

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA
CÂMPUS JARAGUA DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

RICARDO ALBERTO NEUMANN

**APLICAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS EM ESTUDO SOBRE
PERDAS MECÂNICAS DE MOTORES ELÉTRICOS**

JARAGUÁ DO SUL

SETEMBRO DE 2016

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA
CATARINA**

**CÂMPUS JARAGUÁ DO SUL - GERALDO WERNINGHAUS
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM FABRICAÇÃO MECÂNICA**

RICARDO ALBERTO NEUMANN

**APLICAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS EM ESTUDO SOBRE
PERDAS MECÂNICAS DE MOTORES ELÉTRICOS**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica.

Professor Orientador: Eduardo Cardoso Castaldo, Me.

JARAGUÁ DO SUL

SETEMBRO DE 2016

N489a Neumann, Ricardo Alberto

Aplicação de planejamento de experimentos em estudo sobre perdas mecânicas de motores elétricos / Ricardo Alberto Neumann ; orientador Eduardo Cardoso Castaldo. – Jaraguá do Sul, SC, 2016.
47 f.

Monografia (Graduação) – Instituto Federal de Santa Catarina.
Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica

Inclui bibliografia

1. Engenharia mecânica. 2. Motor elétrico. 3. Planejamento de experimentos. 4. Desenvolvimento de produto . I. Castaldo, Eduardo Cardoso. II. Instituto Federal de Santa Catarina. Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica. IV. Título.

CDD 620.1

Catalogado por: Karla Viviane Garcia Moraes – CRB14/1002

APLICAÇÃO DE PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS EM ESTUDO SOBRE
PERDAS MECÂNICAS DE MOTORES ELÉTRICOS

RICARDO ALBERTO NEUMANN

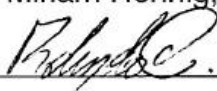
Este trabalho foi julgado adequado para obtenção do Título de Tecnólogo em Fabricação Mecânica e aprovado na sua forma final pela banca examinadora do Curso Superior de Tecnologia em Fabricação Mecânica do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Santa Catarina.

Jaraguá do Sul, 29 de setembro de 2016.

Banca Examinadora:



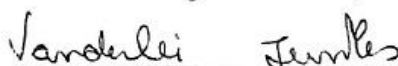
Miriam Hennig, Me.



Eduardo Cardoso Castaldo, Me.



Cassiano Rodrigues Moura, Me.



Vanderlei Junkes, Me.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela saúde.

À família, por ser a base de tudo.

Aos meus amigos do IFSC, pelos momentos de estudo, companheirismo.

Ao professor orientador Eduardo Cardoso Castaldo, pela atenção e pelo aprendizado.

À professora Miriam Hennig, pela dedicação e orientações na realização deste trabalho.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação.

Ao IFSC – Câmpus Jaraguá do Sul - Geraldo Werninghaus.

Muito obrigado!

RESUMO

Na indústria, cada vez mais busca-se inovação, seja um produto novo ou uma forma nova e mais eficiente de manufatura. Junto a essa ideia, vem a questão de otimizar o tempo e aumentar a qualidade dos novos produtos. O processo de desenvolvimento de um produto, para acompanhar essas necessidades, busca novas ferramentas que auxiliem a alcançar esses objetivos. A aplicação de ferramentas como o planejamento de experimentos é um exemplo, já que pode ajudar a encontrar problemas que ocorrem nessa fase, principalmente na etapa de validação do conceito proposto. Este trabalho tem como objetivo fazer uso de ferramentas da metodologia Seis Sigma para solucionar problemas encontrados durante a etapa de desenvolvimento de um motor elétrico. Para isso foram utilizadas as ferramentas de Análise do Sistema de Medição (MSA) e Planejamento de Experimentos (DOE). O resultado alcançado foi a detecção do principal causador das perdas com o auxílio das ferramentas, em um tempo e custos reduzidos. Pode-se concluir que tais ferramentas são uma valiosa ajuda para equipes que trabalham com desenvolvimentos de produtos inovadores e que buscam agilidade e qualidade dos seus produtos.

PALAVRAS-CHAVE: Planejamento de Experimentos. Motor elétrico. Desenvolvimento de Produto.

ABSTRACT

In industry, increasingly seek to innovation is a new product or new and more efficient manufacturing. Along with this idea, there is the question of optimizing the time and increase the quality of new products. The product development process to keep up with these needs, new search tools that help achieve these goals. The application of tools such as design of experiments is an example, as it can help find problems that occur at this stage, especially in the validation stage of the proposed concept. This work aims to make use of Six Sigma tools to solve problems encountered during an electric motor stage of development. For this we used the analysis tools Measurement System (MSA) and Design of Experiments (DOE). The result achieved was the detection of the main cause of losses with the help of tools, at a time and reduced costs. It can be concluded that these tools are a valuable aid to teams working with innovative product developments and seeking efficiency and quality of their products.

Keywords: Design of Experiments. Electric Motor. Product Development

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Classificação de motores	12
Figura 2 - Fluxograma das etapas do trabalho.....	27
Figura 3 - Resultado do DOE Virtual	29
Figura 4 - Estrutura básica do motor	30
Figura 5 – Medição dos motores na Tridimensional	32
Figura 6 – Plano de medições.....	33
Figura 7 – Arruela ondulada de pré-carga.....	33
Figura 8 - Ensaio das arruelas.	34
Figura 9 - Detalhe dos discos.....	34
Figura 10 – Anel de fixação do rolamento dianteiro	35
Figura 11 – Torquímetro	36
Figura 12 - Bancada de ensaios.....	37
Figura 13 - Transdutor de torque e acoplamento flexível	38
Figura 14 - Análise do Sistema de Medição	39
Figura 15 - Árvore de experimentos	39
Figura 16 – Resultado da análise no software estatístico JMP	42
Figura 17 - Árvore dos ensaios da validação.	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Fatores de influência no desempenho	28
Tabela 2 – Lista de fatores	30
Tabela 3 – Níveis dos fatores para o DOE	36
Tabela 4 - Resultados obtidos	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOE - *Design of Experiments*

MSA - Análise do Sistema de Medição

DFSS - *Design for Six Sigma*

N.m - Newton-metro

mm - Milímetro

W - Watt

rpm - Rotações por minuto

Hz - Hertz

SUMÁRIO

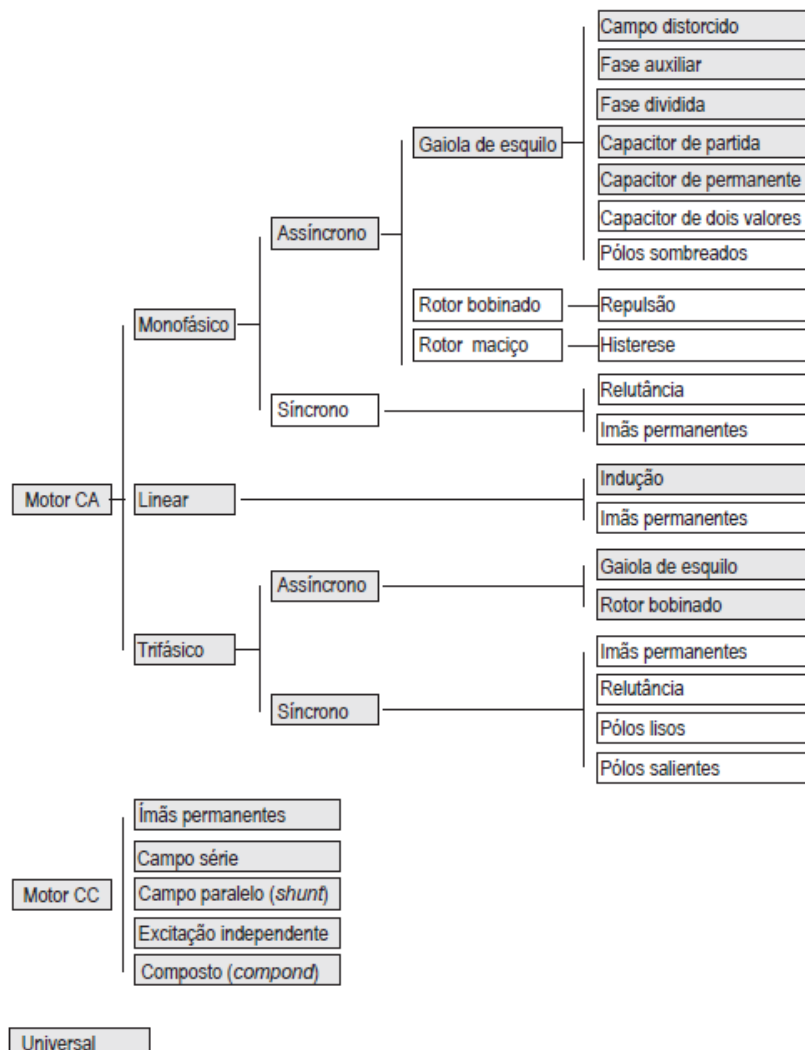
1	INTRODUÇÃO.....	12
1.1	Problema	13
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos	14
1.3.1	Objetivo Geral	14
1.3.2	Objetivos Específicos.....	14
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	16
2.1	Desenvolvimento de Produto	16
2.2	Seis Sigma	16
2.2.1	DFSS - Design for Six Sigma	18
2.3	Planejamento de Experimentos - DOE.....	19
2.3.1	Princípios do planejamento de experimentos	20
2.3.2	Terminologia Básica	21
2.3.3	Planejamentos Fatoriais Fracionados	23
2.4	Análise do Sistema de Medição - MSA	25
3	MÉTODOS	27
3.1	Definição dos Fatores de Variação	27
3.2	Definição dos Níveis dos Fatores de Variação	31
3.3	DOE dos Motores	37
4	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	41
4.1	Execução do DOE.....	41
4.2	Validação dos Resultados	42
4.3	Implantação de melhorias	44
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	46
	REFERÊNCIAS	48

1 INTRODUÇÃO

Motores elétricos são máquinas que transformam energia elétrica em energia mecânica, sendo o tipo de motor mais utilizado no mundo. Um dos motivos para isso é o fato de sua construção ser relativamente simples, o que faz seu custo ser menor em comparação a outros tipos de motores. Além disso, é preciso ressaltar seu tamanho reduzido quando comparado a motores com outros princípios de funcionamento, considerando a mesma potência produzida.

Existe uma grande variedade de tipos de motores elétricos, que podem variar desde o tipo de alimentação, princípio de funcionamento, etc. Os principais tipos de motores elétricos estão representados na Figura 1.

Figura 1 - Classificação de motores



Outro fator que contribui com a popularidade do motor elétrico é a sua eficiência. Enquanto um motor térmico tem eficiência em torno de 30%, um motor elétrico atinge facilmente níveis na casa de 80%. Ao optar-se pelo uso desse tipo de motor, o processo torna-se mais eficiente e, em consequência, reduzem-se os custos.

Os motores elétricos estão presentes em muitos equipamentos, inclusive dentro das residências. Geladeiras, refrigeradores, máquinas de lavar, aparelhos de ar-condicionado, ventiladores, são exemplos presentes em grande parte das casas brasileiras. Na indústria, essa presença é ainda mais intensa. A maioria das máquinas operatrizes faz uso do motor elétrico.

Os fabricantes de motores, por sua vez, buscam criar novos produtos para atender as necessidades do mercado e aumentar suas receitas. Também estão cada vez mais buscando produtos mais eficientes e com mais qualidade, para se manterem competitivos. Muitas são as ferramentas utilizadas para isso, dentre elas pode-se citar a metodologia Seis Sigma, que foi um programa desenvolvido pela empresa americana Motorola, e tem como um dos objetivos verificar as influências das variações e, com isso, melhorar o desempenho (ROMEIRO FILHO et al., 2010).

Porém, produtos inovadores, que não possuam processos de fabricação bem definidos, acabam tendo mais dificuldade em atender aos requisitos de qualidade. Na etapa de criação de um produto piloto, muitas vezes, além de validá-lo, também é validado seu processo de manufatura. Segundo Romeiro Filho et al.(2010) protótipos são produtos em desenvolvimento, e que podem ser usados para realização de testes de desempenho em condições reais de utilização e outros requisitos importantes para o projeto.

Henriques (2011) afirma que é cada vez mais forte a tendência de analisar os produtos em desenvolvimento com a intenção de não só corrigir falhas atuais, mas também buscar potenciais futuros problemas. Seguindo tal tendência, surge a oportunidade de otimizar o processo para que quando o produto for lançado e sua produção se inicie em escala, os possíveis defeitos já tenham sido corrigidos e, em consequência, a chance do produto apresentar falha em campo seja menor.

1.1 Problema

Com a frequente evolução dos motores elétricos, é cada vez menor o tempo disponível para seu desenvolvimento. Nesse sentido, a necessidade de utilizar

ferramentas que auxiliem o processo de desenvolvimento, seja prevenindo erros ou incrementando a qualidade, aumenta. Entre as etapas do desenvolvimento de um produto está a etapa de teste em protótipos. Segundo Baxter (2000), os componentes de um produto podem apresentar diversas falhas, e isso pode impactar no desempenho do produto. A análise dessas falhas demanda tempo, além de aumentar o custo do desenvolvimento. Considerando tais falhas, coloca-se a questão principal de pesquisa: de que maneira o motor elétrico pode ter reduzida suas perdas a partir do uso das ferramentas da qualidade?

1.2 Justificativa

Para uma empresa se manter competitiva e crescer, ela deve produzir produtos de qualidade, atuais e com um preço baixo, uma combinação difícil de ser alcançada. A aplicação de ferramentas da qualidade no processo de desenvolvimento de novos produtos pode ser de grande valia para ajudar a alcançar esse objetivo.

A redução das perdas mecânicas de um motor pode trazer benefícios para o cliente, pois um produto mais eficiente terá impacto direto no custo de operação. O fabricante beneficia-se também, já que pode usar essas informações em estratégias de vendas.

Surge então a necessidade de aplicar tais ferramentas da qualidade de uma forma estruturada, e que tal aplicação traga ganhos em qualidade e/ou redução de falhas, que acabam gerando perda de eficiência.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Aplicar o conceito Seis Sigma e suas ferramentas no processo de desenvolvimento de um motor elétrico.

1.3.2 Objetivos Específicos

- a) Definir quais componentes podem apresentar problemas e influenciar nas perdas mecânicas de um motor elétrico;

- b) criar um plano de ensaios que forneça informações relevantes e confiáveis para a identificação dos defeitos;
- c) reduzir a variabilidade do processo;
- d) propor soluções para os problemas encontrados e validá-las;
- e) verificar os resultados e validar as conclusões;
- f) aumentar a qualidade do produto.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

No desenvolvimento deste trabalho, foi necessário o aprofundamento em vários temas, tais como o desenvolvimento de produto, o programa Seis Sigma e o Planejamento de Experimentos (DOE). Este capítulo é destinado para a apresentação dos principais conceitos relacionados aos temas, os quais são de suma importância para alcançar os objetivos deste trabalho.

2.1 Desenvolvimento de Produto

Segundo Rozenfeld et al. (2006) desenvolver produtos é um conjunto de atividades que buscam, partindo das necessidades do mercado e capacidade tecnológica, chegar à concepção de projeto, incluindo suas especificações e processos de produção. O desenvolvimento deve levar também em consideração as estratégias da empresa. Cada vez mais se tem dado importância ao desenvolvimento de produto, pois com a crescente internacionalização dos mercados, aumentos nas variedades de produtos e redução de seu ciclo de vida, esse fator está diretamente ligado à capacidade competitiva do negócio.

De acordo com Clark e Fujimoto (1991 *apud* ROMEIRO FILHO et al. 2010, p.9) “[...] um processo de desenvolvimento de produto é algo difícil de se realizar e, sem ele, as empresas estão provavelmente fadadas ao fracasso”. Para um processo de desenvolvimento bem sucedido, deve haver coerência entre a estrutura organizacional, habilidades técnicas, cultura e estratégia. Desta forma, fica evidente que o desenvolvimento de um produto não é uma atividade isolada dentro da empresa, mas sim uma atividade que requer participação de diferentes equipes, cada uma com conhecimentos específicos, obtendo-se assim, um resultado próspero. Também faz-se necessário o uso de métodos e ferramentas apropriadas para o desenvolvimento do produto. A negligência de tal uso pode acabar aumentando o risco de fracasso no lançamento de novos produtos.

2.2 Seis Sigma

No início da década de 80, o presidente da Motorola, Bob Galvin, instituiu o programa de melhoramento 10X. Muitas metodologias foram implementadas com a intenção de suprimir gastos e melhoria de processo. Em 1985, Bill Smith, um

engenheiro que era responsável pela pesquisa da vida útil de um determinado produto e pela frequência de reparação durante o processo, apresentou um trabalho que concluía que se os defeitos fossem detectados e corrigidos durante o processo de fabricação, seria estatisticamente improvável que novos erros surgissem nos testes finais do produto. No ano de 1988, quando a Motorola recebeu o prêmio nacional da qualidade Malcom Baldrige, o Seis Sigma passou a ser reconhecido como o responsável pelo sucesso da empresa (MARSHALL JUNIOR et al., 2011).

De acordo com Romeiro Filho et al. (2010), Seis Sigma é um programa que visa à melhoria da qualidade a partir da redução de defeitos, desperdícios e custos, e que faz uso de procedimentos padronizados para a obtenção de dados e sua análise, objetivando identificar, tratar e eliminar fontes de erros ou problemas e, com isso, reduzir de forma permanente a possibilidade de defeitos nos produtos ou serviços.

Segundo Mello (2011), o Seis Sigma trata de um programa que busca a melhoria do processo e produtos com a redução dos defeitos. Para isso, a metodologia orienta-se na busca pela redução da variabilidade do processo. Quanto menor o nível de Sigma, mais alta é a quantidade de defeitos do processo, e consequentemente menor a lucratividade da organização. Para a implantação da metodologia Seis Sigma, equipes devem ser treinadas nessa metodologia. Essas equipes são formadas por funcionários de diferentes níveis hierárquicos, e que tenham diferentes atribuições nos projetos de melhoria.

A nomenclatura dada a cada nível varia de empresa para empresa. As mais comuns estão descritas abaixo, em ordem crescente de responsabilidade:

- *White Belts*: Funcionários operacionais que servem de apoio aos *Green Belt*. Alguns autores usam a nomenclatura *Yellow Belt*;
- *Green Belts*: Dedicam parte do seu tempo para projetos ligados ao seu cotidiano profissional.
- *Black Belts*: Responsáveis pela condução dos projetos, lidam com diferentes áreas.
- *Master Black Belts*: Orientam os *Black Belts*.
- *Champions*: Em geral ocupam o cargo de gestor, e identificam os grandes projetos de melhoria.

- *Sponsors*: Membros da diretoria; definem as diretrizes do programa.

Marshall Junior et al. (2010) afirma que o conceito do Seis Sigma combina algumas das melhores ferramentas da qualidade. Orienta-se pelo entendimento das necessidades do cliente. Uma virtude do Seis Sigma é converter o desvio-padrão para uma medida do êxito: ou bem atende às expectativas do cliente, ou não. Tudo o que não atende é denominado defeito. Se é possível medir as necessidades dos clientes, é possível calcular a quantidade de defeitos no processo, e com isso o rendimento do mesmo. Outra abordagem possível é verificar quantos defeitos ocorrem, e compará-los com a quantidade de oportunidades de erros. O resultado dessa operação é chamada defeitos por milhão de oportunidades (DPMO).

Em geral, a metodologia Seis Sigma é aplicada em processos já estruturados. Porém, é possível aplicá-lo no desenvolvimento de projetos. Para isso, existe um método conhecido como *Design for Six Sigma* – DFSS. No entanto, o método DFSS geralmente é aplicado em empresas que já atingiram certo grau de maturidade no programa (MELLO, 2011).

2.2.1 DFSS - *Design for Six Sigma*

Romeiro Filho et al.(2010) apresenta o DFSS - *Design for Six Sigma* ou Projeto para Seis Sigma como sendo uma metodologia que utiliza ferramentas, treinamento e medições para executar o projeto de produtos e processos, buscando alcançar as necessidades dos clientes com nível de qualidade Seis Sigma. Pode-se dizer que é a continuidade do conjunto de ferramentas Seis Sigma aplicada ao projeto do produto, processo ou serviço.

Segundo Henriques (2011), o DFSS é uma evolução da metodologia Seis Sigma, tendo como diferença entre eles a aplicação. O Seis Sigma tradicional é aplicado geralmente na solução de problemas já existentes. Já o DFSS, por ser aplicado na etapa de projeto, dispõe-se a prevenir o surgimento de problemas. Com isso, procura-se maximizar os ganhos de novos projetos, seja através da redução de tempo de lançamento e/ou redução do índice de falhas. Para isso, utiliza-se uma série de ferramentas para identificar seus requisitos e suas especificações.

Já Fioravanti (2005), salienta que como resultado de suas pesquisas bibliográficas, as metodologias Seis Sigma e DFSS são independentes, mas que

compartilham muitas características entre si. Segundo ele, o Seis Sigma é tipicamente adotado em processos produtivos os quais necessitam melhorias em seu desempenho. Já o princípio do DFSS é que ele seja aplicado na construção de um processo novo, para que esse quando em funcionamento atinja níveis Seis Sigma de desempenho.

Fioravant *apud* Treichler et al. (2002) afirma que o DFSS é uma mudança na cultura da equipe de projeto e desenvolvimento do produto, e que passa de determinística para probabilística, através da incorporação de análises estatísticas dos modos de falhas, com a intenção de eliminar características de projeto que se apresentem dentro de condições de risco pré-determinadas. Outro ponto frisado pelo autor é a vantagem financeira que a DFSS traz na etapa de desenvolvimento do produto, já que melhorar a qualidade de um produto já disponível no mercado requer maiores investimentos.

Werkema (2005) reforça essa ideia ao afirmar que quando o DFSS é empregado de forma adequada, a empresa tem como resultado o lançamento de um produto correto, em um prazo reduzido e com custos menores.

2.3 Planejamento de Experimentos - DOE

Na etapa de desenvolvimento de produto tem-se sempre a preocupação de projetar um produto o qual tenha um custo de produção minimizado, e que ao mesmo tempo, tenha qualidade. Para isso, muitas vezes é necessário dedicar muita atenção e investir dinheiro em pesquisa e desenvolvimento de novas tecnologias (UNTERLEIDER, 2006).

Unterleider *apud* Antony et al. (1991) relatou o método de planejamento de experimentos como uma excelente técnica com baixo custo, e que quando aplicado de forma correta ajudaria na melhoria da qualidade de produtos e processos de fabricação. Unterleider *apud* Rowlandset al.(2000) acrescenta afirmando que, quando aplicado o método na etapa de projeto de um produto, é possível reduzir a necessidade de inspeção final para garantir a qualidade do produto.

Experimento é um procedimento no qual são feitas alterações propositas das variáveis de um processo ou sistema, que tem como objetivo avaliar as possíveis alterações sofridas na resposta e, assim, poder relacionar as variações com o

resultado. As variáveis de um processo são os fatores que podem influenciar o resultado final. Existem fatores que são controláveis e outros que não (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

O Planejamento de experimentos, ou DOE do inglês *Design of Experiments*, pode ser designado como um conjunto de técnicas estatísticas, e que podem ser aplicadas em diversas áreas da ciência. Através dessa ferramenta busca-se encontrar as variáveis mais relevantes que acabam influenciando o resultado e, através dessa informação, otimizar o processo ou produto (HENRIQUES, 2011).

O principal objetivo de um experimento planejado é determinar as causas que mais influenciam o resultado esperado. Uma vez descobertos os fatores, deve-se analisar a relação existente entre as variáveis e os resultados. Quando essa relação se estabelecer, ações gerenciais de melhoria poderão ser conduzidas de maneira mais eficiente (WERKEMA; AGUIAR, 1996)

2.3.1 Princípios do planejamento de experimentos

Ao se produzir um produto, os processos produtivos têm vital importância na qualidade do mesmo. Muitos são os fatores e níveis de regulagens que acabam influenciando na qualidade e desempenho. Um problema surge quando se quer investigar o quanto cada fator acaba tendo de influência no produto final, pois a quantidade de fatores acaba influenciando na quantidade de experimentos. Com isso, os experimentos acabam se tornando onerosos e tomam um tempo considerável, o que no meio industrial não é tolerado (GALDÁMEZ, 2002).

Para que um experimento seja realizado de forma eficiente, é muito importante ter uma abordagem científica por meio do termo planejamento estatístico, de tal forma que os experimentos tenham dados confiáveis em um tempo e custo reduzidos. Portanto, dois pontos são essenciais: planejamento do experimento e a análise estatística dos dados. Ambos se relacionam, já que a análise depende do tipo de planejamento utilizado (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Pode-se utilizar experimentos com a intenção de reduzir o número de produtos com defeitos, ou ainda relacionar quais fatores e parâmetros acabam tendo mais influência no desempenho do produto final. Galdámez *apud* Montgomery (1991) sugere que através do planejamento dos experimentos e da análise das

respostas, a solução pode ser alcançada com mais facilidade. Galdámez *apud* Barker (1985) ressalta que tal planejamento também torna os resultados dos experimentos mais confiáveis, e acaba-se podendo tomar decisões mais acertadas e em menor tempo.

Três princípios básicos do planejamento de experimentos devem ser entendidos: réplica, aleatorização e formação de blocos. Réplicas são repetições do experimento feitas sob as mesmas condições experimentais, tendo o cuidado para que os fatores sejam os mesmos e não causem alteração nos resultados. A réplica permite a obtenção da estimativa de variabilidade do erro experimental. A aleatorização é a ordem dos experimentos. Recomenda-se que a sequência dos experimentos sejam determinados ao acaso, pois isso permite que os efeitos de fatores não controláveis sejam balanceados entre todas as medidas. A formação de blocos consiste na formação de amostras homogêneas, e que sejam usadas de forma a minimizar as influências às quais não se tenha interesse de avaliação (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

2.3.2 Terminologia Básica

Werkema e Aguiar (1996) definem como terminologia básica os seguintes termos:

- Unidade experimental: são as amostras que serão utilizadas no experimento.
- Fatores: são as condições que serão manipuladas, e que se quer saber a influência sobre o resultado do experimento.
- Níveis de um fator: são as variações que serão alteradas nos fatores.
- Tratamento: são denominados tratamentos as combinações entre os fatores e seus níveis.
- Ensaio: cada realização do experimento, usando um determinado tratamento é denominado ensaio.
- Variável resposta: é o resultado de interesse registrado após a realização de um ensaio.

Ao ser realizado um estudo de DOE, primeiramente deve-se definir o que se deseja estudar, e quais resultados se deseja alcançar. A partir dessas definições devem ser escolhidos quais fatores serão analisados, ou seja, quais parâmetros

podem ter influência sobre os resultados. Também neste momento são definidos os níveis em que esses fatores serão experimentados. Níveis são os valores que serão experimentados, por exemplo, o experimento pode ser executado a uma temperatura de 20°C e a 40°C (HENRIQUES, 2011).

Segundo Henriques *apud* Ilzarbe et al. (2008), muitas vezes engenheiros responsáveis pela condução do estudo acabam por filtrar fatores baseados em seus conhecimentos prévios. Isso acaba se tornando uma vantagem, pois acaba-se economizando tempo e custo com experimentos. Porém isso pode acabar ocultando possíveis interações.

Outro fator que vem contribuindo com a redução de custos de experimentos é a aplicação de ferramentas computacionais. Essas simulações acabam por permitir um grande número de testes com várias combinações de fatores, em pouco tempo e baixo custo. Uma vez que os testes são executados em ambientes virtuais, restam apenas experimentos de confirmação dos resultados a serem executados na prática. Estudos que fazem uso intensivo dessas ferramentas computacionais já começam a ser denominados de Virtual DOE (HENRIQUES *apud* SOBEK; JAIN, 2007).

Montgomery (2012) cita que há 3 princípios básicos de projeto experimental: aleatorização, replicação e blocagem.

A **aleatorização** é uma técnica de projeto de experimentos utilizada para evitar que um ruído acabe por interferir no resultado do experimento. Pode ser usado quando se conhece o fator, porém não é possível controlá-lo, ou quando não é possível identificá-lo. A técnica consiste em executar os experimentos de forma totalmente aleatorizada, sendo que desse modo, caso exista um fator que cause ruído no resultado, ele será diluído entre todos os experimentos. Como exemplo, Montgomery (2012) cita um experimento de tratamento térmico em determinado material, no qual os corpos de prova são retirados de lotes diferentes, e por isso podem ter espessuras levemente diferentes. Não se sabe se essa diferença pode interferir no resultado dos experimentos, porém com o uso da aleatoriedade, os corpos são distribuídos de forma aleatória, e com isso o possível ruído não afetará apenas um lado do experimento.

A **replicação** consiste em realizar os experimentos de forma repetida, com a intenção de minimizar a chance de um erro experimental, pois tendo mais amostras que teoricamente passaram pelo mesmo procedimento, e uma destas amostras apresentar um valor diferente dos demais, pode-se afirmar que esta é uma causa especial. A replicação possui duas importantes propriedades. A primeira é obter uma estimativa do erro experimental, e a partir dessa informação saber se as diferenças entre os resultados dos experimentos são significativas. Em segundo, a repetição permite que seja tirada uma média dos resultados e assim, haver uma resposta mais precisa.

A **blocagem** é uma técnica que visa melhorar a precisão na comparação entre os fatores de interesse, pois tende a reduzir ou eliminar a variabilidade resultante dos fatores de ruído. Por exemplo, se em um experimento temos amostras de dois lotes diferentes, esses podem apresentar diferenças entre si, porém não se tem interesse nessa diferença. Como é esperado que o lote apresente menos variação dentro dele do que comparando um lote a outro, os fatores de ruído ficam agrupados e o experimentador deve fazer as devidas considerações referentes a cada bloco.

2.3.3 Planejamentos Fatoriais Fracionados

Quando se deseja estudar os efeitos de dois ou mais fatores, em geral utiliza-se o planejamento fatorial. Nesse tipo de planejamento, são experimentados todas as possíveis combinações entre os fatores e níveis (WERKEMA; AGUIAR, 1996).

Segundo Montgomery (2012) planejamentos fatoriais são usados geralmente para descobrir o efeito de fatores de forma isolada, quando esse muda de nível, e seria essa a grande vantagem do método. Além disso, o método permite descobrir quais fatores mais influenciam as respostas do problema analisado. Em geral, usam-se apenas dois níveis (alto-baixo, + e -) na condução dos experimentos, com a intenção de reduzir sua quantidade. Para esse tipo de análise, tem-se $n = L^k$, onde n é o número de experimentos a serem utilizados, L a quantidade de níveis e k a quantidade de fatores.

Porém, quando existe um grande número de fatores, isso acaba aumentando a quantidade de experimentos a serem realizados. Quando o experimentador julgar

que não é necessário ou possível verificar as interações entre todos os fatores, pode optar por fazer apenas uma parte dos experimentos, que é uma variação do experimento fatorial, denominado fatorial fracionado. Henriques (2011) cita:

De acordo com a “Association for Statistical Quality Control” - ASQC (1983), um planejamento fatorial fracionado é “aquele onde apenas uma parcela adequadamente escolhida entre todas as combinações de um Fatorial Completo é utilizada no experimento” (HENRIQUES, 2011).

Esse método permite avaliar uma grande quantidade de fatores sem aumentar muito a quantidade de experimentos necessários, diferente do que acontece com o planejamento fatorial completo. Para isso, são ensaiados apenas os fatores que mais contribuem nos resultados. Essa redução dos fatores se torna vantajosa em experimentos que demandam muito tempo e custos elevados.

Segundo Montgomery (2012), para se ter sucesso na utilização do planejamento fatorial fracionado, são necessárias 3 ideias-chave:

1. Efeitos principais: quando houver diversas variáveis, o sistema provavelmente será conduzido por apenas efeitos principais e interações de baixa ordem.
2. Propriedades projetivas: planejamento fatorial pode ser projetado de tal forma que os efeitos maiores acabem se tornando os fatores de maior influência.
3. Experimentação sequencial: pode-se combinar duas ou mais corridas de fatoriais fracionados para montar uma sequência para se estimar os fatores e interações de interesse.

O experimentador pode usar de suas experiências e conhecimento para deduzir quais fatores e interações podem ter maior influencia na resposta, e assim escolhê-los. Deve-se, no entanto, ter muita cautela para não deixar um fator importante de fora do experimento, já que o resultado poderá ser afetado. Outra situação que deve ser tratada com atenção, é quando o experimentador não possui conhecimento sobre o sistema que está estudando, pois, nesse caso, emitir certos fatores podem também interferir no resultado final (HENRIQUES, 2009).

2.4 Análise do Sistema de Medição - MSA

Na análise do sistema de medição são usadas ferramentas estatísticas para a avaliação da confiabilidade dos dados adquiridos. Como os dados adquiridos muitas vezes são usados para tomadas de decisões, primeiramente é necessário determinar se os sistemas de medição fornecem os dados confiáveis, para que com isso as decisões tomadas sejam as corretas (PORTO ALEGRE, 2013).

A análise do sistema de medição, ou MSA, tem como função básica verificar se o sistema adotado para realizar a medição é adequado ou não para monitorar um determinado processo ou produto (Bayod *apud* IQA, 2004).

Ao realizar uma medição, podemos ter duas fontes de variação: variação entre as peças e variação do sistema de medição. Para que o sistema de medição seja considerado aceitável, a variação do sistema deve ser pequena quando comparada com a variação entre as peças (AVALIAÇÃO..., 2016).

Algumas propriedades estatísticas são usadas para caracterizar a qualidade de dados, dentre as quais a tendência e a variância. A primeira refere-se à localização dos dados em relação ao valor padrão e a segunda refere-se à dispersão dos dados (PORTO ALEGRE, 2013).

Muitas das variações observadas em um conjunto de medições têm alterações devido ao meio em que o sistema de medição se encontra. Se estas alterações gerarem muita variação, os dados adquiridos acabam não sendo reais e perdem sua utilidade (PORTO ALEGRE, 2013).

Algumas propriedades são essenciais para que um sistema de medição seja aceito:

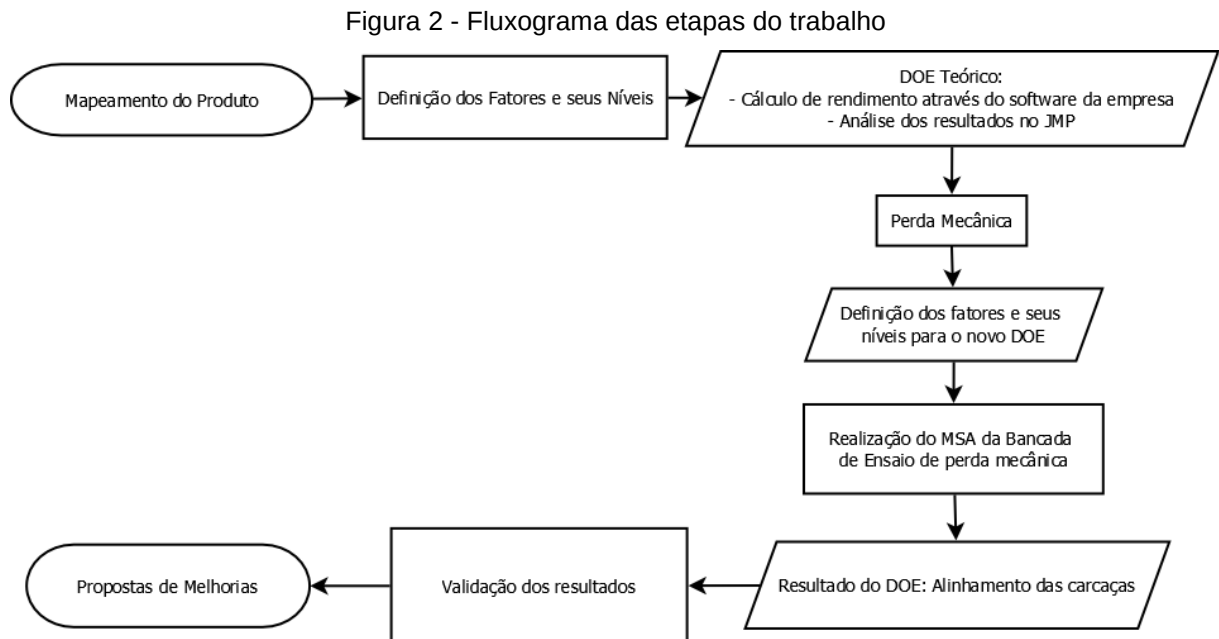
- O sistema de medição deve estar sob controle estatístico, ou seja, as variações do sistema devem ser apenas de causas comuns e não de causas especiais;
- A variabilidade do sistema de medição deve ser pequena comparada com a variação do processo de manufatura e com os limites de especificação;
- Os incrementos de medida devem ser menores que os valores da variabilidade do processo (PORTO ALEGRE, 2013).

Quando inicia-se uma análise em um sistema de medição, é necessário primeiramente planejar como serão realizadas as medições e quais as medidas críticas que devem ser acompanhadas. É importante também definir um procedimento o qual os operadores deverão seguir. As peças devem ser devidamente identificadas e as medições deverão ser feitas de forma aleatória, para minimizar possíveis ruídos no processo (PORTO ALEGRE, 2013).

O método de avaliação da Média e Amplitude é uma forma gráfica de avaliar o sistema de medição. Para isso são criados dois gráficos, a Carta de Médias e a Carta de Amplitudes. A Carta de Amplitudes representa a consistência das medições. Ela é composta pelas amplitudes das medições e nela é possível identificar se a variação do sistema de medição está dentro dos limites aceitáveis. Já a carta de Médias identifica se o sistema consegue distinguir a variação entre as médias das medições (FONSECA, 2008).

3 MÉTODOS

Nessa seção do trabalho serão apresentadas as etapas que foram executadas no decorrer do trabalho. Essas etapas podem ser vistas na Figura 2:



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

3.1 Definição dos Fatores de Variação

O planejamento partiu do mapeamento inicial do motor elétrico em desenvolvimento. Avaliando a estrutura do produto, foram levantados 21 fatores que poderiam influenciar no seu desempenho final, que estão listadas na Tabela 1.

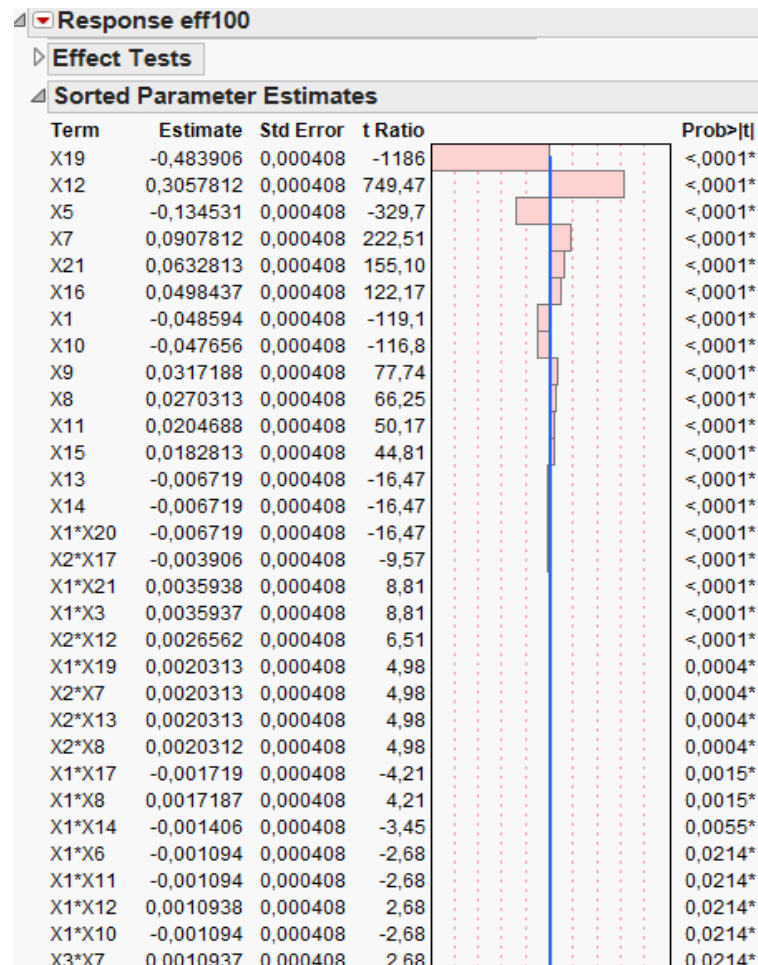
Tabela 1 – Fatores de influência no desempenho

Lâmina Estator	Ranhura Estator	x1
	Diâmetro externo Estator	x2
	Permeabilidade magnética estator	x3
	Perdas magnéticas da Chapa	x4
Bobinas	Perímetro de Bobinagem	x5
	Numero de espiras	x6
	Diâmetro do fio nu	x7
Estator Bobinado	Comprimento do pacote	x8
	Desbalanceamento entre fases	x9
	Comprimento dos cabos	x10
Lâmina Rotor	Ranhura do Rotor	x11
	Altura de ponte bruta	x12
	Permeabilidade magnética Rotor	x13
	Perdas magnéticas rotor	x14
Rotor Injetado	seção do anel de curto circuito	x15
	Porosidade da gaiola(alumínio)	x16
	Inclinação das barras do rotor	x17
Motor Montado	Excentricidade axial estator/rotor	x18
	Perdas mecânicas	x19
	Entreferro	x20
	Coeficiente de dissipação térmica	x21

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Partindo da necessidade de identificar as maiores influências nas perdas do motor, foi realizado um DOE teórico. Cada fator teve dois níveis: “+” e “-”. Apesar de ser um DOE teórico, foi optado em se realizar o fatorial fracionado, devido a grande quantidade de fatores. Foram realizadas 64 rodadas de cálculos utilizando o software da empresa. Como resultado dos cálculos tem-se o valor da eficiência de cada combinação dos fatores. Usou-se posteriormente o software estatístico JMP para apontar os fatores que mais influenciavam na eficiência do motor. A Figura 3 apresenta o resultado do software:

Figura 3 - Resultado do DOE Virtual



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Como resultado do DOE virtual, verificou-se que o fator que mais tem influência na eficiência do motor é a perda mecânica (x19). Como o fator perda mecânica é um fator macro, seria necessário estudá-lo mais a fundo, pois muitos subfatores poderiam estar influenciando. Duas ações foram tomadas: a primeira foi buscar o melhor meio de realizar os experimentos e que fornecesse dados confiáveis, e em segundo lugar, foram levantadas hipóteses e escolhidos os fatores que tinham mais probabilidade de estarem interferindo na perda mecânica e que posteriormente seriam manipulados no ensaio.

Para a escolha dos fatores que seriam manipulados no DOE, primeiramente foram levantadas hipóteses sobre o que poderia estar aumentando a perda mecânica, e por consequência, prejudicando a eficiência do motor. Realizou-se um brainstorming entre pessoas que estavam envolvidas no desenvolvimento do produto. Dentre as hipóteses levantadas, foram discutidas e selecionadas as que

teriam maior probabilidade de influência e que seriam possíveis de serem manipuladas no DOE. As hipóteses selecionadas estão listadas na Tabela 2.

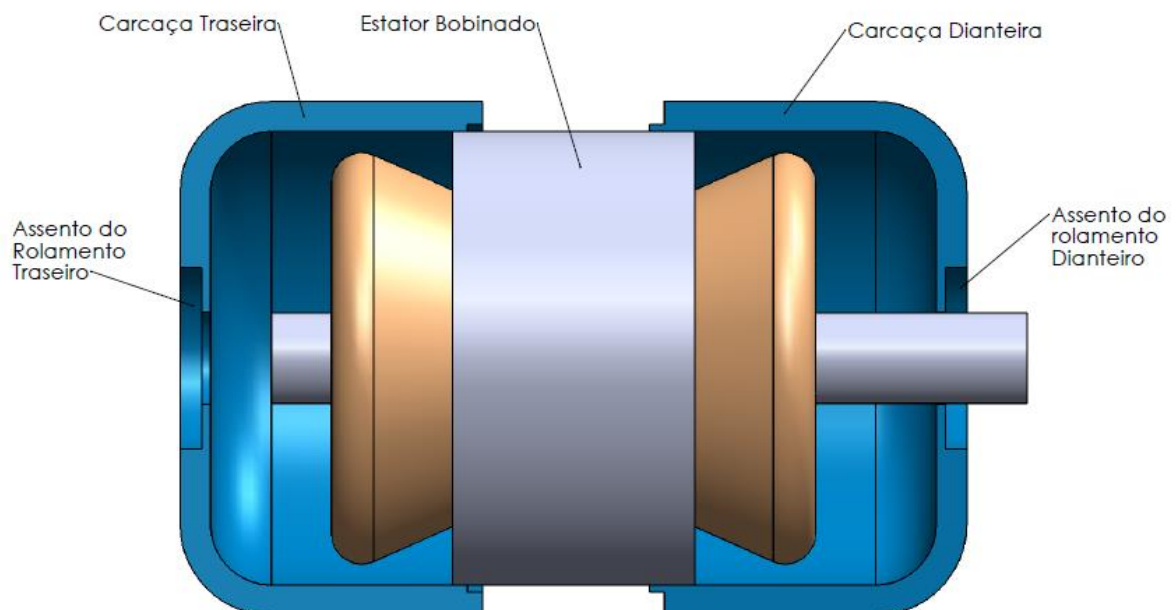
Tabela 2 – Lista de fatores

1	DESALINHAMENTO DA CARÇAÇA
2	ARRUELA ONDULADA
3	ENCOSTO ANEL DIANTEIRO
4	TORQUE DE APERTO DOS PARAFUSOS DOS ANÉIS
5	VEDAÇÃO

Fonte: Elaborado pelo autor(2016)

A primeira hipótese é relacionada ao desalinhamento entre os mancais dianteiro e traseiro, fazendo com que os rolamentos trabalhem fora da especificação de desalinhamento máximo permitido. Isso acabaria por reduzir a vida útil dos mesmos, e aumentaria a força necessária para que o rotor girasse. Como o motor não possui tampas e o assento do rolamento está na própria carcaça (Figura 4), e ambas são prensadas no estator, poderia estar havendo um desalinhamento no momento da prensagem. Desta hipótese surgiu o primeiro fator que seria aplicado ao DOE: Desalinhamento da carcaça.

Figura 4 - Estrutura básica do motor



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

A segunda hipótese envolve a arruela ondulada, que é responsável por aplicar a pré-carga axial nos rolamentos. Nesta hipótese, duas possibilidades foram consideradas. A primeira é que a arruela ondulada estaria aplicando uma pré-carga axial superior à necessária causando assim uma situação de trabalho inadequada. A outra possibilidade seria uma pré-carga axial menor do que a exigida, e com isso o rolamento não teria a rigidez necessária para seu correto funcionamento.

Como terceira hipótese, tem-se o anel de fixação do rolamento dianteiro. A suspeita é que o anel de fixação, ao ser montado, esteja desalinhando ou exercendo força de forma não uniforme no rolamento. Isso também causaria, além do aumento da perda mecânica, a redução da vida útil do rolamento.

Também relacionado ao anel de fixação do rolamento dianteiro, a quarta hipótese considera o torque de aperto dos parafusos que fixam o anel. O torque ideal calculado para este parafuso é de 15 N.m, porém por tratar-se de uma linha de produtos que ainda não possui seu processo de produção completamente definido, poder-se-ia usar uma parafusadeira pneumática com um torque maior, e este torque estaria deformando de alguma forma o assento do rolamento na tampa ou ainda o próprio anel de fixação.

E como última hipótese, tem-se a vedação. Como é um componente que fica fixo ao eixo, porém em contato permanente com o anel de fixação do rolamento, que é uma parte que não se move, este poderia influenciar na perda mecânica.

3.2 Definição dos Níveis dos Fatores de Variação

Cada fator passou por uma análise individual para que fossem escolhidos os níveis corretos. Em paralelo, definiu-se que seriam dois níveis para cada fator, conforme recomendação de Montgomery (2012).

Para o primeiro fator, desalinhamento da carcaça, foram escolhidos dois protótipos, os quais já haviam passado por ensaios de determinação de rendimento, necessários para o desenvolvimento da linha e que já tinham seus valores de perda mecânica conhecidos. Estes valores, no entanto, não tinham a mesma precisão que o ensaio que seria feito para este DOE, já que este tipo de ensaio determina as perdas totais e posteriormente, através de cálculos, são determinados os valores para cada tipo de perda. Então escolheu-se um motor que apresentou perdas baixas e outro que apresentou perdas altas.

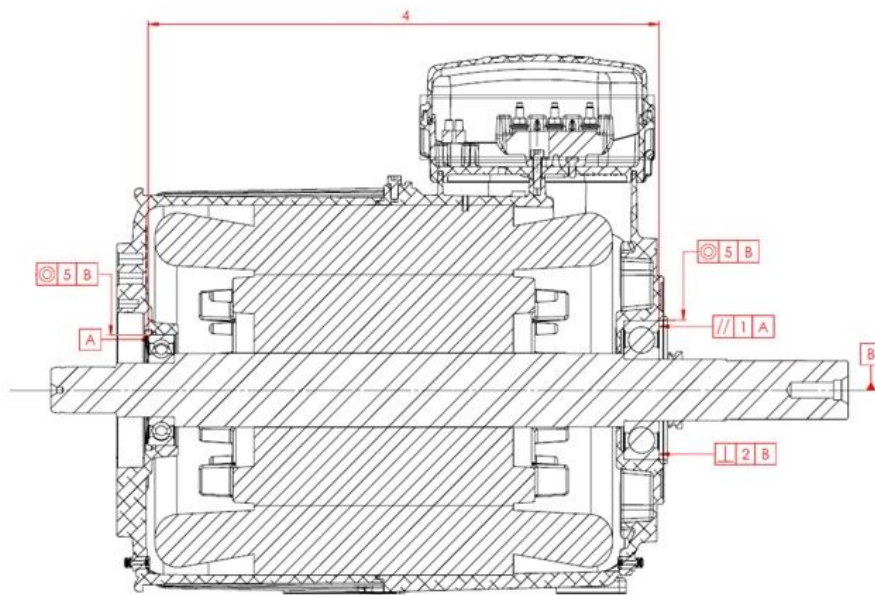
Estes motores, sem serem desmontados, apenas retirados os anéis externos de fixação do rolamento e o sistema de ventilação, foram levados para uma máquina tridimensional (Figura5), onde foram realizadas diversas medições, entre elas: paralelismo entre os rolamentos, perpendicularidade entre rolamento dianteiro e o centro do eixo, distância entre os rolamentos, concentricidade dos assentos de rolamentos dianteiro e traseiro em relação ao centro do eixo, e por último, a concentricidade entre os assentos dos rolamentos. A Figura 6 detalha o plano de medições.

Figura 5 – Medição dos motores na Tridimensional



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Figura 6 – Plano de medições



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

A partir dos resultados das medições, foi verificado que o valor da concentricidade entre os rolamentos do segundo motor apresentava um erro de 0,79mm enquanto o primeiro motor apresentava um erro de 0,02mm. Assim, chegou-se aos dois níveis do fator carcaça.

Para o segundo fator, a arruela ondulada (Figura7), também foram realizados medições para definir quais níveis seriam usados nos ensaios planejados pelo DOE. Para isso, foi-se ao almoxarifado da empresa, aonde foram selecionadas 5 amostras de 3 lotes diferentes, ambas feitas pelo mesmo fabricante. Cada amostra foi devidamente identificada conforme o lote e quantidade retirada do lote.

Figura 7 – Arruela ondulada de pré-carga



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

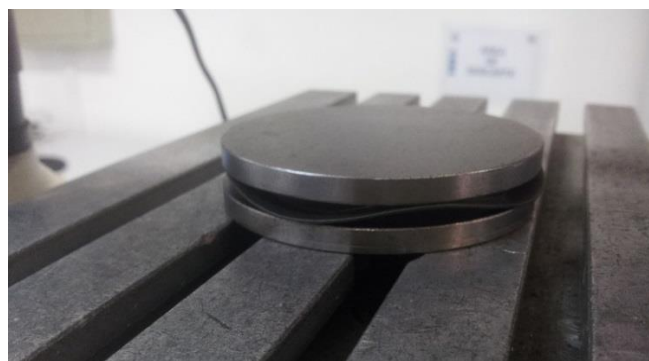
O ensaio foi executado em um equipamento (Figura 8) composto por uma célula de carga e uma escala linear digital, além de um fuso, o qual permitia o deslocamento linear para a compressão das arruelas onduladas. Foram usados dois discos que tinham o mesmo diâmetro da mola (Figura 9), a fim de aplicar a carga de forma mais parecida com o que ocorre na prática.

Figura 8 - Ensaio das arruelas.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Figura 9 - Detalhe dos discos



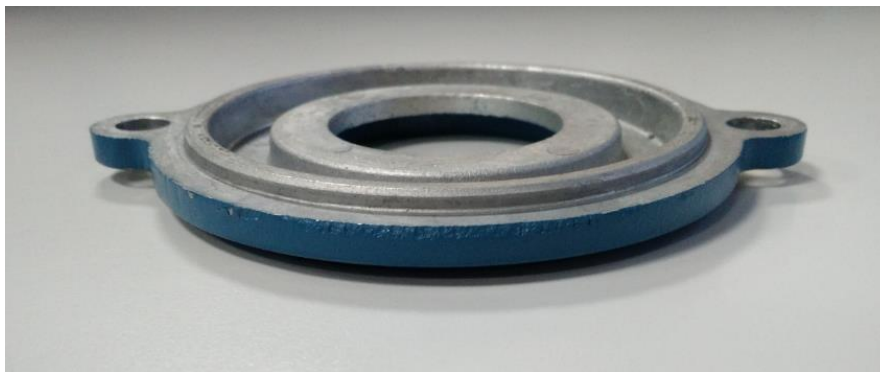
Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

A estrutura do ensaio foi previamente planejada, e decidiu-se seguir os parâmetros definidos através de uma norma interna da empresa. Esta norma estabelece os valores de altura em repouso, altura em trabalho, e qual a carga que a mola deve proporcionar quando estiver comprimida em trabalho. Cada amostra foi medida 3 vezes, conforme recomendação da avaliação do sistema de medição. Em

cada amostra foi medida sua altura inicial em milímetros, e depois foi feita a compressão até que a mesma ficasse na altura de trabalho, e anotado o valor apresentado na célula de carga após 10 segundos, para que o valor se estabilizasse. Esse procedimento foi repetido 3 vezes seguidas para cada amostra. Após coletados os dados, verificou-se quais amostras seriam usadas nos ensaios do motor. Foram escolhidas a com maior força e a que apresentou a menor força, quando aplicada a compressão.

Para o terceiro fator, anel de fixação do rolamento dianteiro (Figura 10), realizou-se uma análise das tolerâncias dos componentes que se relacionavam com o rolamento. Conforme o projeto do motor, o rolamento dianteiro deveria ser travado axialmente. Como os componentes não são usinados (por serem componentes fabricados através do processo de injeção, sua precisão dimensional já é relativamente suficiente) poderia haver a possibilidade do rolamento não estar sendo totalmente travado pelo anel. Então verificou-se a somatória das tolerâncias e foi usinado um anel, fazendo com que o encaixe ficasse maior, garantindo assim, o travamento do rolamento mesmo que as outras medidas estivessem na mínima tolerância.

Figura 10 – Anel de fixação do rolamento dianteiro



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

O quarto fator, torque de aperto do anel, foi definido em duas etapas. O primeiro nível, 15 N.m, foi calculado como sendo o torque ideal para a fixação do anel. Já para o segundo nível, em consulta ao Departamento de Engenharia Industrial, verificou-se qual o máximo torque das parafusadeiras pneumáticas da linha de produção. Então como segundo nível tem-se o torque de 25 N.m. Para o ensaio, foi utilizado um torquímetro (Figura 11), devidamente calibrado, para aplicar o exato torque.

Figura 11 – Torquímetro



Fonte: Elaborado pelo autor(2016)

Para o último fator, a vedação, os níveis foram definidos como “com vedação” e “sem vedação”. Esta decisão utilizou-se de uma norma de ensaios de motores elétricos, e que permite a retirada da vedação durante o ensaio do motor.

Conforme visto na literatura, foram atribuídos os símbolos “+” e “-” aos níveis dos fatores. Abaixo a Tabela 3 resume como ficaram os níveis definidos:

Tabela 3 – Níveis dos fatores para o DOE

Fatores	+	-
Carcaça:	Mancal Alinhado	Mancal desalinhado
Arruela ondulada	F=325 N a 2.5 mm	F=160 N a 2.5 mm
Encosto anel dianteiro	Anel Bruto =>menor carga axial	Anel Usinado (0.2mm) =>Maior carga axial
Torque de Aperto dos anéis	25 N.m maior carga/deformação no encosto dos rolamentos	15 N.m menor carga/deformação
Vedação	Com V'ring (encostado)	Sem V'ring

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

3.3 DOE dos Motores

Buscando a melhor forma de medir as perdas mecânicas do motor, entrou-se em contato com o departamento de Pesquisa e Inovação Tecnológica da empresa, aonde existe uma bancada específica (Figura 12) para esse tipo de medição.

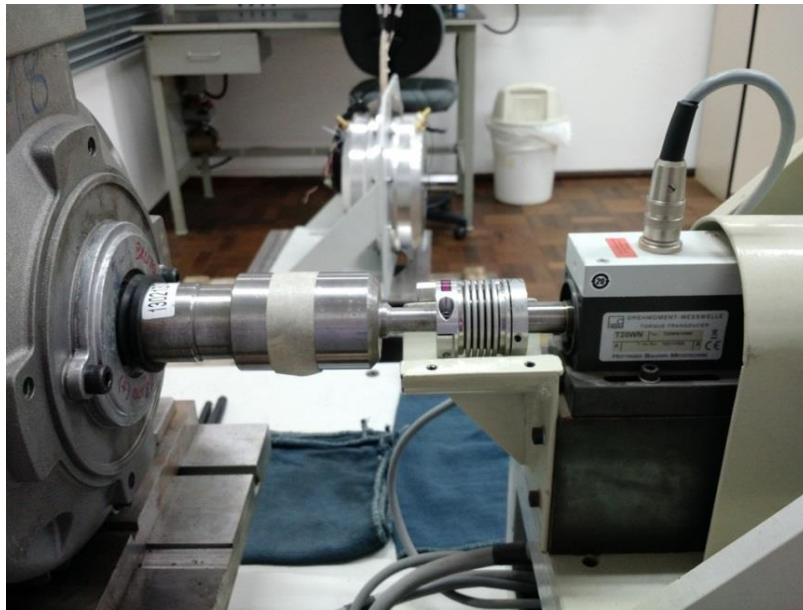
Figura 12 - Bancada de ensaios



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Esta bancada é composta por um motor acionador, o qual é acionado por um inversor de frequência, garantindo assim a precisão na rotação durante o experimento. Ligado ao motor há um transdutor de torque rotativo (Figura 13), que é um equipamento capaz de medir o torque em tempo real. O transdutor é ligado ao protótipo a ser ensaiado através de um acoplamento flexível, que minimiza problemas como desalinhamento entre os eixos. Ligado à bancada, existe um computador com um software que recebe o sinal do transdutor rotativo e apresenta em tempo real na tela. Além disto, o software converte o torque (N.m) em potência (W), que seria a potência consumida pela perda mecânica do motor.

Figura 13 - Transdutor de torque e acoplamento flexível



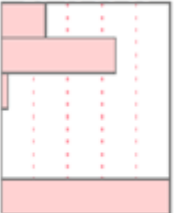
Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Antes do DOE ser realizado, foi executada uma análise do sistema de medição (MSA). Ao se realizar uma medição, duas variações acabam influenciando-a: variação entre as peças e a variação do sistema de medição. Para que um sistema seja apropriado, a variação do sistema de medição deve ser menor do que a variação entre diferentes peças.

Nessa análise, foram utilizados dois protótipos diferentes, que já haviam sido ensaiados anteriormente em outro laboratório, em outro sistema de ensaio, sendo que um apresentou perda mecânica alta e o outro perda mecânica baixa. Para validar o sistema de medição, foram realizadas 3 medições em cada motor. Em seguida o motor foi retirado e o outro motor foi ensaiado também 3 vezes. Esse processo se repetiu por duas vezes, para que o erro proveniente do setup da medição também fosse considerado. Essas medições repetidas permitem avaliar se o sistema de medição é apropriado.

Como pode ser visto na Figura 14, a análise feita no software estatístico JMP mostrou que o erro da medida e do setup de medição são responsáveis por 4,1% do total da variação do sistema. De acordo com critérios definidos por Sturm *apud* AIAG(2010), a variação do sistema de medição deve ser menor que 10%, e isso valida o sistema de medição.

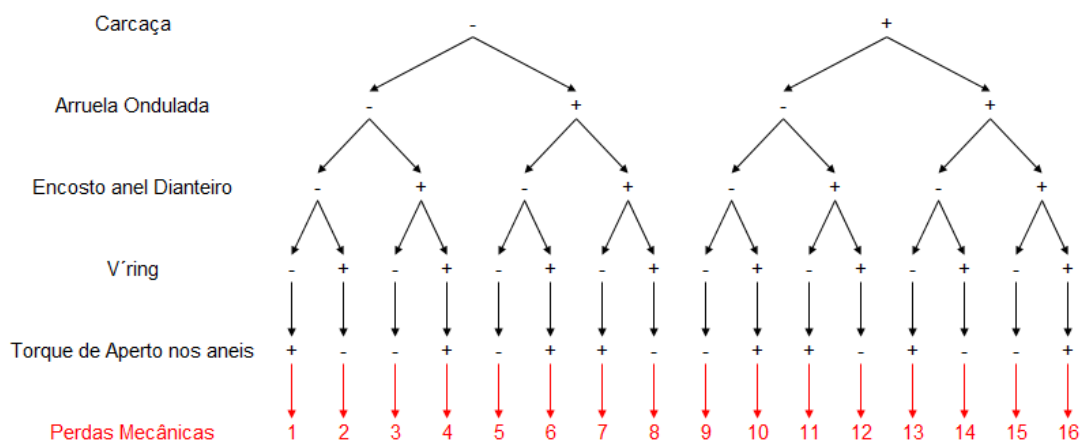
Figura 14 - Análise do Sistema de Medição

Variance Components				
Component	Var		20 40 60 80	Sqrt(Var Comp)
	Component	% of Total		
Montagem	155,36603	27,3		12,465
Motor[Montagem]	389,83226	68,5		19,744
Setup Medição[Montagem,Motor]	21,19460	3,7		4,604
Medida[Montagem,Motor,Setup Medição]	2,33668	0,4109		1,529
Within	0,00000	0,0		0,000
Total	568,72957	100,0		23,848

Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Ao todo foram 16 rodadas, onde foram variados o torque de aperto do anel dianteiro, a utilização ou não da vedação anel em V, a arruela ondulada de pré-carga, anel de fixação do rolamento e alinhamento das carcaças. Como se tratava de 5 fatores, o total de rodadas do experimento seria 32. Porém optou por fazer um experimento fatorial fracionado, onde o fator torque de aperto foi fracionado, ou seja, não foram executados ensaios com ele nos dois níveis, e sim alternando seus níveis, como pode ser visto na Figura 15 que ilustra a árvore de experimentos. Nela, é possível verificar que o fator torque de aperto não é simétrico, ou seja, não possui os dois níveis. Apesar de se ter optado pelo experimento fatorial fracionado, ainda é possível verificar a influência deste fator na resposta.

Figura 15 - Árvore de experimentos



Fonte: Elaborado pelo autor (2016)

Após definidos os parâmetros de variação que seriam utilizados nos experimentos, deu-se início aos testes. Para que o experimento apresentasse resultados mais próximos da realidade, foi determinado que a rotação do

experimento seria a mesma que o motor estaria desempenhando em sua aplicação, de acordo com sua configuração(motor 4 polos operando em 50 Hz): 1500 rpm.

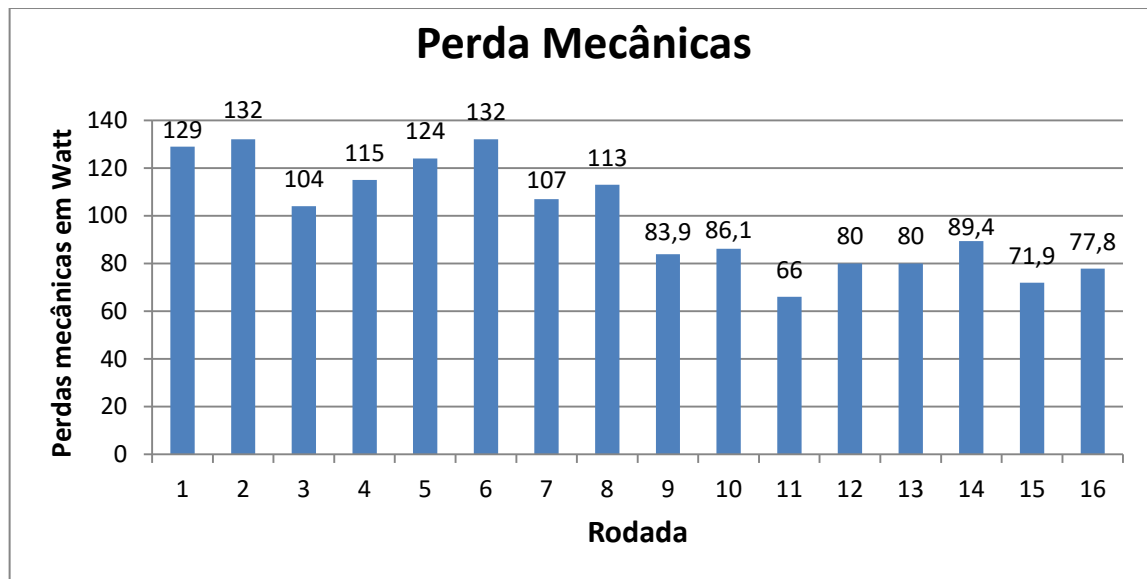
O procedimento de ensaio foi realizado conforme feito no MSA do experimento. Cada rodada do experimento teve uma duração de 30 minutos, com leituras dos valores de perda mecânica a cada 5 minutos. Após coletados os dados do experimento, foi utilizado o software estatístico JMP para análise dos resultados.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

4.1 Execução do DOE

Os valores obtidos das medições da cada rodada do experimento foram organizados conforme a Gráfico 1 abaixo:

Gráfico 1 - Resultado das medições



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Após a realização dos ensaios, os dados coletados foram analisados através do software estatístico JMP. Como resultado desta análise, o fator apontado como o que exercia maior influência sobre a eficiência do motor é o “desalinhamento dos mancais”, seguido por “encosto do rolamento dianteiro” e por “vedação”. Segundo o resultado apresentado pelo Software (Figura 16), o desalinhamento dos mancais é responsável por consumir 20W. Comparando isso com a melhor medição, 66W de perda, esses 20W correspondem a cerca de 30% das perdas mecânicas. Porém, para que tal resultado fosse confirmado, seria necessário criar uma forma de manipular esta variação e reproduzir a variação.

Figura 16 – Resultado da análise no software estatístico JMP

Term	Estimate	Relative Std Error	Pseudo t-Ratio	Pseudo p-Value
Carcaça	-20,05625	0,25	-61,12	<,0001*
Encosto anel dianteiro	-7,60625	0,25	-23,18	<,0001*
V'ring	3,71875	0,25	11,33	<,0001*
Carcaça*Encosto anel dianteiro	2,14375	0,25	6,53	0,0013*
Carcaça*Torque aperto Parafusos	-1,58125	0,25	-4,82	0,0048*
Encosto anel dianteiro*V'ring	0,89375	0,25	2,72	0,0416*
Arruela ondulada*Encosto anel dianteiro	0,64375	0,25	1,96	0,1070
Carcaça*Arruela ondulada	0,44375	0,25	1,35	0,2342
Torque aperto Parafusos	-0,33125	0,25	-1,01	0,3591
Carcaça*V'ring	0,21875	0,25	0,67	0,5345
Arruela ondulada*Torque aperto Parafusos	0,14375	0,25	0,44	0,6796
V'ring*Torque aperto Parafusos	-0,10625	0,25	-0,32	0,7592
Arruela ondulada	-0,05625	0,25	-0,17	0,8706
Arruela ondulada*V'ring	-0,05625	0,25	-0,17	0,8706
Encosto anel dianteiro*Torque aperto Parafusos	-0,05625	0,25	-0,17	0,8706

No error degrees of freedom, so ordinary tests uncomputable.
 Relative Std Error corresponds to residual standard error of 1.
 Pseudo t-Ratio and p-Value calculated using Lenth PSE = 0,32812 and DFE=5

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

4.2 Validação dos Resultados

A partir dos resultados obtidos, partiu-se para um estudo mais detalhado da carcaça. Como o fator que apresentou maior diferença entre as medições feitas na máquina de medição tridimensional foi o desalinhamento entre os mancais, buscou-se uma forma de manipular tal desalinhamento e realizar novos ensaios. Se com essa manipulação, os resultados obtidos fossem semelhantes ao que foram vistos no DOE, ficaria comprovado que o principal fator que estaria aumentando a perda mecânica seria o desalinhamento entre os mancais.

Como a carcaça do motor é composta por duas partes, que além do encaixe entre elas, são prensadas no estator, e isso tornaria muito difícil manipular o desalinhamento, optou-se em não utilizar o estator nestes ensaios. Para que fosse simulado o desalinhamento medido nos dois protótipos anteriormente ensaiados, o encaixe das carcaças foi usinado aumentando o diâmetro em 1,4mm para que o desalinhamento medido no motor usado no DOE pudesse ser replicado.

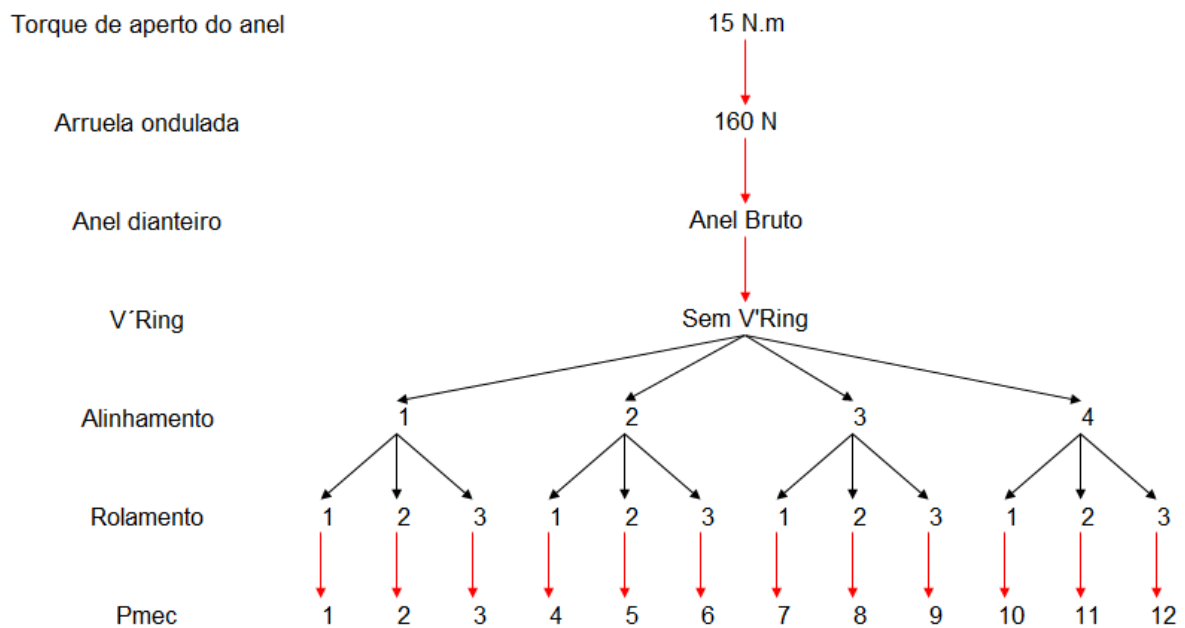
Havia uma teoria que os rolamentos também poderiam estar influenciando o rendimento, porém no DOE este fator foi considerado um ruído, devida a baixa taxa de falha do rolamento e a dificuldade de trocá-los, quando se utilizava as carcaças prensadas junto com o estator. Como na comprovação não seriam utilizadas as carcaças prensadas no estator, foi optado por variar os rolamentos com a intenção

de tornar mais rica a aquisição de dados. Para isso, foram usados 3 pares de rolamentos diferentes, que foram combinados com os dois conjuntos de carcaças.

Novamente na bancada de ensaios, foi levado o motor que tinha o encaixe usinado (portanto desalinhado) e o que estava alinhado para que fossem realizadas novas medições de perda mecânica. Foram realizados 4 rodadas de ensaios, cada uma com um alinhamento entre os mancais diferentes: mancais alinhados, mancais desalinhados horizontalmente, mancais desalinhados verticalmente, e por último, mancais com desalinhamento máximo, que era uma combinação entre os desalinhamentos horizontais e verticais. Para cada alinhamento, foram realizadas 3 medições, uma com cada par de rolamento.

Os fatores previamente manipulados no DOE foram travados nos valores que apresentaram melhor desempenho. Assim a árvore de experimentos pode ser visualizada na Figura 17.

Figura 17 - Árvore dos ensaios da validação.



Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

A Tabela4 apresenta os resultados obtidos:

Tabela 4 - Resultados obtidos

Alinhamento	Rolamento	Medição	Valores (Watts)	Média (Watts)
1 - Alinhado	1	1	55.0	54.2
	2	2	52.8	
	3	3	54.7	
2 - Desalinhado Horizontal	1	4	75.0	71.3
	2	5	70.0	
	3	6	69.0	
3 - Desalinhado Vertical	1	7	75.0	70.7
	2	8	72.0	
	3	9	65.0	
4- Desalinhado Combinado	1	10	81.6	83.8
	2	11	86.0	
	3	12	83.7	

Fonte: Elaborado pelo autor (2016).

Como pode-se observar, a variação entre os resultados obtidos é considerável, sendo que o desalinhamento causou um aumento de 54% nas perdas mecânicas em relação ao valor medido com o mancal alinhado. Os valores obtidos quando variados os rolamentos acabaram sendo bem lineares, indicando que estes de fato não teriam grande influência nas variações da eficiência.

4.3 Implantação de melhorias

Após validados os resultados, foram tomadas ações de correção dos problemas apontados como mais relevantes. A primeira delas foi a criação de um dispositivo, que visa garantir o alinhamento entre as carcaças e o estator no momento da prensagem, já que depois de prensados, não haveria uma forma de corrigir o desalinhamento, e os componentes teriam que ser sucateados. Com a utilização deste dispositivo, pretende-se garantir que os alinhamentos fiquem dentro do valor verificado no DOE como aceitável.

Outra medida adotada para reduzir o valor de perda mecânica, foi especificar a tolerância da altura do encosto do anel de fixação do rolamento. Conforme os resultados do DOE, a melhor condição é quando a altura é menor que 3.2mm, e com isso definiu-se como tolerância superior 0 e inferior -0,2mm.

Com relação ao terceiro fator que mais tem influência na perda mecânica, a vedação, adotou-se como padrão que os ensaios seriam executados sempre sem a mesma, já que a norma IEC 60034-2-1 item 5.8, cita que a vedação externa pode ser removida para o teste, uma vez que após um longo tempo de operação, o atrito gerado por ela torna-se insignificante diante de outras perdas.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A necessidade das empresas serem cada vez mais eficientes no processo de desenvolvimento de produto, seja reduzindo seu *lead time* ou apresentando um produto de qualidade e mais robusto na questão de falhas, faz com que surja a necessidade de buscar meios que auxiliem a busca por esses resultados. Algumas ferramentas da metodologia Seis Sigma têm esse objetivo, como o planejamento de experimentos (DOE) e análise do sistema de variação (MSA).

Na etapa de desenvolvimento de produtos inovadores, é comum se deparar com resultados diferentes do esperado. A aplicação das ferramentas previamente citadas acaba por ser uma forma de descobrir quais as causas do baixo desempenho de produtos que estão em desenvolvimento. Além disso, ajuda a reduzir o tempo e os custos, já que apresenta o real causador da falha e evita que sejam gastos tempo e dinheiro em tentativas baseadas apenas na experiência.

No presente trabalho, as ferramentas se mostraram eficazes na investigação da causa que estaria aumentando as perdas mecânicas do motor em fase de desenvolvimento. Isso se confirmou com a verificação feita após a execução do DOE, quando foi manipulado o fator que mais apresentava influência nas perdas, e os resultados se mostraram semelhantes.

Como o resultado do DOE são os efeitos que cada fator tem sobre a variável resposta, pode-se verificar os que mais tinham influência e os que pouco interferiam. As ações que mais tinham impacto foram estudadas e ações de correção foram tomadas, como a criação de um dispositivo que garanta o alinhamento dos componentes no momento da prensagem e a especificação da tolerância aceitável para o encosto do anel de fixação dos rolamentos.

Ao fim do trabalho, pôde-se constatar que o objetivo geral e os específicos foram alcançados, visto que a ferramenta DOE apresentou os fatores que mais influenciavam na perda mecânica e com isso foi possível solucioná-los, conforme afirmação de Henriques (2011). Werkema e Aguiar (1996) também reforçam essa ideia, afirmando que o principal objetivo DOE é determinar as causas que mais influenciam o resultado, possibilitando tomar ações que as minimizem ou até as eliminem do processo.

Como sugestão para trabalhos futuros, propõe-se a aplicação da metodologia no desenvolvimento de outros produtos inovadores, que apresentem comportamento

anormal entre os protótipos. Também sugere-se buscar novas ferramentas que complementem o uso das já utilizadas.

REFERÊNCIAS

AVALIAÇÃO da variação do sistema de medição. 2016. Disponível em: <<https://www.minitab.com/uploadedFiles/Documents/sample-materials/FuelInjectorNozzles-PT.pdf>>. Acesso em: 14 jun. 2016.

BAXTER, Mike. **PROJETO DE PRODUTO**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

BAYOD, Renan Sartori. **ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO EM UMA LINHA PRODUTIVA DE RODAS**. 2012. 47 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção Mecânica, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

ELETROBRAS; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (BRASIL); PROGRAMA NACIONAL DE CONSERVAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA (BRASIL). **Motor elétrico: guia básico**. Brasília: CNI, 2009.

FIORAVANTI, Alexandre. **APLICAÇÃO DA METODOLOGIA "DESIGN FOR SIX SIGMA" (DFSS) EM PROJETOS AUTOMOTIVOS**. 2005. 134 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Automotiva, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005.

FONSECA, Mariana Paes da. **A ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO (MSA) COMO FERRAMENTA NO CONTROLE DE PROCESSOS EM UMA INDÚSTRIA DE DISPOSITIVOS MÉDICOS DESCARTÁVEIS**. 2008. 92 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Produção, Universidade Federal de Juiz de Fora, Juiz de Fora, 2008.

GALDÁMEZ, Edwin Vladimir Cardoza. **APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA MELHORIA DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS PLÁSTICOS**. 2002. 121 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2002.

HENRIQUES, Francisco José da Silva. **O uso do DOE em conjunto com FTA no desenvolvimento e melhoria de projetos inovadores**. 2011. 142 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **IEC 60034: Rotating electrical machines - Part 2-1: Standard methods for determining losses and efficiency from tests (excluding machines for traction vehicles)**. 2 ed. Geneva: Iec, 2014. 190 p.

MARSHALL JUNIOR, Isnardet al. **Gestão da qualidade**. 10. ed. Rio de Janeiro: Fgv, 2011.

MELLO, Carlos Henrique Pereira; ACADEMIA PEARSON. **Gestão da qualidade**. São Paulo: Pearson, 2011.

MONTGOMERY, Douglas C.. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Tempe: John Wiley & Sons, Inc., 2012.

Perez-Wilson, Mário. **Seis sigma**. : compreendendo o conceito, as implicações e os desafios. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2000.

PORTO ALEGRE. Felipe Moraes Menezes. Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO**. Porto Alegre: Produttore, 2013. 28 p.

ROMEIRO FILHO, Eduardo et al (Org.). **Projeto de Produto**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2010.

ROZENFELD, Henrique et al. **Gestão de Desenvolvimento de Produto**: Uma referência para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

STURM, Carla Hartmann. **ANÁLISE DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO NO SETOR DE USINAGEM DE UMA EMPRESA METAL MECÂNICA**. 2015. 36 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia de Produção, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

UNTERLEIDER, Carlos Eduardo Appollo. **OTIMIZAÇÃO MULTIVARIADA DE UM PROCESSO QUÍMICO ATRAVÉS DO USO DE PROJETO DE EXPERIMENTOS**. 2006. 122 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado em Engenharia de Produção, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2006.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino; AGUIAR, Sílvia. **PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS: COMO IDENTIFICAR AS PRINCIPAIS VARIÁVEIS INFLUENTES EM UM PROCESSO**. Belo Horizonte: Editora Littera Maciel, 1996.

WERKEMA, Maria Cristina Catarino. **Design For Six Sigma**: Ferramentas básicas usadas nas etapas D e M do DMADV. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2005. (SEIS SIGMA).