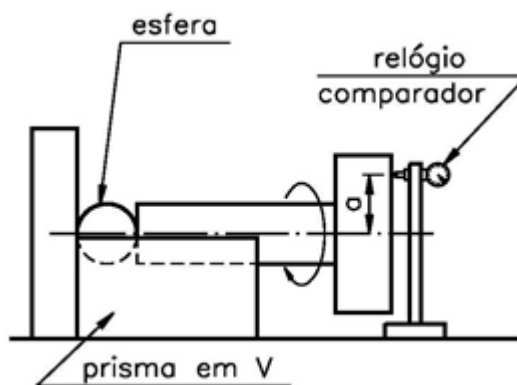


Figura 9 - Superfície apoiada em um prisma

A fim de comparação, no motor, a base magnética é acoplada na ponta do eixo e, com o apalpador do relógio, toca-se suavemente a superfície do flange, efetuando em seguida uma rotação completa com o relógio comparador, sempre apoiado no flange. O maior valor observado é o valor do batimento axial. A Figura 10 mostra como é medido o batimento no motor.



Figura 10 - Medição de batimento axial em um motor com relógio comparador e base magnética

- **Encaixe acabado**

O encaixe acabado que citamos neste trabalho se refere ao conjunto carcaça + estator. A carcaça chega oca até a etapa de prensagem, então o estator é prensado na carcaça, formando o encaixe acabado. Após, o encaixe é usinado para melhoramento das superfícies que devem acomodar as tampas e atendimento a cotas geométricas.



Figura 11 - Estator bobinado prensado na carcaça (Encaixe Acabado)

- **Definição do tamanho da carcaça**

O tamanho de carcaça de acordo com a norma IEC (norma métrica) é medido da ponta do eixo até a base dos pés. A Figura 12 ilustra algumas medidas para uma carcaça 160, montada na fábrica 6. Quando é falado nesse trabalho “carcaça 160”, refere-se a uma carcaça com o $H = 160$ mm. Ou seja, a altura da ponta do eixo até a base dos pés é igual a 160 milímetros.

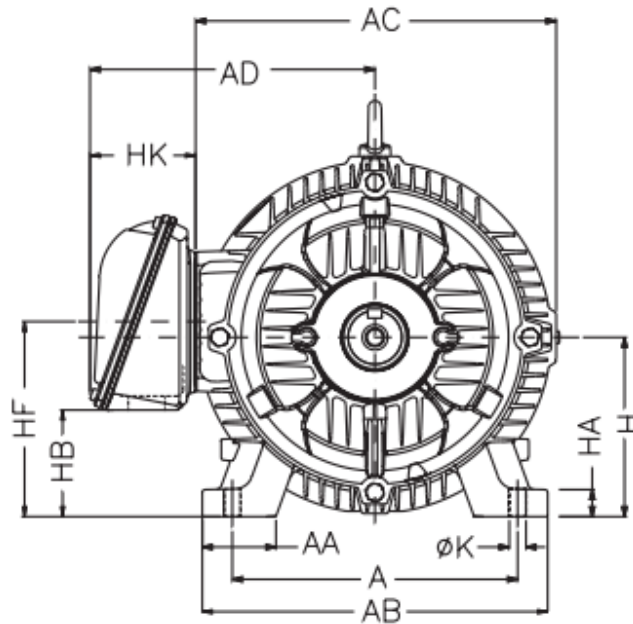


Figura 12 - Medidas da carcaça

- **Capabilidade de processo**

A análise da capacidade de um processo, feita através dos índices de Pp e Ppk ou Cp e Cpk, objetiva indicar se o processo é ou não capaz de produzir mantendo as características dentro das especificações. Esta avaliação pode ser realizada para qualquer característica mensurável de um produto, desde diâmetros e comprimentos, até parâmetros de processo tais como temperaturas e velocidades. No caso dos trabalhos de revisão dos processos, foram calculados o ppk de algumas máquinas utilizadas para usinagem do encaixe, para verificar possíveis problemas nessa usinagem que pudessem interferir na montagem final. Além disso, foi efetuada uma análise de capacidade das ferramentas pneumáticas propostas e existentes para comparar seus desempenhos quando aplicadas ao processo de montagem de um motor. É importante observar que a análise deve ser

direcionada à cada situação, uma vez que uma máquina pode ser capaz para um processo, mas para outro não.

A análise da capacidade de um processo leva em consideração dois parâmetros: a variabilidade do processo e também sua centralização em relação aos limites de especificação. Um processo é dito capaz se, além de centralizado, a variação do resultado que ele produz é pequena comparada com os limites de especificação. Quanto menor a variação do resultado que o processo produz e quanto maior sua centralização, mais este processo é capaz de atender as especificações do produto. A seguir são mostrados exemplos de processos capazes e incapazes de acordo com a variabilidade e centralização das medições. A Figura 13 mostra um processo com grande variabilidade, portanto incapaz.

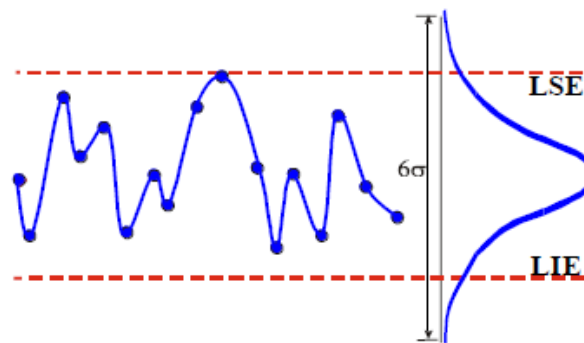


Figura 13 - Processo com alta variabilidade

A Figura 14 ilustra um processo com pequena variabilidade, mas descentralizado. Esse processo teria um bom PP, mas um PPK ruim. Também é considerado incapaz.

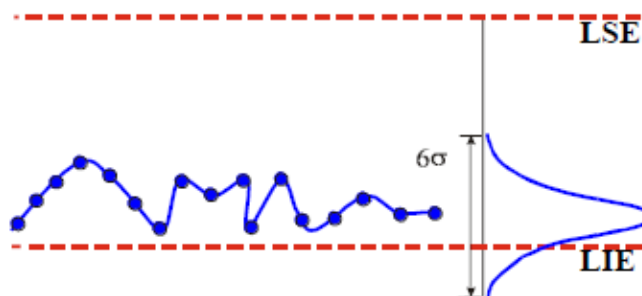


Figura 14 - Processo não centralizado

Por fim, na Figura 15, é mostrado um processo com baixa variabilidade e centralizado em relação aos limites superior e inferior de especificação.

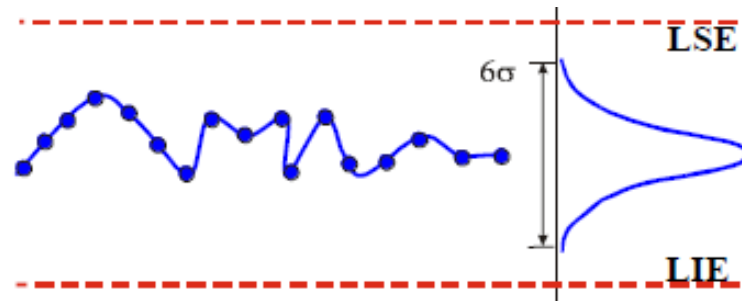


Figura 15 - Processo pouco variável e centralizado

2. Contexto

2.1. A empresa

A WEG é uma empresa de origem familiar, iniciada em 1961. Seu primeiro ramo de atuação foi o de motores elétricos. Hoje é a maior fabricante de motores elétricos da América, e uma das maiores do mundo. Atende com seus produtos segmentos como Papel & Celulose, Açúcar & Etanol, Alimentos & Bebidas, Petróleo & Gás, Siderurgia, Infraestrutura, Mineração, Naval, Energia e outros. A WEG produz atualmente mais de 21 milhões de motores elétricos ao ano e possui mais de 31 mil colaboradores ao redor do mundo. Tem unidades produtivas em 11 países e filiais em muitos outros, atuando nos cinco continentes. No ano de 2014 a empresa alcançou uma ROL de quase 8 bilhões de reais.

A WEG se tornou nas últimas décadas muito mais do que uma fabricante de motores elétricos; é hoje uma fornecedora global de soluções com máquinas elétricas e automação para a indústria e sistemas de energia. Seu ramo de atuação atualmente agrega desde equipamentos elétricos, equipamentos eletrônicos, automação industrial, geração e distribuição de energia até tintas industriais e outros elementos de menor representatividade. A empresa defende com seus valores uma busca pela eficiência e bem-estar do homem, através de uma visão sobre interface homem/máquina relacionada à saúde ocupacional, segurança e enobrecimento da atividade. Busca a simplicidade na aplicação da tecnologia, tendo processos robustos e confiáveis e, ao mesmo tempo, uma manufatura flexível.

2.2. O Departamento de Engenharia Industrial

O Departamento de Engenharia Industrial é a área que prioritariamente lida com os processos produtivos na WEG.

Tem como objetivos, principalmente:

- Implantar processos de manufatura, assim como novas tecnologias que atendam às necessidades dos clientes e mantenham a WEG uma empresa altamente competitiva, mantendo uma visão de curto a longo prazo.
- Manter os desenvolvimentos em manufatura alinhados com o desenvolvimento e pesquisa em novos produtos.
- Disponibilizar informações rápidas e confiáveis do processo produtivo, integrando o sistema de informação da “*supply-chain*”;
- Manter as fábricas eficientes, seguras e agradáveis ao homem, em relação à movimentação de materiais e *layout* de células;
- Sistematizar e padronizar procedimentos, métodos e tempos em todo o sistema produtivo;
- Criar vantagens competitivas através do desenvolvimento de tecnologias de fabricação própria;
- Projetar novas instalações industriais, desde a concepção do processo, logística, necessidade de recursos e análise econômica/financeira.

Como é possível observar, a Engenharia Industrial tem papel fundamental em todas as etapas do processo produtivo. A qualidade, segurança e eficiência dos processos dependem fortemente da equipe, e ela está relacionada diretamente com os departamentos de produção e de qualidade.

É importante ressaltar que essa foi a primeira vez em que a Engenharia Industrial abriu espaço para estagiários de Controle e Automação. Fica o legado para os próximos alunos de que nós somos capazes de trabalhar com análise de processos e manufatura, assim como engenheiros de produção ou mecânicos e, mais que isso, relacionar práticas de automação à produção, no sentido de reduzir pessoas ou sistematizar e padronizar os processos através de máquinas automatizadas, sensores e atuadores.

2.3. O problema de Batimento Axial de Flange na WMO

O batimento axial é o principal indicador de qualidade visto pelo cliente final, para motores com tampas em ditas flangeadas. Ele representa um erro composto de forma e posição de algumas cotas críticas, assim como detalhado na seção de Definições. A vista explodida da Figura 16 detalha o que chamamos de tampa dianteira (3), tampa traseira (2), tampa defletora (1) e caixa de ligação (4). A tampa mostrada na Figura 16 é uma tampa comum, que não apresenta um flange. A Figura 17 por sua vez mostra uma tampa flangeada do tipo FF e a Figura 18 mostra as cotas de uma tampa flangeadas.

Em geral, motores com tampas flangeadas são utilizados, entre outras, para aplicações como o bombeamento de fluidos ou sistemas de ventilação. Esses motores muitas vezes vão acoplados diretamente ao sistema no qual devem exercer o torque, como as bombas de sucção ou bombeamento, por estes sistemas exigirem um acoplamento direto preciso e isento de vibrações ou folgas.

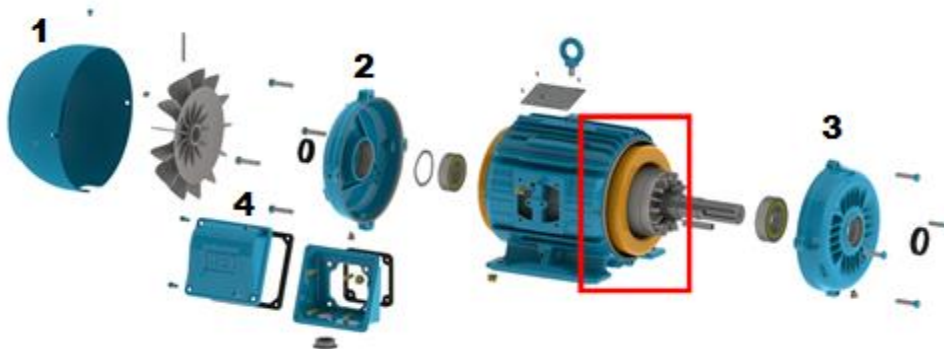


Figura 16 - Vista explodida de um motor



Figura 17 - Tampa flangeada FF

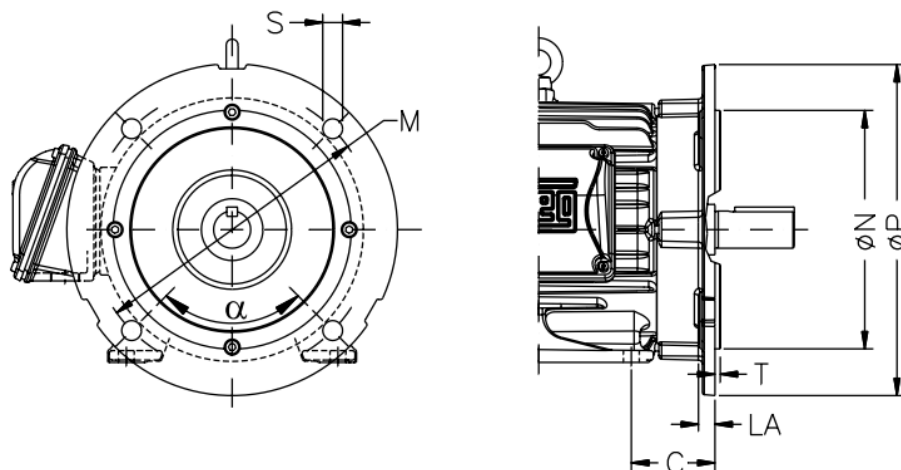


Figura 18 - Cotas de uma tampa flangeada

Existem aplicações mais exigentes que demandam uma classe especial – Classe Precisa - de batimento, que passa de 0,1 mm para 0,05 mm, como mostra a Tabela 1 - Norma DIN 42955 para batimento axial. Atender à essa medida de batimento não é tarefa fácil, e exige atenção especial ao usinar, transportar e montar os componentes. Atualmente a classe especial só é atendida com um tipo de engenharia reversa. Após acabado o produto, o batimento axial é medido e, caso não atenda às especificações, o produto volta para o processo para ser retrabalhado, seja reusinando a tampa, seja substituindo componentes não conformes por outros com melhores características dimensionais, operações estas que demandam tempo e inevitavelmente aumentam o *lead time* desse produto.

Nesse caso, quando falamos em tolerâncias ainda mais precisas, sabe-se que além das operações realizadas em máquinas e da conformidade dos componentes, a forma (metodologia) como as operações são feitas e o transporte dos componentes e produtos também influenciam nas tolerâncias dimensionais (os trabalhos desenvolvidos para atestar as diversas influências das operações nas tolerâncias dimensionais são mostrados no Capítulo 2.3). Segundo Kaisarlis et al, se o uso operacional das peças e componentes levou a danos consideráveis ou se partes complementares estão faltantes, então a complexidade do problema aumenta consideravelmente. Além disso, o mesmo autor reitera que o processo deve garantir que um componente retrabalhado – retirado do seu fluxo “convencional de processo” – irá se ajustar e funcionar adequadamente sem afetar a função principal da montagem.

Abaixo é mostrada a norma DIN 42955 para batimento axial de flange nominal e para a classe especial que, conforme Nota 1, só pode ser atendida mediante acordo comercial prévio. Pode-se observar que para os tamanhos de motores (160, 180 e 200) montados na Fábrica VI – a fábrica na qual o sistema Poka-Yoke foi implementado – a tolerância de batimento axial é de 0,1 mm, o que nos leva naturalmente à conclusão de que quaisquer variações indesejadas no torque de aperto podem resultar em batimento axial fora do especificado.

Tabela 1 - Norma DIN 42955 para batimento axial

FLANGE DE FIXAÇÃO		DIFERENÇA MÁXIMA ADMISSÍVEL ENTRE AS LEITURAS MÁXIMA E MÍNIMA DO COMPARADOR (μm)	
DESIGNAÇÃO WEG	DIÂMETRO DE ENCAIXE DO FLANGE (b_1) (mm)	CLASSE NORMAL	CLASSE PRECISA ¹⁾
-	$b_1 \leq 22$	50	25
-	$22 < b_1 \leq 40$	60	30
C - 90, C - 105, C - 120 e C - 140	$40 < b_1 \leq 100$	80	40
C - 160 e C - 200	$100 < b_1 \leq 230$	100	50
-	$230 < b_1 \leq 450$	125	63
-	$450 < b_1 \leq 800$	160	80
-	$800 < b_1 \leq 1400$	200	100
-	$1400 < b_1 \leq 2000$	250	125
-	$2000 < b_1 \leq 2240$	315	160

Nota: 1) Somente mediante acordo entre WEG e cliente.

Em mercados consumidores mais exigentes, o batimento axial sugerido por norma deve ser obrigatoriamente atendido; com a tendência da WEG de se tornar

cada vez mais globalizada, a empresa precisa se policiar quanto as exigências de qualidade se quiser se manter competitiva em mercados mais cautelosos como América do Norte ou Europa. Ou seja, o que muitas vezes é aceitável no Brasil, devido muitas vezes às menores exigências de tolerâncias dimensionais, não o é em alguns locais do mercado externo.

Com a diretriz de revisar os processos críticos, o batimento axial é um dos grandes focos quando são realizados trabalhos de melhoria ou acompanhamento nos processos de usinagem e montagem. Na concepção deste projeto, foi medido o batimento de mais de um lote de motores, para analisar a influência de diversos processos, máquinas e operações sobre eles. Foi objetivado analisar a influência da montagem, usinagem e até do transporte das peças e dos produtos acabados. Foram feitos testes de montagem com peças conformes – as quais obtiveram cuidado especial durante a usinagem do encaixe -, com peças “comuns”, com controle de torque sobre o fechamento das tampas, sem controle de torque, sobre o transporte dos motores acabados com o flange encostado na embalagem e sem encostar na embalagem, e até sobre o acondicionamento das subpartes dos motores durante o processo produtivo – transporte das tampas da usinagem para a montagem, por exemplo, todos esses testes visando identificar os fatores com grande influência nos valores de batimento axial.

Na seção 2.6, a seguir, são mostradas as medições de batimento axial de flange realizadas na Fábrica VI em motores de carcaça 160 para comparar a capacidade entre dois tipos de ferramentas. Assim, o batimento se mostra uma cota crítica de fundamental importância para mensurar a capacidade tanto de processos quanto de máquinas.

2.4. Controle de torque de aperto na WMO

Conforme discorrido nas seções anteriores, o aperto de determinadas partes do motor – como as tampas dianteira e traseira - pode ser uma operação crítica, que influencia diretamente nos indicadores de qualidade do motor, como o batimento axial. O torque do aperto deveria ser, portanto, controlado e auditado periodicamente. Isso nem sempre é feito porque atualmente não há um padrão de controle de torque para as fábricas montadoras, muitas ferramentas não

comportam um controle adequado de torque e há também uma carência de instrumentos de medição e calibração nas Fábricas.

Nesse contexto, iniciou-se neste ano na WMO um trabalho destinado a controle de torque em operações críticas, principalmente no fechamento da tampa dianteira, mais importante ainda quando essa tampa era do tipo flangeada. A Figura 19 mostra o posto de fechamento da tampa em uma das linhas de montagem (nesse posto é que foi implementado o sistema de seleção de ferramentas discorrido na sequência).

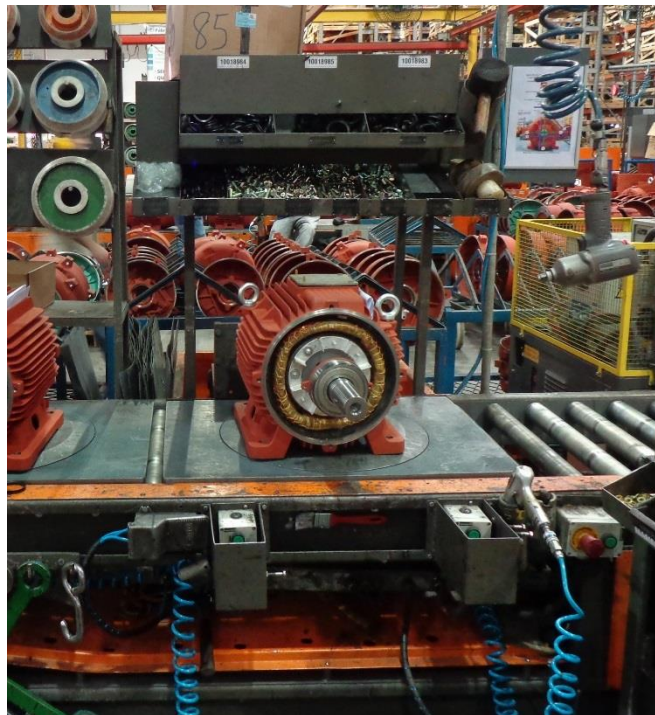


Figura 19 - Posto atual de fechamento da tampa dianteira

Os primeiros trabalhos realizados foram a respeito da metodologia de aperto dos parafusos. Foi constatado, por exemplo, que ao fechar os parafusos em “X”, ou seja, fechando primeiro o de cima, depois o de baixo, e só após os das laterais, era obtido um produto com maior qualidade. A forma como o flange é colocado no encaixe também influencia; folgas, ou erros de concentricidade levam a um encaixe deficiente, exigindo do operador um “ajuste fino”, ou com a própria parafusadeira, ou com uma marreta auxiliar. Outros fatores analisados foram os construtivos: sabe-se que uma boa montagem final depende fortemente da conformidade dos componentes.

Problemas recorrentes como furação deslocada, usinagem ruim do encaixe acabado, ou tampas mal usinadas, levam a um encaixe menos preciso da tampa na carcaça, e a uma baixa repetibilidade do torque de aperto dos parafusos, fazendo com que existam torques diferentes nos parafusos de uma mesma tampa, conseqüentemente levando a um aumento do batimento axial.

Uma série de trabalhos foi iniciada para controle de torque de aperto, como estudo da capacidade das ferramentas atuais, proposta de capacitação de fábrica e criação de procedimento para controle de torque na área produtiva, detalhados nas seções seguintes neste capítulo. Em princípio, para a fábrica em que o sistema de controle de torque detalhado no capítulo 4 foi implementado, três *ranges* de torque para três diferentes bitolas de parafuso deveriam ser garantidos. Os parafusos utilizados eram de bitola M8, M10 e M12. Os motores montados naquela linha são de carcaça 160, 180 e 200. De acordo com a norma interna TBG-1147 baseada na norma ISO, os *ranges* de torque para cada um dos tamanhos de parafuso são de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 - Range de torque para parafusos

Material	Classe do Parafuso	Torque (N.m)	M5	M6	M8	M10	M12	M14	M16	M20
Aço Carbono	5.8	T _{mín}	3,5	6	14	28	45	75	115	230
		T _{máx}	5	9	20	40	70	110	170	330
	8.8 / 12.9	T _{mín}	3,5	6	14	28	45	75	115	230
		T _{máx}	5	12	30	60	105	110 ¹⁾	170 ¹⁾	330 ¹⁾
Aço Inoxidável	A2-70 A4-70	T _{mín}	3,5	6	14	28	45	75	115	225
		T _{máx}	5	8,5	19	40	60	100	170	290

Dessa forma, o as novas ferramentas controladas pelo novo sistema de seleção devem garantir o torque nos *ranges* especificados – a maioria dos parafusos utilizados na linha 3 da Fábrica VI são de aço carbono 8.8.

A forma como o controle de torque é feito através da seleção correta das ferramentas de acordo com cada tipo de parafuso é mostrada em detalhes na seção 4, que trata da implementação do sistema.

2.5. Tecnologia do Aperto

Quando um torque é aplicado a um parafuso, uma força de união é gerada na junta. Essa força cria um atrito entre a rosca e o furo roscado e entre a cabeça do parafuso e a superfície. A maior parte do torque é usado para vencer esse atrito (de 85 a 95%) e pequenas variações nas condições de fricção – como lubrificação, por exemplo - podem mudar a carga do parafuso. Além disso, outros fatores como o comprimento e desvios angulares da junta também tem influência no torque entregue. A influência desses fatores, porém, é mais dificilmente mensurável. A Figura 20 mostra as forças presentes no aperto de um parafuso e na junta na qual ele é fixado.



Figura 20 – Forças aplicadas a um parafuso

Além disso, para a garantia de um bom aperto, a força de união deve ser grande o bastante para suportar as forças axiais e cortantes (cisalhamento). Dependendo das dimensões e materiais de cada parafuso, o torque necessário para acomodá-lo pode variar, de forma diretamente proporcional ao seu diâmetro. As forças que uma junta deve suportar em condições de trabalho (fadiga e cargas dinâmicas) dependem, além da dureza, diâmetro e passo do parafuso e da lubrificação, também do tipo da junta. Aqui falamos em juntas rígidas ou flexíveis. Na sequência ilustramos a diferença entre ambas as juntas. No caso dos motores, consideramos uma junta rígida a junção ferro com ferro (no caso da tampa encostada na carcaça). Facilmente identifica-se que, no primeiro caso, a junta é flexível. Isso porque uma junta flexível ocorre quando os materiais a serem fixados são flexíveis (facilmente deformáveis, como borrachas ou plásticos) ou quando na junção existem elementos flexíveis, como arruelas de pressão ou porcas não rígidas. Assim, observa-se que o ângulo de encosto é muito maior para as juntas flexíveis, já que, mesmo após o encosto, o parafuso continua rodando e

deformando o material. Na junta rígida, uma vez efetuado o encosto, o parafuso praticamente não gira mais.

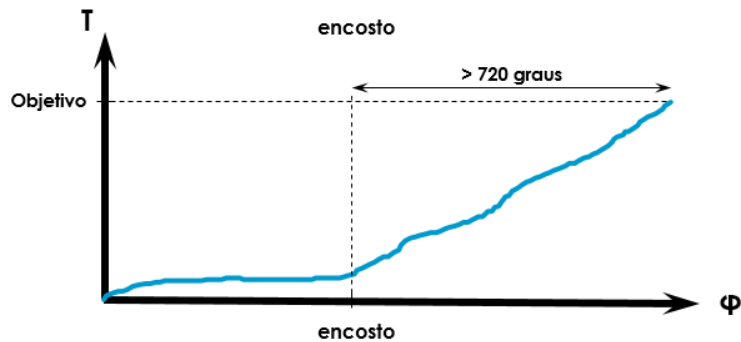


Figura 21 - Curva característica de uma junta flexível

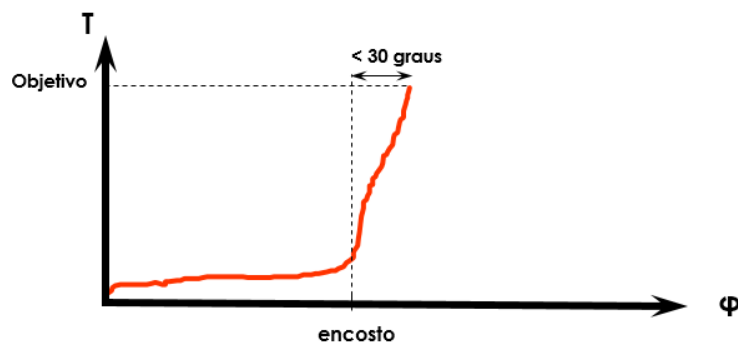


Figura 22 - Curva característica de uma junta rígida

2.5.1. Ferramentas de aperto

As ferramentas de aperto utilizadas na indústria possuem os mais diversos princípios de funcionamento. Hoje existem, principalmente, ferramentas de aperto eletrônicas – muitas delas transdutorizadas, com maior valor agregado, ferramentas elétricas – em geral, à bateria, e ferramentas pneumáticas, podendo ser de impulso hidráulico ou puramente pneumático, ou de impacto.

Cada ferramenta de aperto deve ser submetida à testes para atestar sua capacidade. Alguns procedimentos devem tomados para manter a ferramenta operando em boas condições, como manutenção preventiva – no caso das ferramentas pneumáticas hidráulicas, a troca de óleo é um exemplo - e calibração periódica, que deve ser efetuada de acordo com o processo para o qual elas são aplicadas (utilização) e de acordo com as características construtivas de cada ferramenta; além da calibrações propriamente ditas, auditorias de torque também

são importantes pois validam o processo e, entre as auditorias, existe o risco de que as ferramentas estejam aplicando torques incorretos, sendo possivelmente necessária uma calibração antes do tempo previsto. Algumas ferramentas mantêm sua calibração ao longo do tempo melhor do que outras. Para medirmos o desempenho de uma ferramenta, o que se tem como padrão internacional é a norma ISO 5393. As variações no torque de aperto, que dependem de diversos fatores, citados acima na seção 2.5, tornaram necessário estabelecer padrões de medição comuns a fim de definir a capacidade de uma ferramenta em atender certas especificações de qualidade e ser possível comparar diferentes tipos de ferramentas com as especificações.

Na empresa, nem sempre é possível seguir à risca o que dita a norma para avaliação de desempenho e calibração de ferramentas, mas é importante termos com base a norma ISO.

Na Fábrica VI, onde o projeto apresentado na sequência foi implementado, eram utilizadas parafusadeira do tipo “Impacto”. As chaves de impacto baseiam-se no mesmo princípio do uso de um martelo para golpear uma chave de boca durante o aperto de uma porca ou parafuso, desenvolvendo o torque impacto por impacto. No caso das ferramentas utilizadas na Fábrica VI, a chave de impacto é acionada por um motor pneumático, de forma que o martelo equivale à massa combinada do rotor e do mecanismo de impacto que envia sua energia cinética para o conjunto bigorna-eixo-soquete, conjunto representado pela chave na comparação mostrada na Figura 23.

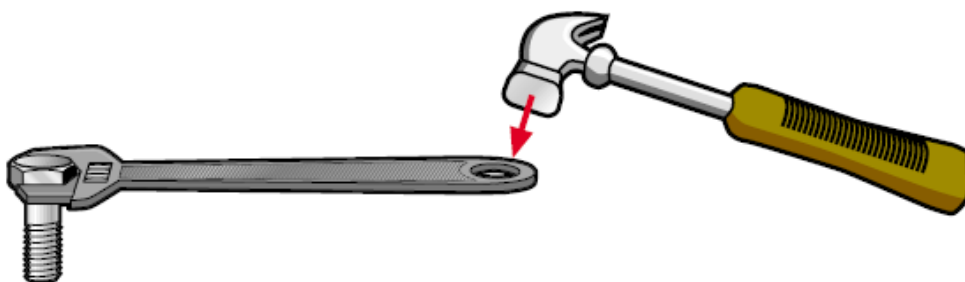


Figura 23 - Princípio das ferramentas de impacto

Um dos grandes problemas das chaves de impacto é que é muito difícil medir o torque aplicado e, portanto, muito difícil também efetuar um controle preciso de torque. Na prática, ela continua fornecendo torque enquanto o operador segurar o

gatilho, o que resulta num processo muito variável e altamente suscetível a erros operacionais.

Por outro lado, as ferramentas de impulso hidráulico, que chamamos aqui de ferramentas hidropneumáticas possuem quase todas as vantagens das chaves de impacto – alta rotação e dimensões reduzidas – porém apresentam pouca ou nenhuma reação ao operador, já que o óleo presente internamente absorve boa parte dessa reação. Nas ferramentas de impulso, o torque é desenvolvido, não através do golpe metal com metal, mas através de um colchão hidráulico, como exemplificado na Figura 24. Isso propicia baixo nível de ruído, um mínimo de vibração e, principalmente, boa precisão no aperto. Isso é alcançado através do controle da pressão hidráulica no mecanismo de impulso que limita o torque aplicado assim que o valor pré-estabelecido é alcançado. Nessas ferramentas, a medição de torque é muito facilitada, e pode ser feita através de transdutores acoplados a um verificador, estes usados para fazer a leitura dos valores de torque, além de muitos deles fornecerem os gráficos de torque dinâmico, contagem de pulso até análise estatística dos dados. As chaves de impacto não podem ser utilizadas com transdutores como esses, devido ao seu princípio de funcionamento.

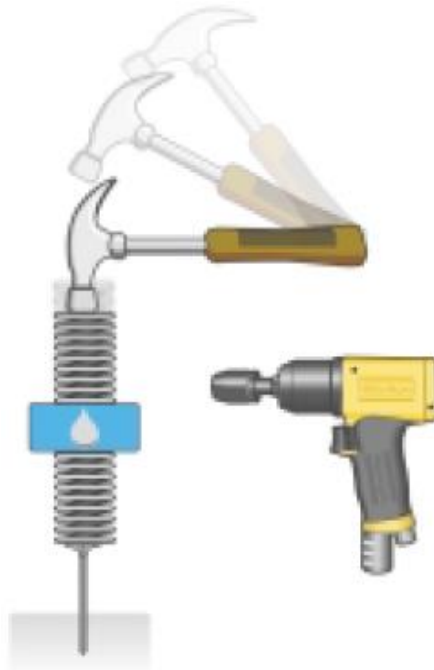


Figura 24 - Princípio das ferramentas de impulso

Em geral, podemos considerar para a seleção de uma boa ferramenta o tipo da junta a ser parafusada, a velocidade de rotação desejada, ergonomia ao operador e reação, ruído, temperatura, repetibilidade, precisão. Esses fatores nos ajudaram a decidir por utilizar ferramentas hidropneumáticas ao invés de chaves-de-impacto. Para atestar a capacidade de tais máquinas, foi efetuada a medição de um lote de motores, mostrado em 2.6.

2.5.2. Calibração de ferramentas

Para se obter uma calibração adequada das ferramentas, bons instrumentos de medição são fundamentais. O método de calibração e os instrumentos de medição utilizados dependem dos princípios de funcionamento da ferramenta. Parafusadeiras eletrônicas podem ser calibradas por software (quando são transdutorizadas) e podem se comunicar com painéis instalados na linha para fazer o envio dos dados de aperto e demais dados estatísticos. Com isso, é possível determinar por exemplo, uma sequência de aperto, variando o torque e até a rotação da ferramenta dependendo da necessidade. Por outro lado, as ferramentas pneumáticas em sua maioria não permitem um controle ativo de torque. Tais ferramentas exigem portanto calibradores e transdutores externos, nos quais elas são acopladas e o torque é medido. Então, elas possuem uma regulagem interna na qual é possível estipular, através de testes, o torque desejado. A medição de torque pode ser feita de forma estática ou dinâmica. Uma medição dinâmica significa que a aquisição dos dados é feita diretamente no produto, com transdutores rotativos que vão acoplados entre a ferramenta e o parafuso. Já a medição estática é feita com transdutores estacionários, posicionados fora do processo, em geral em uma bancada de testes. Nesse caso são necessários simuladores de junta.

Na fábrica onde o sistema foi implementado, foi adquirido um verificador de torque que permitia uma análise estatística de dados de aperto e permitia passar os dados para um computador de maneira intuitiva. O verificador mostra a curva dinâmica de torque (durante o aperto), sendo muito útil para identificar a tendência da ferramenta. Esse acompanhamento dos dados também é importante para analisar a deriva temporal das ferramentas, ou seja, para acompanhar o

comportamento do seu torque com o tempo e como ela perdia a calibração de acordo com o número de apertos efetuados.

Além desse verificador, foi proposta a aquisição também dos transdutores, nesse caso, um transdutor de caráter estacionário. As figuras a seguir ilustram os equipamentos que foram propostos pela equipe a CEO, para calibração das ferramentas de aperto existentes e das que seriam adquiridas para garantir o torque adequado para cada processo.



Figura 25 - Verificador de torque



Figura 26 - Transdutor de torque estacionário

2.6. Medição de um lote de motores

Para atestar a capacidade de ambos os tipos de ferramentas (atuais e propostas), foram feitas medições do batimento axial de dois lotes, de 25 e 26 motores. O torque de aperto do parafuso M8 – utilizado para fechamento das tampas de motores carcaça 160 é listado na Tabela 2 - Range de torque para parafusos.

Nesse teste, foram montados 26 motores utilizando uma parafusadeira do tipo hidropneumática. Foram verificados valores de batimento entre 0,04 e 0,110, com exceção de um motor que apresentou batimento de 0,170. Isso significa que apenas 1 dos 26 motores apresentou batimento acima do especificado ($\approx 96\%$ de aprovação). Além disso, foi observado uma boa repetibilidade no torque de aperto dos parafusos do mesmo flange (Figura 28) atendendo a faixa estipulada pela norma WEG TOP-4857. A parafusadeira hidropneumática foi regulada para atender o torque de 20 Nm, e proporcionou uma faixa de torque entre 16 e 26 Nm, atendendo à especificação da norma.

Por outro lado, após montadas 26 peças utilizando uma parafusadeira do tipo chave de impacto, foram verificados valores de batimento entre 0,065 e 0,200.

Dessas 26 peças montadas, 10 foram reprovadas por apresentarem batimento acima de 0,125mm. A parafusadeira foi regulada no nível 1, menor possível, e proporcionou uma faixa de torque entre 20 a 60 Nm, não atendendo, portanto, à especificação da norma. Os instrumentos de medição utilizados para obter os valores de batimento axial e torque são detalhados a seguir, na seção Instrumentos de medição utilizados. Na seção de Definições pode-se observar em detalhes a medição de batimento feita no motor - Figura 10.

Tabela 3 - Comparativo entre Parafusadeira Hidropneumática e de Impacto

	Hidropneumática	Impacto
Batimento médio (mm)	0,08	0,125
Torque médio (Nm)	20,12	43,63
Índice reprovação (%)	3,85	40,00

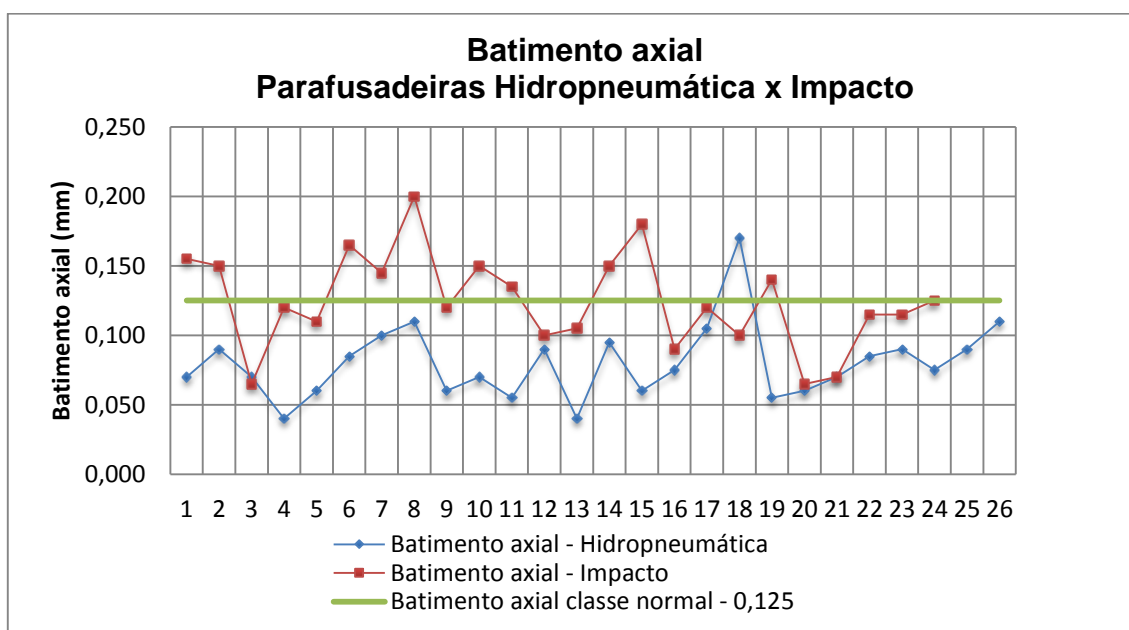


Figura 27 - Batimento Axial para montagem com os dois tipos de parafusadeiras

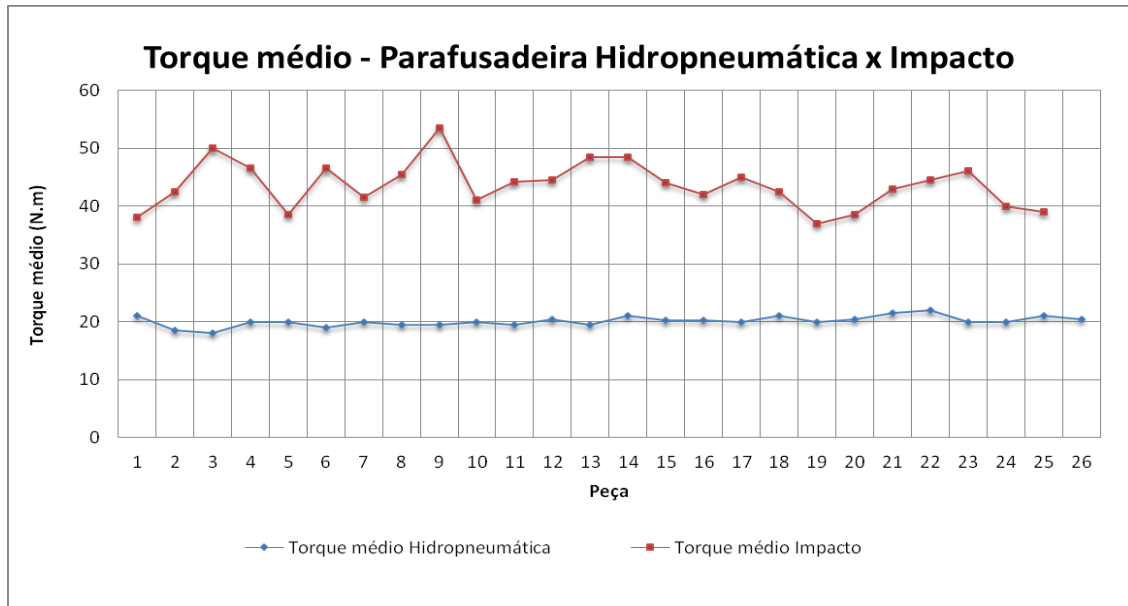


Figura 28 -Torque nas tampas para montagem com os dois tipos de parafusadeiras

2.6.1. Instrumentos de medição utilizados

2.6.1.1. Relógio comparador

O instrumento de medição utilizado para obter o batimento axial nos motores ou das máquinas em outras ocasiões foi um Relógio Comparador, apoiado na máquina ou no motor por uma base magnética. A Figura 29 mostra como funciona a base magnética. Ela não fica magnetizada até que a chave seja mudada para “on”. Por isso é fácil posicioná-la no eixo do motor ou na máquina e então fixá-la magneticamente.



Figura 29 - Base magnética

Durante os demais trabalhos, foram utilizados relógios comparadores milésimos e centésimos. O relógio utilizado para efetuar a medição de dois lotes de motores foi um relógio centesimal e analógico, similar ao mostrado na Figura 30.



Figura 30 - Relógio comparador analógico

2.6.1.2. Torquímetro

Os torquímetros utilizados para atestar a qualidade dos apertos e o torque entregue pelas ferramentas de aperto foram torquímetros de estalo. Ele tem a forma de uma alavanca, sendo possível acoplar soquetes ou bits de diferentes tamanhos para utilizá-lo em parafusos com bitolas diferentes. Basicamente, quando a inércia do parafuso é vencida, ele dá realmente um estalo, registrando um valor que é exatamente o valor do torque estático presente naquele parafuso. O torquímetro utilizado foi similar ao mostrado Figura 31.



Figura 31 - Torquímetro de Estalo

2.7. Capacitação das Fábricas

Feitos os testes para atestar a capacidade das máquinas, foi proposta a capacitação da Fábrica VI com parafusadeiras hidropneumáticas. Paralelamente à compra dessas ferramentas, foi elaborado um procedimento para operação, rastreamento, manutenção e calibração de parafusadeiras, mostrado na seção 2.8. Esses dois assuntos foram levados à gerência da industrial e posteriormente a CEO. Uma vez aprovados em CEO, o time da Engenharia Industrial que propôs esse trabalho foi responsável por implantar tais propostas, operando um período de validação das propostas para, posteriormente, passar o procedimento para manutenção da fábrica, sendo dessa forma responsabilidade dos departamentos de produção dar continuidade às ações propostas no procedimento.

Foi proposta a compra de uma parafusadeira para cada tamanho de carcaça,

por linha. Dessa forma, as três linhas da fábrica teriam ferramentas já pré-calibradas para todos os torques utilizados, evitando utilizar o torque errado para cada tamanho de motor, como ocorria no processo anterior (apenas uma parafusadeira de impacto). Mesmo assim, ainda não era possível garantir que o operador utilizasse a ferramenta pré-calibrada para o respectivo torque. Apesar de existirem agora ferramentas capazes e calibradas para o torque correto, ainda ficava a cargo do operador a escolha da ferramenta. Por isso foi importante, como uma garantia para esse trabalho de controle de torque, a implementação de um sistema que garantisse a escolha da ferramenta correta por parte do operador.

Além das ferramentas, também foi proposta a compra de instrumentos de medição e calibração de torque, para garantir a auditoria periódica de torque e a calibração adequada das ferramentas. Após análise dos instrumentos de calibração do mercado, comparecer a Workshop de um fabricante e após receber diversos fornecedores e receber um parecer da Metrologia da WEG, foi possível propor instrumentos de boa qualidade e boa relação de custo/benefício, para análise da chefia e do time de engenharia. Assim, foi adquirido um verificador TorqueStar Opta e um transdutor estacionário, da fabricante Crane Electronics, para cada *range* de torque, em cada uma das três fábricas montadoras envolvidas no procedimento. Esses equipamentos são mostrados na seção Calibração de ferramentas, discutida anteriormente.

2.8. Procedimento para controle de torque

Na WEG, quando um procedimento específico é proposto para utilização de máquinas, fabricação de partes ou produtos, ou realização de outros processos, é importante padronizá-lo e registrá-lo como regra para aquela atividade, para que vire uma norma interna WEG. Quando um procedimento vira uma norma, passa a ser mais fiscalizado e existem chances menores de que seja feito de forma errada.

O objetivo desse procedimento era controlar o torque aplicado nos parafusos das tampas dianteiras. Mesmo sem profundo conhecimento sobre o processo ou sobre as ferramentas a serem utilizadas, foi dado início a redação desse documento, estruturando-o de uma forma lógica e adicionando todos os tópicos considerados importantes em um procedimento para utilização e controle de

ferramentas; para elaborá-lo, foram coletadas em princípio informações técnicas e de campo, além de informações importantes de outras empresas do grupo WEG, como a WAU, que já possuía um procedimento de controle de torque mais estruturado. Após, os analistas de fábrica se envolveram, além de alguns chefes da Engenharia Industrial, até que estivesse redigida uma boa versão a ser apresentada em CEO e, quando aprovada, após os devidos ajustes, a ser entregue à gestão da fábrica.

O procedimento tinha como tópicos: Treinamento de operadores, Identificação visual das parafusadeiras, posicionamento adequado nos postos de trabalho, Backup de ferramentas, Cronograma de manutenção, Controle periódico de torque.

Com tal procedimento, era esperado melhorar muito as práticas quanto as ferramentas de aperto nas fábricas montadoras. A CEO concordou com a proposta e aprovou-a. Feito isso, como proponente do assunto, ficou então como responsabilidade da Engenharia Industrial implementar e validar o procedimento. O período de validação e testes proposto foi de 3 meses após a chegada dos instrumentos de medição e das novas ferramentas hidropneumáticas. Nesse período, serão feitas então auditorias periódicas de torque nos produtos, bem como uma calibração periódica e análise das suas condições de funcionamento, como desgaste do óleo e dos componentes internos.

3. Métodos e Sistemas de Assistência Na Manufatura

3.1. Jidoka

O termo Jidoka usado no TPS (Toyota Production System) pode ser definido como “automação com um toque humano”. A palavra Jidoka tem suas origens na invenção do tear automático por Sakichi Toyoda, fundador do grupo Toyota [2]. Um dos pilares do sistema Toyota de produção é a excelência ao se trabalhar com máquinas. O objetivo principal em controlar e dar autonomia às máquinas é prevenir as linhas de produzir peças defeituosas.

Antes dos dispositivos automatizados começarem a tomar seu lugar, as máquinas era todas manuais e sujeitas às ponderações do operador. Toyoda passou a incorporar invenções inovadoras nos seus teares, como parada automática quando ocorria uma quebra no tecido, parada de emergência e outras. Uma vez que a máquina parava em situações de inconformidades, menos peças defeituosas eram produzidas, aumentando a qualidade dos produtos acabados.

Inicialmente, o termo Toyota “Jido” foi comumente usado para uma máquina com dispositivos integrados para tomarem decisões. Isso significava também que, com uma máquina parando em situações de anormalidades, menos operadores seriam necessários para operar as máquinas, implicando em ganhos significativo de produtividade.

Jidoka também se refere a técnicas de produção que separam a atividade humana do ciclo das máquinas, portanto permitindo cada operador a atender a várias máquinas, preferencialmente em operações diferentes, com a saída de cada máquina sendo a entrada da outra. Mais recentemente na Toyota, Jidoka tem sido citado como a automação de tarefas insalubres, sujas ou perigosas, que cause fadiga ao operador durante um turno de trabalho ou leve a lesões devido ao esforço repetitivo com o passar do tempo [4].

Pode ser referida também como uma técnica de automação passo a passo que gradualmente reduz a quantidade de trabalho realizado pelas pessoas. Essa abordagem se difere da estratégia tradicional, mais seguida em projetos de automação nos EUA ou Europa [4].

O fluxo de ações mostrado na Figura 32 mostra como são tratados os problemas e não conformidades na filosofia Jidoka e como as melhorias são incorporadas ao processo de forma natural.

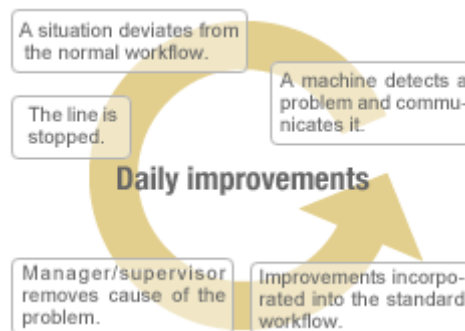


Figura 32 - Conceitos de Jidoka (Toyota Motor Corporation)

3.2. Poka-Yoke

Os conceitos de Poka Yoke foram criados pelo engenheiro industrial Shigeo Shingo no contexto do Sistema Toyota de Produção, durante a década de 1960.

Um sistema Poka-Yoke pode ser usado em qualquer situação em que uma operação pode ser feita de maneira errada ou em que uma máquina pode se comportar de uma maneira inesperada. É uma técnica ou ferramenta que pode ser aplicada a qualquer tipo de processo, seja na manufatura ou no setor de serviços. Na Introdução desse trabalho, vimos que quanto antes detectados os erros operacionais, menores são os custos para contorná-los ou extingui-los.

Como exemplo das diversas situações em que o Poka-Yoke pode ser utilizado, podemos destacar operações manuais que requerem atenção constante do operador, processos nos quais há a necessidade de ajustes, quando causas especiais aparecem constantemente, em uma produção com um *mix* diversificado de produtos e outros.

Um sistema Poka-Yoke procura reduzir custos e eliminar defeitos, dando suporte à resolução de problemas e tomada de decisões, reduzindo cada vez mais a necessidade de tomada de decisões pelo operador e reduzindo o tempo de resposta sobre possíveis não conformidades no processo.

Exemplos de sistemas Poka-Yoke são, por exemplo, peças que só podem ser encaixadas da forma correta, códigos de cores, – por exemplo, cada tipo de conexão possui uma cor diferente para facilitar sua montagem - flechas e indicações de onde a peça deve ser montada, indicadores luminosos para guiar o operador, entre outros.

No caso do sistema implementado na Fábrica VI, apresentado neste trabalho, ele utiliza de elementos automáticos – sensores – para detectar a escolha do operador, e indicadores luminosos para ajudar a guiar esse operador sobre qual ferramenta escolher. Para garantir a escolha correta da ferramenta, existem atuadores – válvulas pneumáticas – que bloqueiam o acionamento das ferramentas, de forma que apenas uma ferramenta é acionada por vez, nesse caso, apenas aquela que deve ser usada com a peça escolhida pelo operador. Caso o operador se confunda e selecione a ferramenta incorreta, ela não poderá ser acionada, já que sua alimentação de ar está bloqueada pela válvula.

3.3. Sistemas Pick by Light

Esses são sistemas que possuem luzes visíveis nos compartimentos de armazenamento, indicando qual item deve ser selecionado em determinado momento. São muito usados para gerenciamento de almoxarifado ou para operações sequenciais em linhas de montagem.

Sistemas *Pick-by-Light*, também chamados *Pick-to-Light*, em geral começam a sequência de captura de peças com a leitura de um código de barras, indicando ao operador qual setor ou compartimento deve ser escolhido na sequência. Muitos deles possuem também um mostrador digital para indicar a quantidade de itens a serem coletados.

Esses sistemas objetivam processos enxutos, maior eficiência no abastecimento das linhas, redução de erros e de custos, além de processos mais transparentes e mais facilmente assistidos.

Um sistema *Pick-by-light* implementa soluções Poka-Yoke com dispositivos mecânicos e visíveis para evitar que o operador cometa erros, ou mecanismos de detecção que alertem o operador sobre possíveis erros ou escolhas erradas,

bloqueando o processo de prosseguir para um próximo estágio. Sistemas utilizados como dispositivos Poka-Yoke muitas vezes levam a um alto custo ou aumento da complexidade do sistema, por isso esta solução só deveria ser usada para problemas mais simples e de menor complexidade, já que uma implementação em larga escala aumentaria muito a complexidade do sistema e iria contra os próprios princípios de Poka-Yoke, que objetiva reduzir erros da maneira mais econômica possível.

O sistema implementado foi uma adaptação de um *Pick-by-Light*. Como a produção na linha de montagem de motores não é seriada – existe um *mix* muito grande de produtos e não há como prever qual ordem virá a seguir – é muito difícil dizer ao operador qual será a peça que ele deve pegar para aquele tipo de motor. Mas nesse caso uma vez que, na linha de montagem 3, são utilizadas três bitolas de parafusos possíveis (somando um total de 13 parafusos), mesmo se o operador tentar utilizar um parafuso de bitola diferente em um motor, ele não irá fisicamente se encaixar. O que poderia acontecer é o operador utilizar um parafuso de mesma bitola, mas ainda assim inadequado para o processo; mesmo assim, esse erro é dificultado porque, na ordem de produção, é falado claramente quais itens devem ser utilizados.

Desse modo, após a escolha do operador, o sistema acende uma luz correspondente ao local de armazenagem escolhido (Figura 45 - Compartimentos disponíveis para a escolha do operador), além de ser acendida uma luz na ferramenta que deve ser utilizada com aquele determinado parafuso. Por isso, o sistema mostra ao operador qual foi a sua última escolha e qual é a ferramenta que ele deve usar para a operação atual. Quando ele faz uma nova escolha, o sistema acende novos indicadores luminosos com a ferramenta correspondente e apaga os que indicavam a escolha anterior, bem como a ferramenta anteriormente utilizada é bloqueada. O funcionamento do sistema é explicado em detalhes na seção 4, na sequência.

4. O Sistema de Seleção de Ferramentas

4.1. Motivação

O sistema foi concebido no contexto da revisão dos processos críticos, como já defendido no capítulo Contexto. Resumidamente, em um primeiro momento, detectou-se que as ferramentas de aperto utilizadas na linha não eram capazes de atender ao processo, após a medição de batimento axial de um lote de peças montadas com ambas as ferramentas estudadas (chave-de-impacto e hidropneumática). Dessa maneira, foi proposta então a capacitação da fábrica. Além disso, para garantir a correta utilização, rastreamento, manutenção e calibração das ferramentas, foi proposto pela Engenharia Industrial e aprovado em CEO um procedimento a ser implantado nas Fábricas Montadoras. Porém, mesmo com todos esses recursos para tentar garantir o torque de aperto, nada garantia que o operador utilizasse a parafusadeira proposta e pré-calibrada para cada torque específico.

Por isso, diversas soluções foram levadas em consideração, como acionamento manual por botoeiras, instalação de uma IHM no posto de trabalho para que o operador entrasse com o tamanho da carcaça e até leitura do código de barras da ordem de produção. Todas elas se mostraram menos robustas – mais suscetíveis a falhas e com maior decisão do operador - ou inviáveis.

Após análise de processo, coleta de dados, conversa com operadores e técnicos de fábrica, além de alinhamento das idéias e das necessidades com a Metrologia da WEG, foi proposto um sistema *Pick by Light* para o intertravamento das ferramentas, sistema esse muito utilizado na indústria, tanto na produção quanto para gerenciamento de estoques. Entre as outras opções de sistema para controle das ferramentas analisadas, essa se mostrou mais eficaz porque tinha baixo custo, fácil operação e era implementável no tempo hábil disponível para meu estágio.

Esse sistema foi implementado na Fábrica VI porque foi uma das fábricas na qual desenvolvi diversos trabalhos ligados à qualidade, trabalhando com ferramental, tolerâncias geométricas e controle de torque. Além disso nessa fábrica são fabricados motores de carcaça 160, 180 e 200 e, na Linha de Montagem

Especial, são montados motores mais customizados, com determinadas particularidades, o que implica que a utilização do torque correto de aperto é fundamental. Nessa linha são montados os três tipos de motores, portanto três torques diferentes devem eventualmente serem utilizados – assim, três máquinas pré-calibradas deveriam estar disponíveis ao operador. Esses motores ditos especiais não são de montagem convencional, possuem um valor agregado maior - devido, por exemplo, a carcaças diferentes, rolamentos especiais, diferentes componentes internos, pinturas, vedações, entre outros – e qualquer refugo, ou retrabalho desses motores implica em um alto custo no produto final. Visto isso, foi proposto esse sistema Poka–Yoke que pudesse guiar o operador e mitigar a quantidade de erros no que se refere ao torque de aperto.

O sistema tem um apelo bastante visual, de forma que cada vez que o operador pega um parafuso na bandeja (compartimento onde ficam os parafusos utilizados para montagem das tampas), um indicador luminoso é acendido naquela bandeja e outro na parafusadeira correspondente. É fácil para o preparador da linha detectar e corrigir possíveis erros de operação. Cada vez que o operador seleciona uma nova peça (parafuso), a parafusadeira anterior é bloqueada, cada vez que o operador se ausenta do posto de trabalho, todas as ferramentas são novamente bloqueadas. Portanto, apenas uma parafusadeira ficará disponível por vez, apenas aquela adequada para o tamanho de carcaça sendo montado. Essa parafusadeira será então controlada de acordo com a escolha das peças pelo operador.

Na sequência desse capítulo, mostramos diagramas esquemas de funcionamento do sistema, projetos elétrico e demonstração do código desenvolvido para o CLP.

4.2. Solicitação de projeto para a Metrologia da WEG

Após alinhadas as especificações com a chefia da Engenharia Industrial e com a chefia da produção da Fábrica VI, o procedimento para abertura de um projeto de melhoria, no caso de um Poka-Yoke, é encaminhar uma solicitação de projeto para a seção Metrologia do Departamento de Controle da Qualidade. Nesse caso, a Metrologia recebe a especificação e as necessidades e as transforma em um escopo técnico do projeto, além de fornecer o orçamento de todos os

equipamentos. Uma vez com esse orçamento, foi possível realizar os últimos ajustes na especificação para finalmente defender o projeto para a chefia da montagem da fábrica, já que seria a fábrica que deveria arcar com os custos do projeto. Dessa forma, a Metrologia era responsável por dar suporte em caso de necessidade, embora toda o planejamento, execução – montagem física dos painéis, programação do CLP, conexões elétricas e pneumáticas – e implementação na fábrica ficaram sob minha responsabilidade.

4.3. Projeto Elétrico

O projeto Elétrico foi proposto para referenciar o painel eletrônico a ser criado, este que deveria se comunicar com um painel pneumático. No projeto constam a alimentação principal do CLP e das expansões de E/S, as saídas e entradas digitais do CLP bem como as saídas e entradas das expansões. É importante destacar que o projeto elétrico foi uma base para a instalação do painel, porém, conforme os problemas apareciam ou detalhes não previstos eram encontrados, o projeto tinha de ser alterado. Durante a etapa de instalação na fábrica o projeto elétrico foi alterado diversas vezes devido a grandes dificuldades físicas na instalação. Por isso, para facilitar a passagem dos cabos e a sua organização, bem como diminuir a quantidade de cabos no interior do painel eletrônico foi instalada uma caixa de montagem anexa ao suporte, que fazia a comunicação dos sensores e das sinalleiras com o painel eletrônico. Por isso, após o final da instalação elétrica e da instalação do sistema na linha, foi elaborado um projeto “*as built*” do projeto elétrico, esse disponibilizado em forma impressa no interior do painel para uso futuro da manutenção da fábrica e na rede interna da WEG para eventuais consultas.

A seguir é mostrado parte dos diagramas elétricos. Entre eles, constam os diagramas da alimentação do CLP e das expansões, saídas do CLP e das expansões e entradas do CLP.

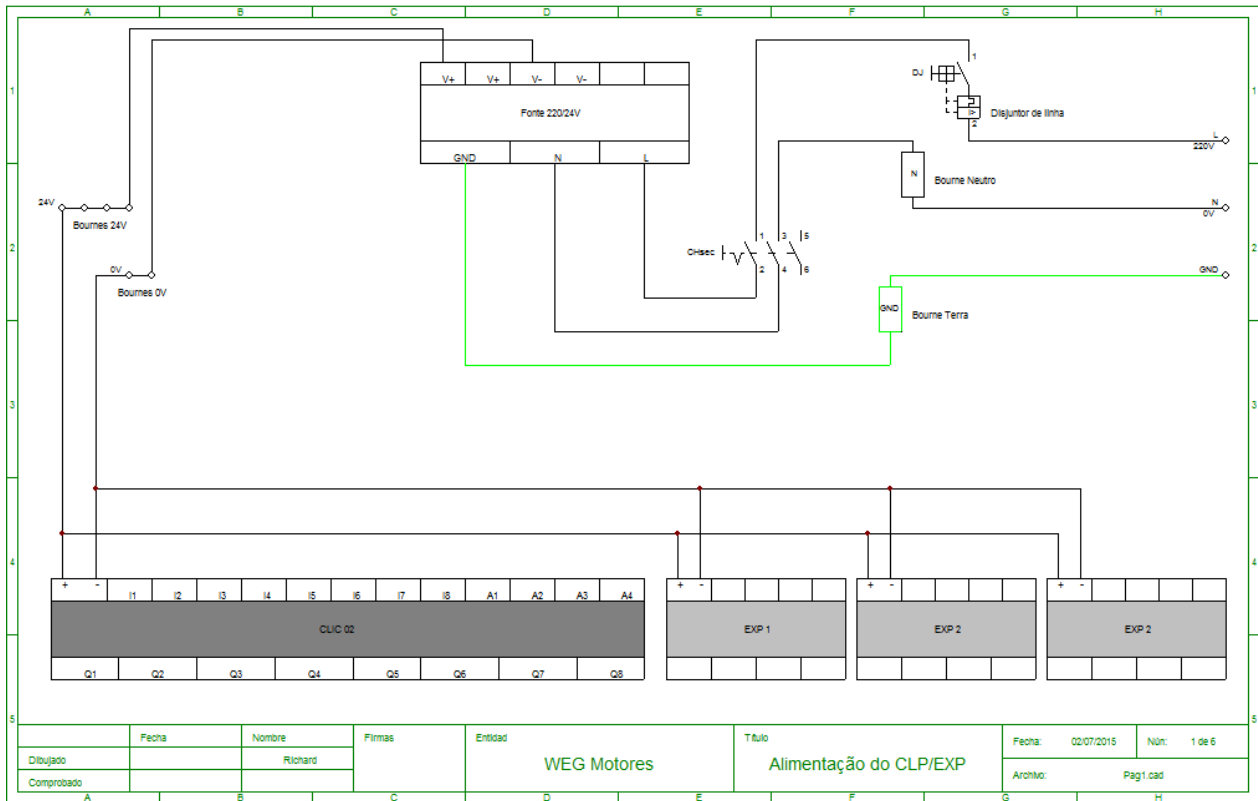


Figura 33 - Alimentação do CLP e Expansões

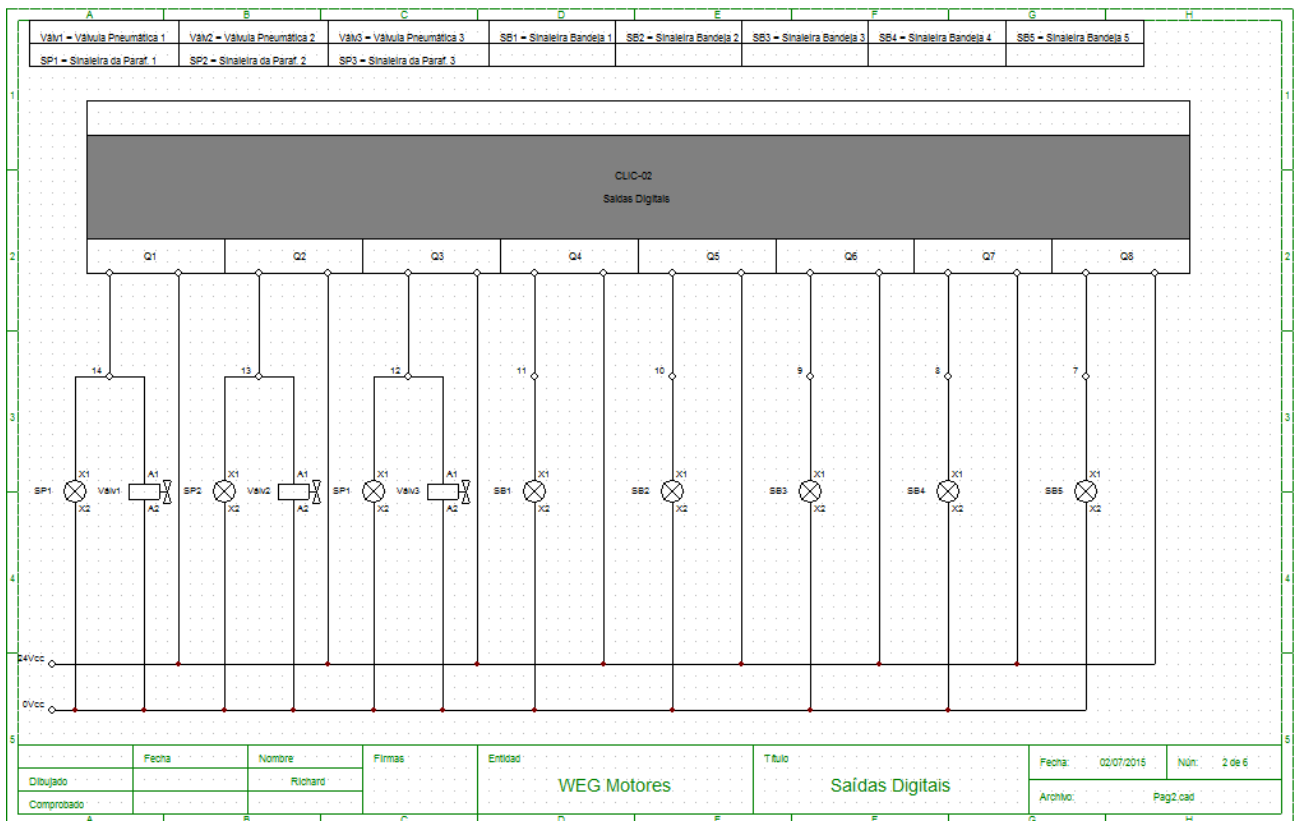


Figura 34 – Saídas do CLP

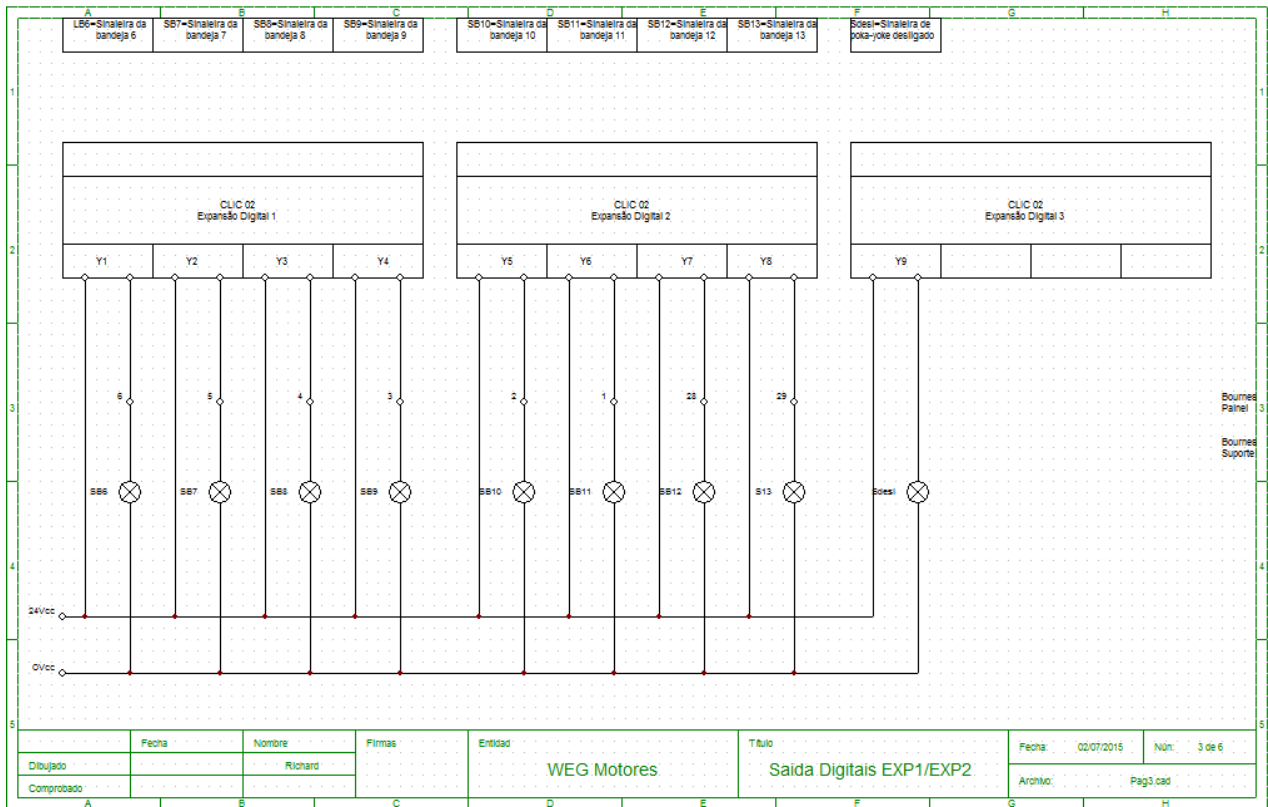


Figura 35 - Saídas das Expansões

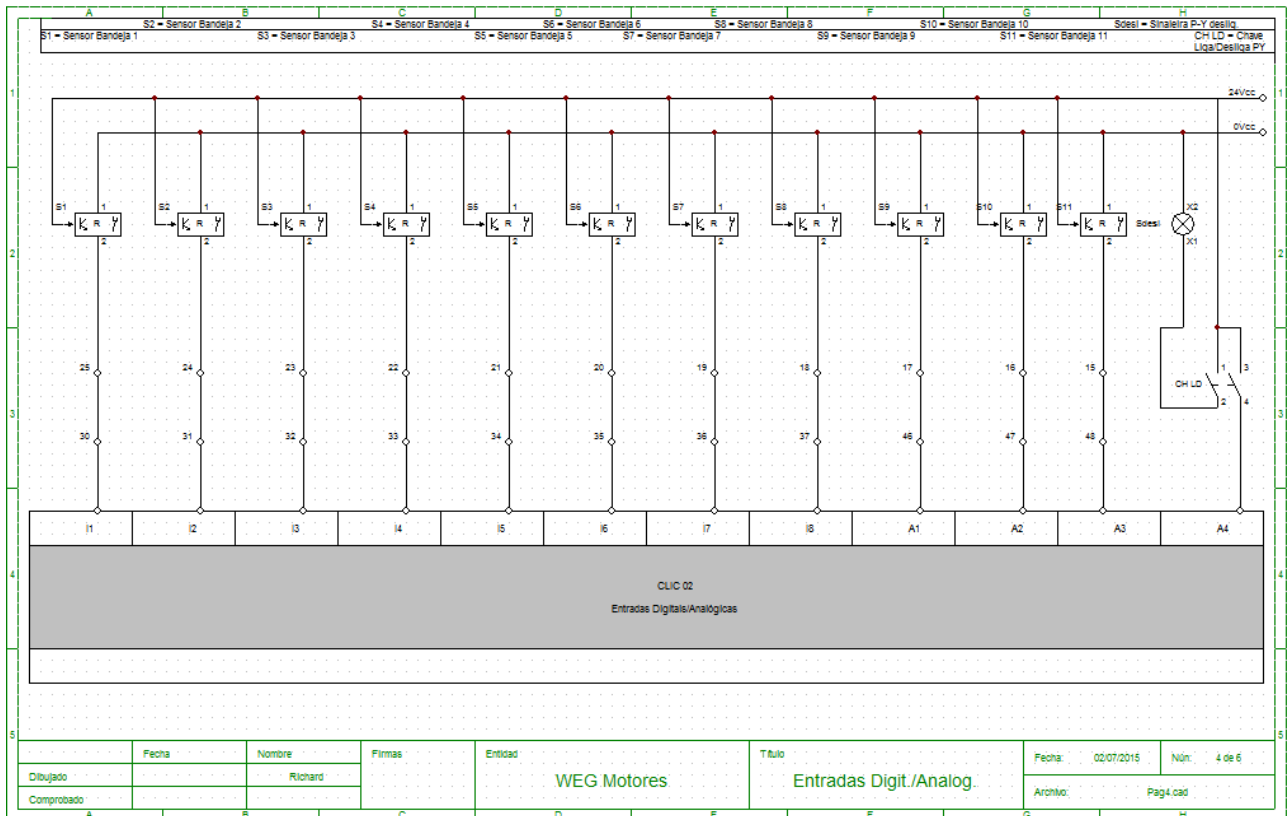


Figura 36 - Entradas

4.4. Hardware Utilizado

Nesse projeto, foram utilizados internamente no painel eletrônico um CLP CLIC 02 e 3 expansões de E/S, fabricados pela WEG Drives & Controls. São equipamentos idealizados para aplicações de pequeno e médio porte em tarefas de intertravamento, temporização, contagem, entre outras aplicações de menor complexidade. Um exemplo de um modelo do CLIC02 e sua respectiva expansão é mostrado na Figura 37.



Figura 37 – CLIC 02 e Expansão de E/S

Para acionamento e bloqueio das parafusadeiras foram utilizadas 3 válvulas de duplo piloto, acionadas por solenoide e de retorno por mola, de 5/2 vias. Apesar do número de vias disponíveis, apenas duas foram utilizadas e as restantes foram bloqueadas.

Outra característica importante é que essas válvulas possuem um tipo de um parafuso que permite efetuar a sua comutação manual, o que pode ser necessário caso algum problema ocorra com a acionamento do sistema ou com os demais equipamentos. Assim elas podem ser comutadas e as ferramentas podem continuar a ser utilizadas até que os problemas sejam eliminados.

Para detecção da escolha do operador, foram posicionados 13 sensores ópticos, um em cada compartimento de armazenamento dos parafusos, como ilustrado na seção 4.9. Além disso, foram utilizados 16 indicadores luminosos coloridos, de forma que cada cor correspondia a uma bitola de parafuso.

4.5. Código do CLP

Para a implementação do código de acionamento das válvulas e dos diversos indicadores luminosos foi utilizado um CLP CLIC02, descrito na seção

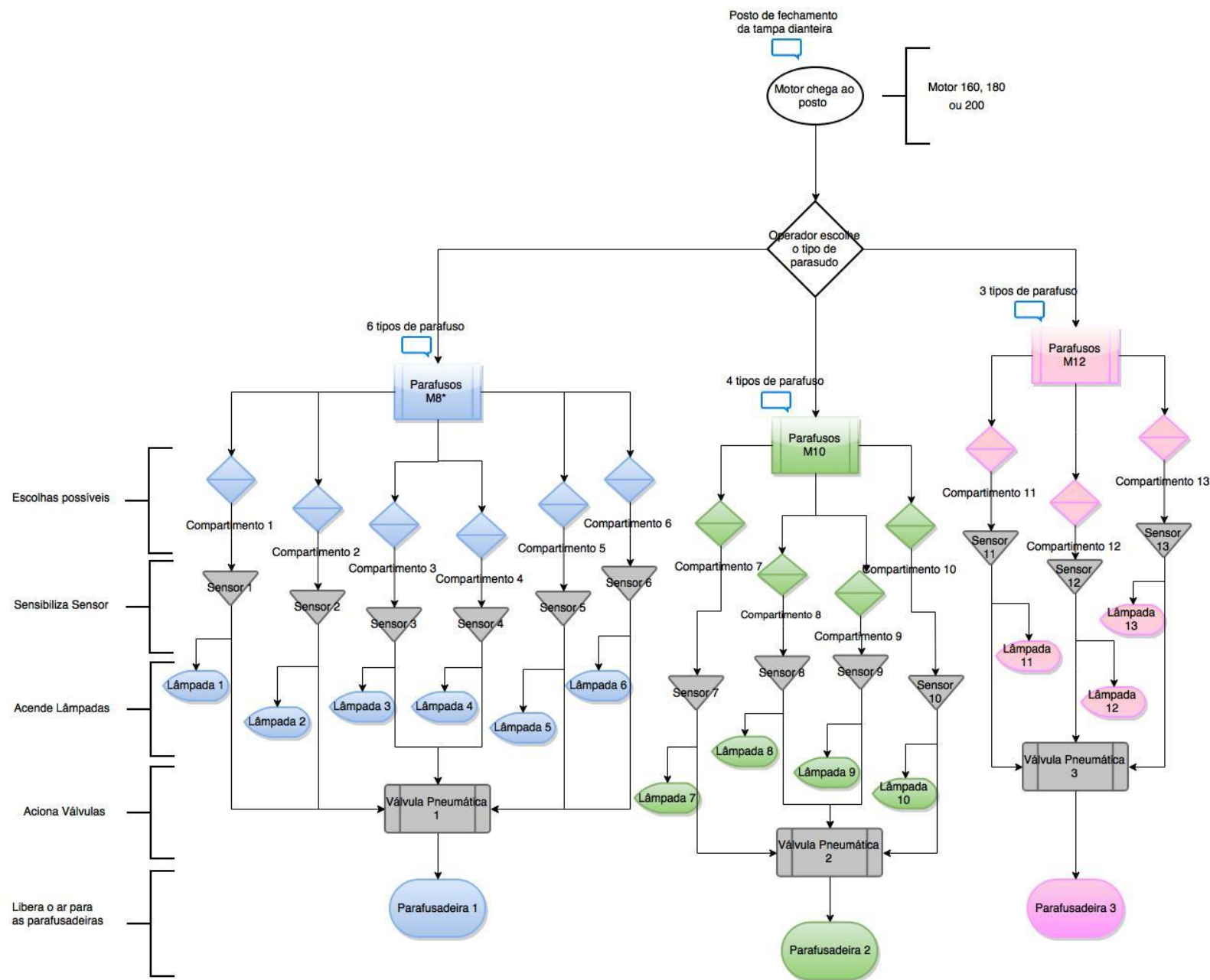
anterior. No projeto, foram utilizadas 3 expansões de E/S, já que foram necessárias 17 saídas do CLP e 14 entradas. Cada expansão possui 4 saídas e 4 entradas.






A linguagem utilizada foi a linguagem LADDER, embora o CLP aceite também uma programação em FBD. O código foi baseado na lógica mostrada no Fluxograma 1. Na sequência são mostrados alguns trechos de código.

Cada sensor está ligado em uma entrada do CLP. Assim, com o sensor Sn sensibilizado – o sensor é sensibilizado no momento em que o operador escolhe um determinado parafuso - a respectiva parafusadeira é liberada – cada parafusadeira é acionada por uma válvula pneumática - assim como suas respectivas lâmpadas são acesas. Quando um novo parafuso é selecionado, as saídas atuais são desligadas, de forma que uma nova lâmpada e uma nova válvula é acionada. Cada indicador luminoso e cada válvula está conectada a uma saída do CLP. A instalação física do sistema é mostrada nas seções 4.6 e 4.9.

O código possui três variáveis auxiliares para acionamento das válvulas. Quando um sensor de uma bandeja com qualquer dos seis parafusos M8 é sensibilizado, a válvula 1 é acionada, a sinaleira correspondente àquela bandeja – sinaleira presente em frente ao respectivo compartimento - e a sinaleira correspondente à parafusadeira 1 – sinaleira presente em frente à respectiva parafusadeira - é acesa. Similarmente, quando qualquer dos 4 parafusos M10 é selecionada, a sinaleira correspondente a parafusadeira 2 é acesa, além da sinaleira do compartimento escolhido. O mesmo ocorre para qualquer dos parafusos M12; dessa vez, porém, a parafusadeira 3 é liberada, e similarmente as respectivas sinaleiras são acesas.

Na sequência, o Fluxograma 1 detalha o funcionamento do sistema de forma visual.



- Legenda
-  Escolhas Possíveis
 -  Sensibiliza sensor
 -  Acende lâmpadas
 -  Aciona Válvula
 -  Libera o ar para parafusadeiras

Fluxograma 1 - Funcionamento do Sistema

Abaixo mostramos o exemplo de uma das variáveis auxiliares criadas para efetuar o acionamento das saídas das válvulas. Se qualquer dos sensores correspondentes for sensibilizado (se o operador escolher algum daqueles parafusos, no caso da Figura 38, um M8) a variável auxiliar fica ativa, e na sequência ela aparece como uma das condições de acionamento da válvula.

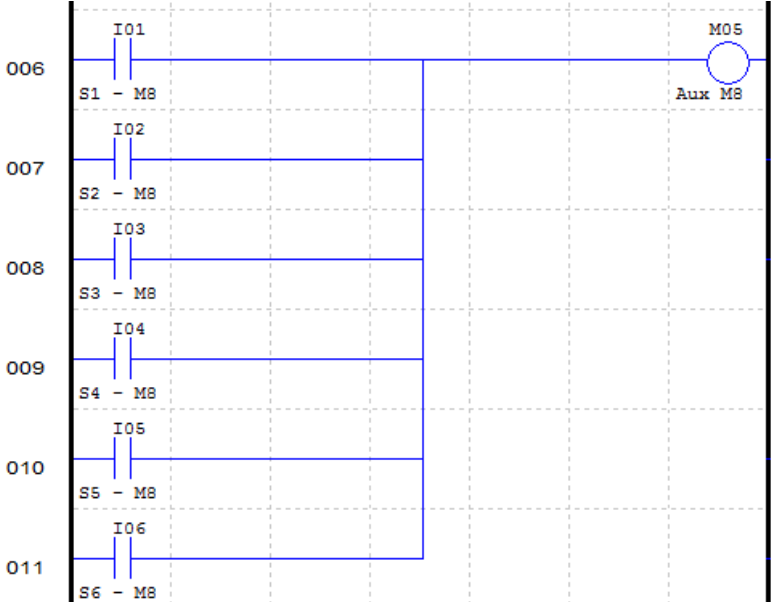


Figura 38 - Variável auxiliar para acionamento das válvulas

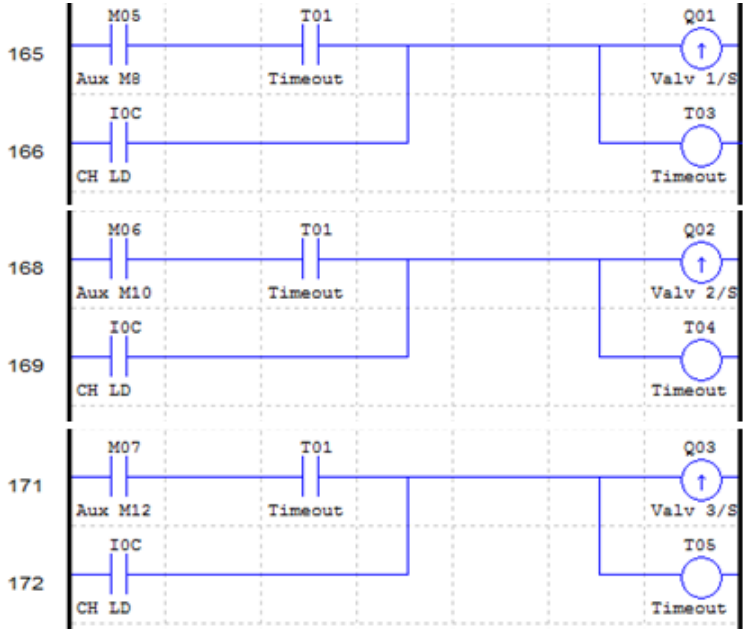


Figura 39 - Acionamento das saídas das válvulas

Nesse trecho mostrado na Figura 40 mostramos o tratamento de um possível erro operacional: o caso de um operador colocar a mão em dois sensores que

acionariam válvulas diferentes. Nesse caso, a lógica faz com que nenhuma saída possa ser acionada.

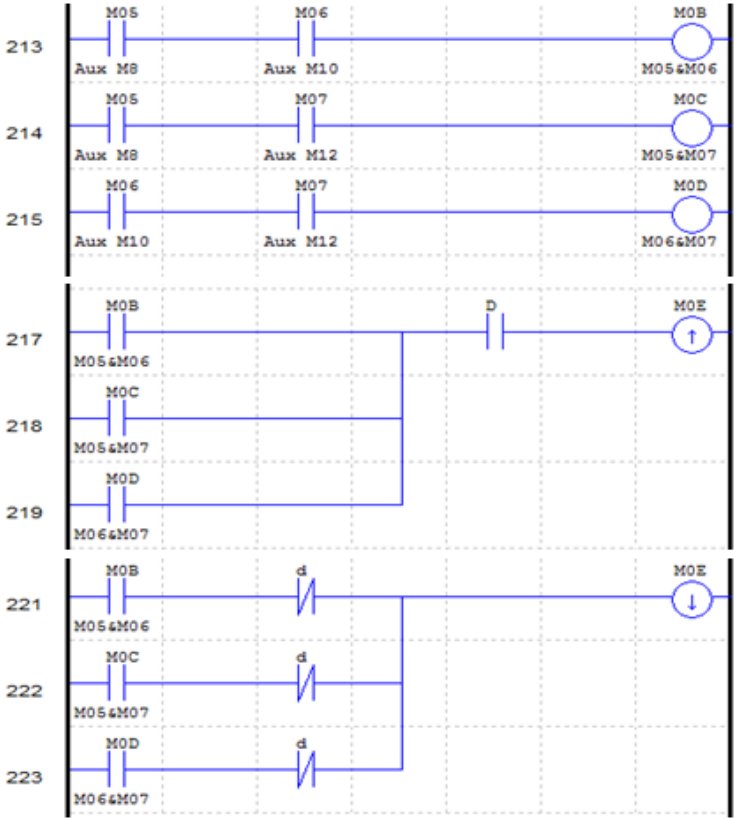


Figura 40 - Tratamento de possível erro operacional

4.6. Montagem dos painéis

4.6.1. Painel eletrônico

A Figura 41 ilustra o início da montagem do painel, realizada na seção Metrologia da WEG.

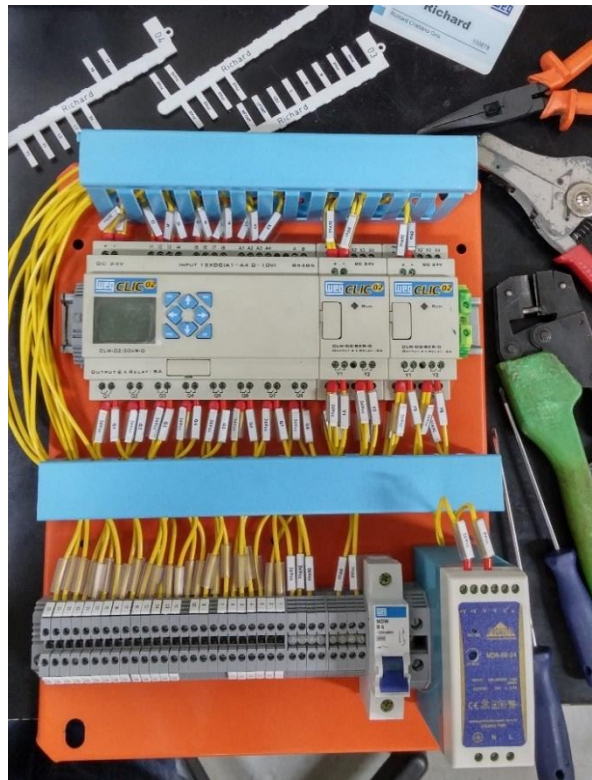


Figura 41 - Início da montagem do painel eletrônico

A Figura 42 por sua vez mostra o painel inicialmente posicionado no suporte, já na Fábrica, porém ainda sem o cabeamento que levava até a caixa de passagem e até os sensores e atuadores.

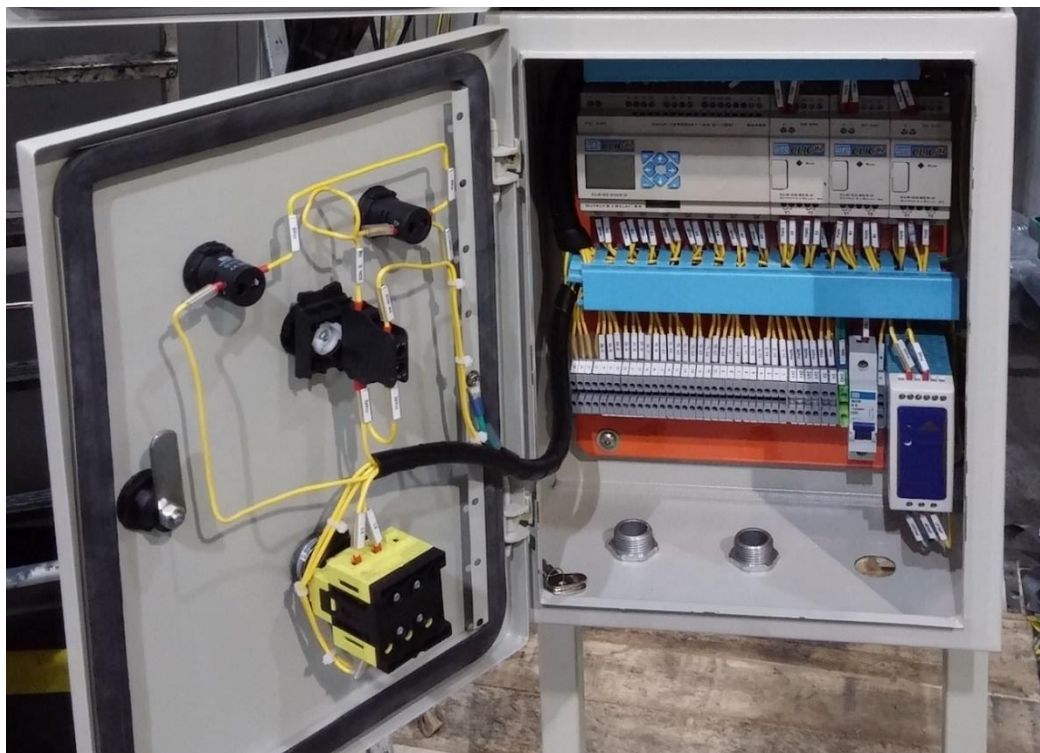


Figura 42 - Painel eletrônico posicionado no suporte

O painel é composto internamente de um CLP – descrito na seção 4.4 - conectado a 3 expansões de E/S, cabeamento para as entradas e saídas, um disjuntor para a entrada da alimentação 220V, bournes para separar as entradas e saídas do painel para os sensores e lâmpadas externas e uma fonte 220/24V. Na parte frontal do painel está presente uma chave seccionadora para desligamento geral do sistema – dessa forma todas as válvulas e indicadores luminosos são desligados, e portanto nenhuma parafusadeira poderá ser acionada – além de uma chave de Liga/Desliga Poka-Yoke e duas lâmpadas indicando se o Poka-Yoke está ligado ou desligado. Essa chave é acionada com uma chave física removível, que fica em posse apenas de um responsável pela montagem, e nunca de um operador. Ela serve para desligar o Poka-Yoke, efetuando um “*by-pass*” no sistema, ou seja, para o caso de algum sensor ou cabeamento apresentar problema, o responsável desliga o Poka-Yoke e um comando em software é emitido para que todas as válvulas sejam acionadas, ou seja, para que todas as parafusadeiras fiquem ligadas. Assim, o processo funciona como se o sistema não existisse, até que se corrijam as eventuais falhas, e o Poka-Yoke possa ser novamente religado.

4.6.2. Painel Pneumático

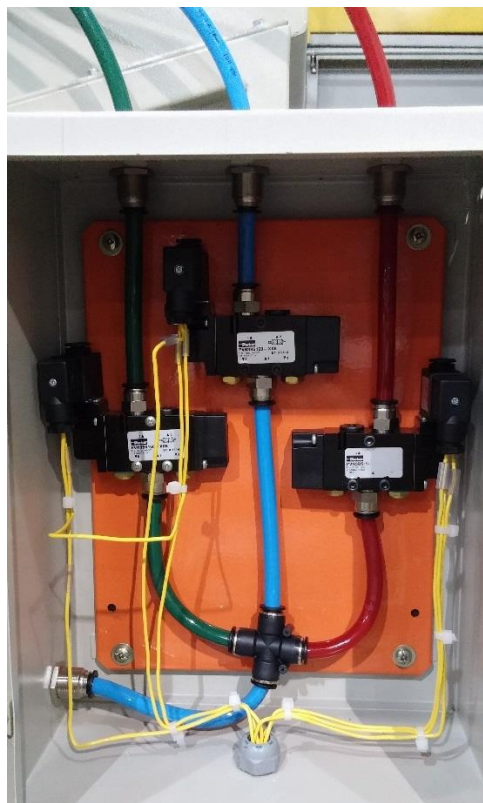
O painel pneumático é composto de três válvulas pneumáticas – detalhadas na seção 4.4, cada uma delas comandada por uma das saídas do CLP. Nesse painel, existe apenas uma entrada central de ar, proveniente da linha principal de ar comprimido da fábrica. Essa entrada é conectada em uma conexão pneumática em forma de “T”, para que ela possa ser distribuída para cada uma das válvulas. Assim, de uma entrada central, são distribuídas as três entradas das válvulas e, cada uma das válvulas possui uma mangueira de saída, saindo do painel e conectada diretamente a um FR+L (filtro, regulador e lubrificador), esses por sua vez conectados então às parafusadeiras. Os reguladores de pressão foram especificados no escopo do projeto porque sabe-se que a pressão da rede da Fábrica é bastante variável. Por isso, sabendo que a pressão de operação influencia também no torque entregue pela parafusadeira, foram instalados esses reguladores de pressão com o objetivo de manter a pressão de operação das parafusadeiras sempre constante (6 bar). Cada parafusadeira tinha na sua entrada um desses aparelhos. A imagem a seguir mostra o FR+L, utilizado para regular a

pressão. Além disso, o equipamento garante também uma boa lubrificação das ferramentas e filtragem de partes sólidas presentes na rede de ar comprimido.



Figura 43 - Filtro, regulador e lubrificador

Para o painel pneumático foram escolhidas mangueiras coloridas (uma cor diferente para cada parafusadeira) para facilitar a manutenção e evitar possíveis trocas das mangueiras, propositais ou não. A seguir mostramos o painel com as 3 válvulas e o cabeamento vindo do CLP, utilizado para comandá-las.



4.7. Suporte para parafusos

Em conjunto com o técnico da montagem da Fábrica, elaboramos um projeto em software CAD com as dimensões calculadas como ideais para o projeto. Após consulta com o preparador da linha e demais operadores, foi detectado que 13 tipos de parafusos podem ser eventualmente utilizados na linha 3, além de mais três v-rings – peça de borracha para vedação da tampa – por isso o suporte tinha 16 compartimentos, 13 controlados pelos sensores e 3 para os dispositivos de vedação, não controlados ainda – embora já tenha sido prevista sua integração com o restante do sistema. Foi requisitado que o suporte viesse com as furações com as medidas dos sensores e das sinaleiras.

Na sequência mostramos o suporte, além das chapas posicionadas na parte frontal do suporte para instalação dos sensores e os compartimentos onde seriam colocadas as peças (dos quais o operador faz a seleção).

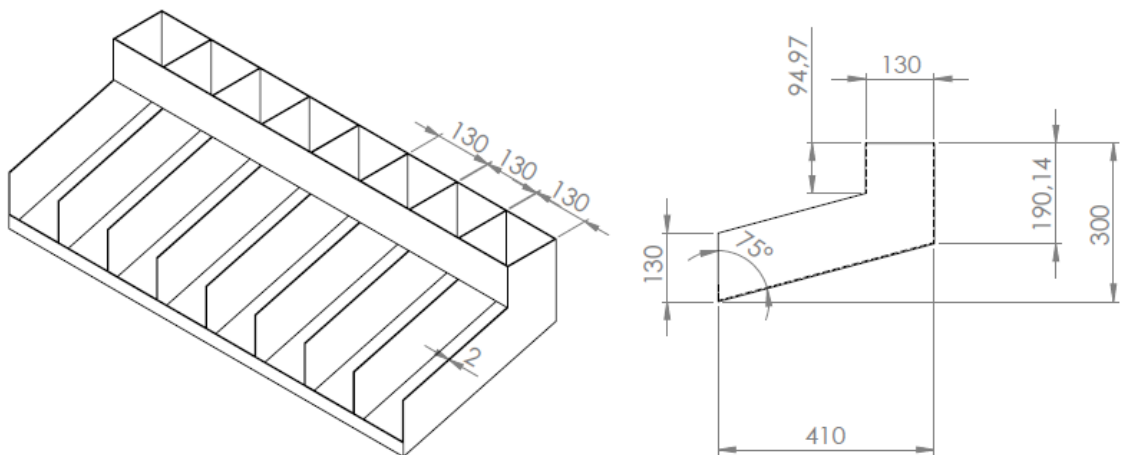


Figura 45 - Compartimentos disponíveis para a escolha do operador

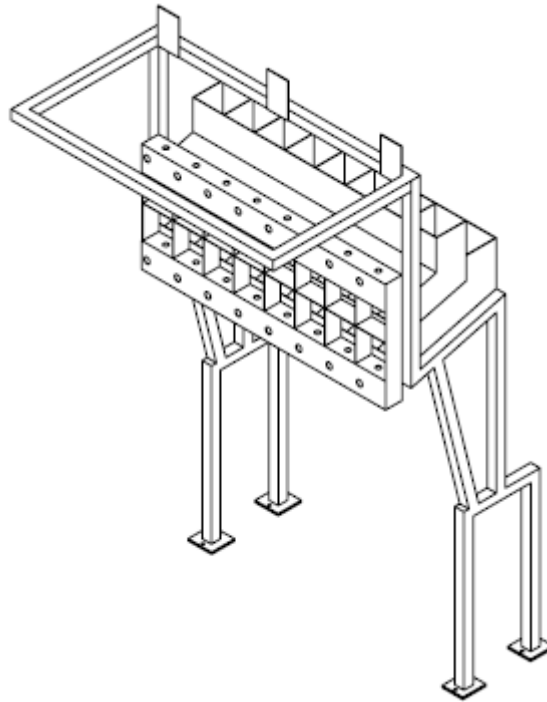


Figura 46 - Suporte completo para os parafusos

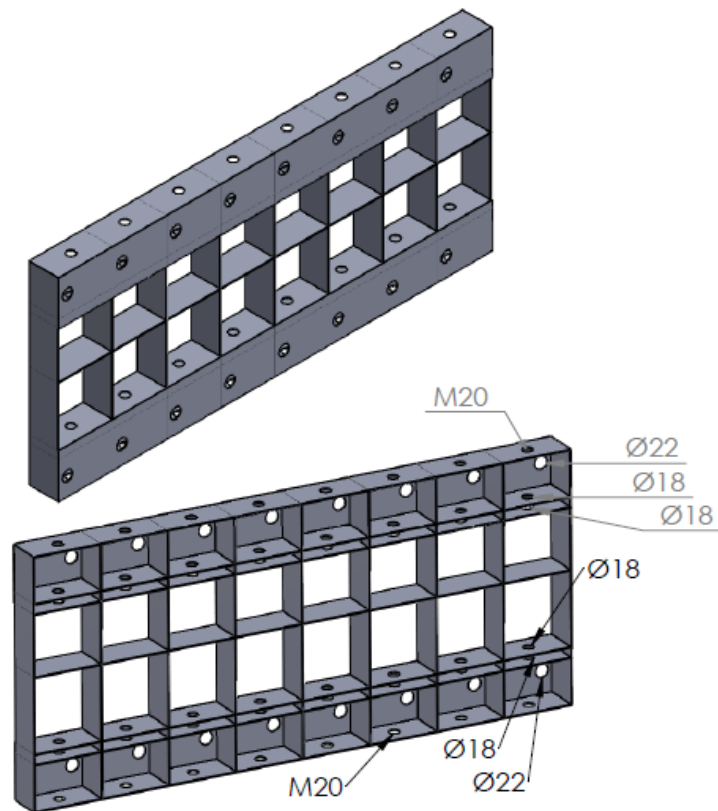


Figura 47 - Chapas onde são posicionados os sensores e lâmpadas

4.8. Depuração de erros e testes

Primeiramente, foram feitos testes em laboratório, colocando sensores nas entradas e elementos passivos nas saídas para atestar o funcionamento das ligações elétricas bem como do código do CLP.

A Figura 48 mostra a etapa de testes do painel em laboratório.



Figura 48 - Testes de software no painel eletrônico

Após posicionado na fábrica, alguns testes iniciais foram feitos com os sensores e atuadores, com o CLP conectado ao PC. A instalação na linha tinha que ser rápida para interromper o mínimo possível o seu funcionamento. Por isso as ligações elétricas bem como a lógica do CLP deveriam estar muito bem revisadas antes da implementação do sistema na linha.

Na instalação, um dos problemas encontrados foi que, para instalar esse suporte, o antigo tinha de ser retirado, e todas as peças que estavam armazenadas nele tiveram de ser colocadas em um local temporário, atrapalhando temporariamente o andamento da produção. Além disso, alguns ajustes tiveram de ser feitos devido à fatores não previstos anteriormente. Uma vez posicionado na linha, o suporte foi parafusado no chão e, após conferência visual da montagem, finalmente o sistema pode ser ligado. Sua instalação na linha não é mostrada aqui devido a motivos de confidencialidade da linha de produção e de seus elementos.

4.9. Instalação na Fábrica VI

Para a instalação do sistema na fábrica, primeiramente foi realizado o posicionamento físico dos sensores e indicadores luminosos, bem como dos painéis pneumático e eletrônico. Após, foram efetuadas as ligações elétricas, estas que foram feitas fora da linha, pois demandavam bastante tempo e espaço para posicionamento das peças, demais partes do sistema e ferramentas. As ligações foram feitas na parte inferior e superior do suporte, de forma que cada um dos cabamentos dos sensores, ou das sinaleiras era passada em uma canaleta – para fim de organização do cabeamento – e em seguida, todos os cabos foram ligados a uma caixa de montagem, na parte inferior do suporte (mostrada nitidamente na Figura 49 -Vista da parte de trás do sistema). Essa caixa de montagem foi utilizada para que não fossem levados todos os fios diretamente até o painel com o intuito manter a organização do cabeamento e também para facilitar sua manutenção no futuro. Isso porque, cada sensor possuía 3 cabos, um para o sinal, um para 24V e outro para 0V. Similarmente, cada sinaleira possuía 2 cabos, um para sinal e outro para 0V. Dessa forma, se fossem levados diretamente ao painel, mais de 70 cabos seriam levados ao painel, tornando sua montagem muito desorganizada, não visual e de difícil manutenção. Por isso, todo esse cabeamento foi levado primeiramente até a caixa de montagem e, só assim, da caixa de montagem, apenas um cabo por sensor e um cabo por sinaleira foi levado ao painel. Para efeitos de blindagem e também resistência mecânica, foi utilizado um cabo multivias (2 cabos 16 vias) com lâminas para blindagem contra interferência eletromagnética, para lançar os cabos de sinal dos sensores e sinaleiras da caixa de montagem até o painel eletrônico. Todos os cabos que saiam do painel ou da caixa de montagem foram ainda inseridos em um eletroduto com um rígido revestimento metálico, principalmente para proteção contra choques mecânicos.

Para a instalação final do sistema na linha de montagem 3, foi feito um chamado para o setor de utilidades, para instalação de um ponto de energia com 220V. Assim, após feitas todas as ligações elétricas, foram realizados os testes de software e depuração de erros – tratados no Capítulo 4.8 – para, somente então, efetuar a fixação do suporte completo na linha. Foi então retirado o suporte anteriormente utilizado e colocado o novo, parafusado no chão e ligado na tomada. Assim, foi feito um acompanhamento para detectar se o sistema estava

funcionando como previsto e também para auxiliar os operadores nesse primeiro momento. Nos dias seguintes, foi proposto um treinamento completo dos operadores, esse detalhado na seção 4.10. O sistema posicionado no posto de trabalho é mostrado nas figuras seguintes nesse capítulo.



Figura 49 - Vista da parte de trás do sistema



Figura 50 - Vista lateral do sistema e dos painéis



Figura 51 – Vista frontal do sistema instalado na Fábrica VI

4.10. Treinamento de operadores

Como já ressaltado anteriormente, os operadores da linha foram consultados acerca do projeto antes da sua concepção, para receber suas opiniões sobre se eles se adaptariam facilmente ao sistema, e sobre como o sistema poderia ser mais amigável, na prática. Minha função foi tentar propor um sistema que fosse funcional, mas que não enfrentasse grande resistência dos operadores. Por isso, durante a etapa de treinamento, os operadores já estavam cientes da implementação do projeto e alinhados com seu objetivo. Foi uma introdução de um processo diferente, de forma gradual, e com o diálogo com quem faz a operação diariamente.

O treinamento foi fornecido em dois turnos (1º e 2º) e já foi uma oportunidade para detectar possíveis erros que não foram previstos durante a instalação. Nesse período fiquei disponível para tirar eventuais dúvidas dos operadores também. Após o treinamento, disponibilizei um manual de operação de fácil consulta e fácil

entendimento – na forma de um “guia rápido de utilização” - em frente ao posto de trabalho.

4.11. Problemas encontrados

No início do projeto, durante a etapa de acompanhamento e levantamento de dados do processo de montagem, as maiores dificuldades foram o pouco conhecimento sobre as demais operações e sobre as características de cada motor. Após trabalhar com mais atividades e conhecer as demais fábricas e processos – como fundição, usinagem, injeção – foi possível entender melhor toda a etapa produtiva do motor e o papel do processo de montagem no produto acabado. Com o início dos trabalhos de controle de torque, foi necessário entender sobre toda a sequência das operações de montagem, sobre as ferramentas de aperto e sobre os instrumentos de medição utilizados. O desconhecimento sobre fabricantes de ferramentas ou instrumentos de medição de torque mais robustos foi um empecilho durante a fase de orçamento e levantamento das melhores soluções, mas após estudo de mercado e coleta de informações com outras empresas do grupo WEG com procedimentos de controle de torque mais avançados, foi possível trazer para a equipe as informações devidas e as melhores soluções no que se relacionava a controle de torque.

Além disso, durante a etapa de concepção do projeto, algumas informações erradas sobre as peças utilizadas na linha foram repassadas, comprometendo assim a montagem dos painéis - aumentando o número de sensores, por exemplo: foi necessário adicionar outra expansão e fazer algumas alterações no painel mesmo depois de finalizado, pois foi detectado que dois tipos novos de parafusos não previstos anteriormente poderiam ser utilizados na linha.

Na etapa de implementação do projeto, as dificuldades foram pouco conhecimento para realizar uma montagem eletrônica tão grande e tão detalhada, além de inserida no processo, no meio de uma linha de montagem com grande produção de motores. Por esse e outros motivos, a montagem eletrônica deveria ser robusta e não dar margem a falhas, também deveria suportar possíveis choques mecânicos e contato com um ambiente de certa forma agressivo – com presença de partes sólidas no ar, por exemplo. Assim, todos os detalhes na própria

montagem dos painéis, no que dizia respeito a que instrumentos utilizar, ao posicionamento e vedação destes, se mostravam extremamente importantes.

Como ressaltado nas seções anteriores, a montagem dos painéis foi realizada na Metrologia da WEG; nem sempre era possível encontrar as ferramentas necessárias na Metrologia, por isso era constante a busca por ferramentas em outros setores.

Não se tinha também experiência com o uso de ferramentas mais complexas, por isso alguns problemas operacionais foram encontrados durante a etapa de instalação física do sistema na fábrica, na qual foi necessário utilizar as mais diversas ferramentas para furação, fixação, conexão e acabamento das diversas partes. Na parte de implementação também era necessário tomar emprestado ferramentas de diversas áreas das fábricas, atrasando muitas vezes o andamento dos trabalhos. Também havia pouca orientação da chefia e demais responsáveis, então a parte de montagem dos painéis e instalação eletrônica e cabeamento foi de certa forma “faça você mesmo”, apesar de o *input* de pessoas de diferentes áreas – desde a área técnica, engenharia até a produção – ter ajudado muito a tomar as melhores decisões e escolher as melhores soluções.

Muitas vezes depender de outras áreas pode atrasar o andamento dos trabalhos ou pode mudar o escopo previsto a princípio para o projeto. Isso mostrou que algumas atividades têm que ser previstas com maior antecedência quando dependem do trabalho de outras pessoas, para garantir o cumprimento dos prazos e metas estipulados.

4.12. Resultados Qualitativos

O sistema foi recentemente posicionado na linha, portanto não houve um tempo adequado para levantamento efetivo de resultados tampouco para medições em peças. Não foi possível agendar com o departamento PCP um lote para testes de peças, pois um lote de testes pode demorar de 20 dias a dois meses para ser liberado, dependendo da produção da fábrica. Porém, foram testados por amostragem alguns motores dos três tamanhos de carcaça montados e todos os testes demonstraram valores de torque dentro das especificações.

Após instalado o sistema, conseguimos acompanhar a montagem por alguns dias, sempre observando as escolhas do operador. Observou-se que em nenhum caso o operador utilizou uma ferramenta incorreta. Já nos primeiros dias, o sistema se mostrou muito útil para guiar um operador inexperiente que recentemente havia começado naquela linha de montagem.

Além disso, como discorrido na seção Ferramentas de aperto, sabe-se que as novas ferramentas utilizadas fornecem menos reação aos operadores. Isso foi comprovado em pesquisa informal com os operadores que utilizaram o sistema: as novas máquinas eram mais ergonômicas e o esforço aplicado durante o turno era menor. Além disso, o sistema satisfaz os operadores no sentido de acelerar a produção, isto é, não ser necessário apertar com um torquímetro alguns motores que demandavam um controle em 100% das peças – para alguns clientes específicos - e garantir um torque correto para todos os diferentes tamanhos de motores – anteriormente era comum ter de retirar o parafuso e refazer a rosca, devido à sobre ou subtorque.

Antes da concepção do projeto, os custos relacionados à problemas e retrabalhos na montagem foram levantados. Não existe um controle exato de quanto desses valores de refugo/retrabalho relativos a montagem se devem a torque incorreto de aperto, sabe-se apenas que o problema ocorreu na montagem. Sabe-se que subtorque pode não fechar corretamente a tampa – comprovado com um exemplo apresentado pelo departamento de Controle da Qualidade no qual um motor teve a tampa aberta em campo.

Além disso, sabendo que a montagem possui 5 postos de trabalho, foi utilizado o método estatístico de estimativa “20/80”, e estimamos que 20% desse custo era relativo a sobretorque. Esse sobretorque levava comumente à quebra de parafusos, danificação das roscas das carcaças, até, em casos mais graves, refugo de tampas e carcaças. Dessa forma, somando-se o custo dessas partes físicas danificadas ao retrabalho (os custos em valores reais não puderam ser citados nesse trabalho), foi possível inferir que o retorno sobre o investimento ocorrerá entre 4 e 5 meses.

Foi considerado que o custo com esse tipo de defeito cairá para 20% do valor atual; ou seja, considerando que os erros relacionados a torque de aperto nesse posto de trabalho específico (posto de fechamento da tampa dianteira, da

Linha de montagem 3) sejam reduzidos em 80%, espera-se que o custo com problemas decorrentes de torque incorreto de aperto caia para 20% do que é gasto atualmente e, por fim, que o sistema será pago pelo seu próprio funcionamento em até 5 meses. Essas estimativas foram embasadas em dados de mais de uma montadora e devidamente validadas com o gestor e analistas das Engenharia Industrial, também como uma forma de justificar a implementação desse sistema quando da aprovação dele junto ao departamento de Produção VI.

5. Conclusões e Perspectivas futuras

Os trabalhos desenvolvidos envolveram uma sequência completa de análise de uma situação ou processo, detecção de problemas, busca pelas suas causas-raiz, concepção de uma solução, implementação e validação dessa solução.

Nesse sentido, os primeiros trabalhos – de criação de um procedimento para a área produtiva no que se refere a torque de aperto e em seguida a proposta de capacitação das Fábricas montadoras com ferramentas de aperto capazes - foram apresentados a uma comissão técnica para debate e aprovação. Ainda nesse contexto, foi proposto então um sistema que pudesse garantir o controle de torque, já que as ferramentas a serem adquiridas não permitiam um controle ativo de torque – por software, por exemplo – e por isso algum mecanismo alternativo deveria ser criado para o controle do torque de aperto. Nisso, após estudo de diversas soluções, um sistema simples e de baixo custo tal como o Poka-Yoke - na forma de um *Pick by Light* – implementado, se mostrou como uma ótima saída, por isso foi especificado junto à seção de Metrologia, devidamente orçado e apresentado a chefia da Engenharia Industrial e da Fábrica VI.

O sistema tinha a proposta de garantir a escolha da ferramenta correta pelos operadores. Quando o operador efetuava a escolha de um parafuso, o sistema automaticamente entendia sua escolha e liberava apenas a ferramenta correta para cada tamanho de motor, indicando também ao operador qual ferramenta deveria ser escolhida. Mesmo que o operador selecionasse uma ferramenta incorreta, ela não era acionada, visto que sua alimentação de ar estava bloqueada. Isso foi de fundamental importância para guiar operadores com pouco conhecimento de processo além de facilitar o seu trabalho, bem de tirar a decisão das mãos do operador, garantindo assim o uso da ferramenta adequada e o controle do torque de aperto.

Após instalado o sistema, um período de treinamento de operadores foi cumprido e, após internalizado o sistema pelos operadores, foi possível partir para uma etapa preliminar de coleta de resultados. Por análise amostral de peças montadas, detectou-se que o torque de aperto para os três tamanhos de carcaça montados naquela linha estava dentro da faixa permitida pela norma, e que os operadores estavam utilizando a ferramenta correta em 100% dos casos,

mostrando então que o sistema cumpriu o que se propôs a fazer, que era garantir o uso da ferramenta correta – e pré-calibrada – para garantir um controle do torque de aperto, reduzindo os problemas de batimento axial de flange fora da especificação.

Como já destacado, esse projeto se trata de um piloto para controle de torque na WMO. Um período de testes e validação, deve ser cumprido para analisar a real funcionalidade do sistema e seus eventuais problemas, testes esses que em acordo com a fábrica e demais responsáveis da Engenharia Industrial por dar continuidade ao projeto, serão feitos por três meses. Caso o sistema seja bem aceito na fábrica tanto no que se refere à área operacional quanto aos gestores, a intenção é de fato replicar o sistema para outras fábricas. Na verdade, o sistema atualmente já está em estudo para replicação em mais uma Fábrica montadora. Uma vez que as necessidades das Fábricas montadoras quanto à controle de torque são muito similares, a expectativa é que, salvas as devidas adaptações, o sistema seja replicado sem grandes alterações para todas as demais montadoras. Para isso, foi disponibilizado, além do código do CLP e do projeto elétrico, um relatório completo detalhando as etapas cumpridas até chegar a instalação do sistema, bem como o custo e o tempo dedicado ao projeto e à sua instalação física.

Nesse mesmo sistema, algumas melhorias já foram previstas, apenas não implementadas por impossibilidade no tempo hábil disponível, mas já anexadas no relatório técnico do projeto, bem como já foi lançada a fiação necessária para cada um dos sensores/indicadores a serem posteriormente instalados e ligados nos painéis. Uma das melhorias já propostas é a indicação de uma outra peça que deve ser selecionada de acordo com a escolha do operador. Essa peça é chamada de v-ring, um anel de vedação utilizado nas tampas. Dessa forma, a ideia é que, quando o operador selecionar um parafuso que deve ser utilizado em um motor com determinado tamanho de carcaça, um indicador luminoso seja aceso para que ele selecione o v-ring correspondente, de forma que o sistema não passe para um próximo estado (liberar outra ferramenta, por exemplo) enquanto o operador não capturar aquela peça. Outra melhoria prevista é a contagem de apertos realizados por cada ferramenta, para que, dessa forma, seja possível prever as próximas calibrações necessárias para aquela ferramenta, já que a perda da calibração das ferramentas é diretamente proporcional ao número de apertos realizados.

É importante destacar que no início desse trabalho, algumas outras soluções foram estudadas, desde acionamento manual por botoeiras, até a leitura com código de barras das ordens de produção. Essa seria de fato a solução que garantiria o menor número possível de erros, ao mesmo tempo que tinha certas particularidades que impediam sua implementação no tempo disponível para o estágio. Além disso, alguns problemas presentes nessa solução dificilmente poderiam ser tratados sem torná-la muito complexa e de certa forma, inviável. A ideia desse leitor de código de barras é que, uma vez que um motor chega na linha, o operador faça a leitura da sua ordem de produção e assim, automaticamente, o sistema liberaria a ferramenta correta. Um empecilho seria saber por quanto tempo aquela ferramenta deveria ficar disponível, pois mesmo se feita a contagem das peças, acontece muitas vezes de haver um lote “interrompido”, ou seja, que ele não seja todo fabricado de uma só vez como previa a ordem de produção. Outro fator considerado foi que essa solução adicionaria uma operação no processo de montagem, aumentando assim o tempo de montagem de um motor. Mesmo assim, tratados esses eventuais problemas, no futuro, sabe-se que é possível fazer uma integração do sistema *Pick by Light* implementado com um leitor de código de barras, garantindo uma redundância na escolha da ferramenta e um controle ainda mais preciso do torque de aperto.

Por fim, durante o desenvolvimento do projeto e em reuniões com os gestores, foi possível estruturar ideias similares que podem vir a ser usadas em outros processos, garantindo a escolha correta das ferramentas ou insumos de acordo com as características de cada motor. Por isso, esse primeiro passo dado no sentido de automatizar um processo com grande intervenção humana, como a montagem, pode servir de exemplo para outros processos com grande variabilidade e baixa mecanização também serem automatizados - como pintura, resinação e até usinagem, visando sempre garantir o aumento da qualidade do produto final.

6. Bibliografia

[1] Dr. Pizzolato. Morgana, "Tolerâncias Geométricas". Disponível em: http://w3.ufsm.br/engproducao/wpcontent/uploads/tolgeom_texto_aula.pdf

[2] Toyota Motor Corporation, "Toyota Production System". Disponível em: http://www.toyota-global.com/company/vision_philosophy/toyota_production_system

[3] Patel. Parikshit. K et al, Vidya. Nair, Patel. Nikunj S, "A Review on use of Mistake Proofing (Poka Yoke) Tool in Blow Molding Process", *International Journal of Science and Research, India*, 2013. Disponível em: <http://www.ijsr.net/archive/v2i2/IJSRON2013431.pdf>

[4] Baudin. Michel, "Working with Machines: The Nuts and Bolts of Lean Operations with Jidoka", New York, EUA, 2007. Disponível em: https://books.google.com.br/books/about/Working_with_Machines.html?id=wYyJoS3Cex4C&redir_esc=y

[5] Norma WEG TBG-0830, WEG, 2002

[6] Tolerância de Forma e Posição, Apostila WEG, código TR131068.

[7] Magadum. Raghavendra, Prof. B.S. Allurkar, "A Comparative Study of Fasteners Tolerance Analysis Methods", *International Journal of Scientific & Engineering Research*, Volume 6, Issue 6, June-2015

[8] Kaisarlis. George. J, "A Systematic Approach for Geometrical and Dimensional Tolerancing in Reverse Engineering", *Reverse Engineering - Recent Advances and Applications*, National Technical University of Athens, Greece, 2012, Disponível em: <http://www.intechopen.com/books/reverse-engineering-recent-advancesand-applications/a-systematic-approach-for-geometrical-and-dimensional-tolerancing-in-reverse-engineering>

[9] "Cinco passos para montagens a prova de erros", Atlas Copco, 2008

[10] Nogueira. Lúcio José Martins, "Melhoria da Qualidade através de Sistemas Poka-Yoke", *Mestrado Integrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais, FEUP*, 2008