

Fernando Teles de Farias Neto

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOE NO ESTUDO DO VOLUME ATIVO DE UM
MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) submetido ao Curso de Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Elétrica.

Orientador: Prof. Jean Viane Leite, Dr.

Coorientador: Eng. Maurício Ruviaro, Msc.

Florianópolis - SC
2020

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Neto, Fernando Teles de Farias
A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOE NO ESTUDO DO VOLUME ATIVO DE
UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO / Fernando Teles de Farias
Neto ; orientador, Jean Viane Leite, coorientador,
Maurício Ruviano, 2020.
97 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico,
Graduação em Engenharia Elétrica, Florianópolis, 2020.

Inclui referências.

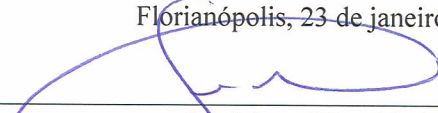
1. Engenharia Elétrica. 2. Motores de Indução
Trifásicos. 3. DOE. 4. Fator C. I. Viane Leite, Jean. II.
Ruviano, Maurício. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Elétrica. IV. Título.

Fernando Teles de Farias Neto

**A UTILIZAÇÃO DO MÉTODO DOE NO ESTUDO DO VOLUME
ATIVO DE UM MOTOR DE INDUÇÃO TRIFÁSICO**

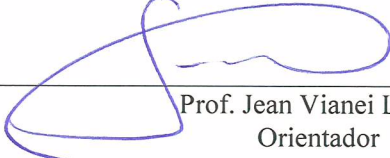
Este Trabalho foi julgado adequado como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica e aprovado, em sua forma final, pela Banca Examinadora

Florianópolis, 23 de janeiro de 2020.

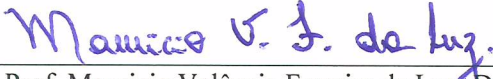


Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Coordenador do Curso de Graduação em Engenharia Elétrica

Banca Examinadora:



Prof. Jean Viane Leite, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Prof. Mauricio Valência Ferreira da Luz, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina



Eng. Elet. Cristhian Marcelo Becker Cares, Me.
Universidade Federal de Santa Catarina

RESUMO

Motores de Indução Trifásicos são máquinas altamente utilizadas por toda a indústria ao redor do mundo por seu baixo custo e adequação a um grande número de aplicações. Essas máquinas estão em constante desenvolvimento desde sua criação no século 19 e a busca pela redução do volume ativo do motor foi incansavelmente objetivada ao longo desses anos. Atualmente, os fabricantes buscam fornecer o motor com os melhores desempenhos possíveis e também com a utilização do menor volume ativo possível. Com isso, esse trabalho objetiva um estudo, através da metodologia DOE - Design of Experiments, da influência de cinco fatores envolvidos em uma aplicação, tais quais: Temperatura Ambiente, Corrente de Partida, Inércia da Carga, Tensão e Classe de Elevação, no volume ativo de um Motor de Indução Trifásico produzido pela WEG Equipamentos Elétricos S.A, o qual foi escolhido para referência. Adicionalmente, foi realizado um estudo acerca da área da seção utilizável do estator e do rotor para esses mesmos fatores. Como resultado do trabalho, e considerando as condições de contorno propostas, obteve-se como os fatores mais influentes na variável resposta de estudo do experimento, o fator de carregamento do volume ativo - Fator C($kW \cdot s/m^3$), a Temperatura Ambiente, a Inércia da Carga e a Classe de Elevação.

Palavras-chave: Motor de Indução Trifásico, Fator C, DOE.

ABSTRACT

Three-phase Induction Motors are highly used machines throughout the industry around the world for their low cost and suitability for a large number of applications. These machines have been in constant development since their creation in the 19th century and the quest to reduce the active volume of the engine has been tirelessly aimed at over the years. Currently, manufacturers seek to provide the motor with the best possible performance and also with the usage of the lowest possible active volume. Therefore, this work aims to study, through the DOE methodology - Design of Experiments, the influence of five factors involved in an application, such as: Ambient Temperature, Inrush Current, Load Inertia, Voltage and Elevation Class, in the volume active of a Three-Phase Induction Motor produced by WEG Equipamentos Elétricos SA, which was chosen for reference. Additionally, a study was carried out on the area of the usable section of the stator and the rotor for these same factors. As a result of the work, and considering the proposed boundary conditions, it was obtained as the most influential factors on the response variable, the active volume loading factor - Factor C ($kW \cdot s/m^3$), the Ambient Temperature, the Load Inertia and the Elevation Class.

Keywords: Three-Phase Induction Motors, Factor C, DOE.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Campo Girante.	19
Figura 2 – Rotor de Gaiola.	20
Figura 3 – Rotor Bobinado.	21
Figura 4 – Corrente e Tensão no Rotor.	23
Figura 5 – Regime de Serviço S1 com carga constante.	26
Figura 6 – Ventilação IC01 Biletaral.	28
Figura 7 – Ventilação IC01 Misto.	28
Figura 8 – Fator C pelo fator kW/rps.	31
Figura 9 – Fator C pela potência aparente da máquina.	32
Figura 10 – Exemplo das terminologias em um FRD.	34
Figura 11 – Experimento com dois fatores com a variável resposta Y mostrada nos cantos.	36
Figura 12 – Matriz Experimental.	36
Figura 13 – Experimento com interação entre os fatores.	37
Figura 14 – À esquerda um resultado de uma interação baixa entre os fatores e à direita uma interação alta.	38
Figura 15 – Resolução de experimentos fatoriais.	40
Figura 16 – Gráfico de Pareto com a linha de corte SME e ME.	42
Figura 17 – Gráfico de Probabilidade Normal.	44
Figura 18 – Espaço de inferência x custo em função do número de tratamentos.	46
Figura 19 – Uma exemplificação de um FRD.	47
Figura 20 – Título, Objetivo, Informações prévias e variáveis resposta.	48
Figura 21 – Fatores, Níveis, Teoria e Previsão.	49
Figura 22 – Previsão gráfica para os fatores.	50
Figura 23 – Identificação do Ruído bem como seu método de Controle.	50
Figura 24 – A FRD a ser documentada.	50
Figura 25 – Estrutura de confundimento.	51
Figura 26 – Relatório gerado pelo software de cálculo NEWTON.	54
Figura 27 – Fluxograma do experimento.	55
Figura 28 – Tempo de rotor bloqueado da máquina em 20 segundos.	57
Figura 29 – Tempo de aceleração.	58
Figura 30 – Curva de partida da máquina.	59
Figura 31 – Saída do Cálculo Térmico.	59
Figura 32 – Previsão gráfica acerca da variável resposta em função dos fatores e níveis.	63
Figura 33 – FRD para o experimento do trabalho.	63
Figura 34 – Estrutura de confundimento do experimento.	64

Figura 35 – Correlação entre o Fator C e o pacote de chapas L_{Ferro1}	67
Figura 36 – A esquerda o gráfico de Pareto e a direita o gráfico de Distribuição Normal.	69
Figura 37 – Relação entre os fatores e a variável resposta.	70
Figura 38 – Gráfico do Estimates organizados pela significância.	71
Figura 39 – Variação da elevação de temperatura em função dos fatores e seus respectivos níveis.	73
Figura 40 – A esquerda o gráfico de Pareto e a direita o gráfico de Distribuição Normal para a 2ª rodada.	78
Figura 41 – Relação entre os fatores e a variável resposta.	80
Figura 42 – Gráfico do Estimates organizados pela significância.	81
Figura 43 – A esquerda o gráfico de Medição de Variabilidade da Diferença(K) em função dos fatores e seus níveis, já a direita o mesmo gráfico, porém apenas em função do fator Inércia da Carga - C.	83
Figura 44 – Gráfico do Perfil de Interação dos fatores que se destacaram no experimento.	84
Figura 45 – Gráfico do Perfil de Interação mostrando a interação entre A e E. . .	85
Figura 46 – Equação $Y = f(x)$ com os graus de liberdade que mais impactaram a variável resposta.	86
Figura 47 – Visualização do modelo predito e do resultado das observações do experimento.	89
Figura 48 – Gráfico de Perfil de Predição com os cinco fatores do experimento para os parâmetros Kre e Krr.	91

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classe de Isolação	24
Tabela 2 – Classes de Elevação para Classe de Isolação F	24
Tabela 3 – Regimes de Serviço pela IEC 60034-1:2017	25
Tabela 4 – Número de tratamentos para k fatores com dois níveis.	39
Tabela 5 – Valores padrões para as variáveis $t_{0,975;d}$ e $t_{\gamma;d}$ em função dos GL.	42
Tabela 6 – Exemplo de cálculo dos quantis.	43
Tabela 7 – Fatores e níveis do experimento na 1ª rodada.	52
Tabela 8 – Fatores e níveis do experimento na 2ª rodada.	52
Tabela 9 – Dados da máquina escolhida.	53
Tabela 10 – Dados do ensaio da máquina escolhida	53
Tabela 11 – Dimensional do motor base utilizado.	53
Tabela 12 – Dados da curva de carga do ventilador.	56
Tabela 13 – A direita o anel de curto da máquina base e a esquerda o anel de curto utilizado no experimento.	60
Tabela 14 – Matriz experimental do estudo.	61
Tabela 15 – Matriz experimental com a variável resposta.	66
Tabela 16 – Comprimento do pacote de chapas L_{Ferro1} em milímetros para cada tratamento do experimento na 1ª rodada.	67
Tabela 17 – Tempo de rotor bloqueado e tempo de aceleração para todos os tratamentos da 1ª rodada.	68
Tabela 18 – Elevação de temperatura da máquina em operação para os 16 tratamentos.	72
Tabela 19 – Matriz experimental com a variável resposta.	76
Tabela 20 – Comprimento do pacote de chapas L_{Ferro1} em milímetros para cada tratamento do experimento do 2º DOE.	77
Tabela 21 – Tempo de rotor bloqueado e tempo de aceleração para todos os tratamentos do 2º DOE.	78
Tabela 22 – Elevação de temperatura da máquina em operação para os 16 tratamentos no 2º DOE.	82
Tabela 23 – Comparação dos resultados encontrados a partir do modelo e do experimento.	88
Tabela 24 – Tabela da validação do modelo com três tratamentos adicionais.	89
Tabela 25 – Valores de Kre e Krr para cada tratamento da matriz experimental.	91
Tabela 26 – Efeito de cada fator na variável resposta para a 1ª rodada.	94
Tabela 27 – Efeito de cada fator na variável resposta para a 2ª rodada.	95

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DOE	Design of Experiments
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Normas Brasileiras
IEC	International Electrotechnical Commission
FP	Fator de Potência
FRD	Factor Relationship Diagram
PSE	Pseudo Standard Error
ME	Margin of Error
SME	Simultaneous Margin of Error
GL	Grau de Liberdade
pu	Por Unidade
RMSE	Root Mean Square Error
NEMA	National Electrical Manufacturers Association

LISTA DE SÍMBOLOS

\vec{H}	Vetor Campo Magnético (A/m)
I_{liq}	Corrente Líquida em um Condutor (A)
e_{ind}	Tensão Induzida (V)
ϕ	Fluxo Magnético (Wb)
N	Número de Espiras
\vec{H}_S	Vetor Campo Magnético no Estator (A/m)
\vec{H}_R	Vetor Campo Magnético no Rotor (A/m)
s	Escorregamento
n_s	Velocidade Síncrona (rpm)
n_r	Velocidade do Motor (rpm)
T_c	Torque da Carga (Nm)
T_O	Torque de Partida da Carga (Nm)
k_c	Constante que depende da carga
P_c	Potência Nominal da Carga (W)
Ta	Tempo de Aceleração (s)
Trb	Tempo de Rotor Bloqueado (s)
J_m	Inércia do Motor (kgm^2)
J_c	Inércia da Carga (kgm^2)
T_{motor}	Torque do Motor (Nm)
T_{carga}	Torque da Carga (Nm)
Fator C	Constante de Carregamento do Volume Ativo ($kW \cdot s/m^3$)
k_{Forma}	Constante Harmonica
$B_{Entreferro}$	Densidade de Fluxo no Entreferro (T)
J_{Acond1}	Densidade de Corrente No Estator (A/mm^2)
L_{Ferro1}	Comprimento do Pacote de Chapas do Estator (m)

D_1	Diâmetro Interno do Estator(m)
δ	Entreferro(m)
α_i	Fator de Densidade de Fluxo no Dente
k_W	Fator de Enrolamento da Bobinagem
S_{gap}	Potência Aparente no Entreferro (VA)
Y1	Variável Resposta
D_{e1}	Diâmetro Externo do Estator(m)
m	Número de Contrastes ou Graus de Liberdade
J_{motor}	Inércia do Motor Base (kgm^2)
°C	Graus Celsius
V	Volts [V]
D_{e2}	Diâmetro Externo do Rotor(m)
D_{I2}	Diâmetro Interno do Rotor(m)
N1	Número de Ranhuras do Estator
N2	Número de Ranhuras do Rotor
T_{min}	Torque Mínimo na Curva de Partida da Carga (pu)
T_{final}	Torque Final na Curva de Partida da Carga (pu)
Dext	Diâmetro Externo do Anel de Curto (m)
Dint	Diâmetro Interno do Anel de Curto (m)
Kre	Constante de Utilização da Chapa do Estator
Krr	Constante de Utilização da Chapa do Rotor
R^2	Coeficiente de Determinação
R^2_{Adj}	Coeficiente de Determinação Ajustado
SS_{modelo}	Soma dos Quadrados do Modelo
SS_{error}	Soma dos Quadrados dos Resíduos
SS_{total}	Soma Total dos Quadrados

DF_{error}	Diferença Entre os Graus de Liberdade do Modelo e do Experimento
DF_{total}	Graus de Liberdade Total
DF_{modelo}	Graus de Liberdade do Modelo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
1.1	OBJETIVO	16
1.1.1	Objetivo Geral	16
1.1.2	Objetivos Específicos	16
1.2	ORGANIZAÇÃO	17
1.3	JUSTIFICATIVA	17
2	MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS	18
2.1	DEFINIÇÃO	18
2.1.1	O Campo Girante	19
2.2	FORMAS CONSTRUTIVAS	20
2.2.1	Rotor de Gaiola Esquilo	20
2.2.2	Rotor Bobinado	21
2.3	CONCEITOS BÁSICOS	22
2.3.1	O Conjugado Induzido	22
2.3.2	Escorregamento	23
2.3.3	Classe de Isolação	24
2.3.4	Classe de Elevação	24
2.3.5	Fator de Serviço	25
2.3.6	Regime de Serviço	25
2.3.7	Tempo de Rotor Bloqueado	26
2.3.8	Tempo de Aceleração	26
2.4	MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO	27
2.5	DIMENSIONAMENTO DA MÁQUINA	29
2.5.1	Conceitos Básicos	29
2.5.2	A Constante de Aproveitamento de Volume Ativo da Máquina	29
3	DOE - DESIGN OF EXPERIMENTS	33
3.1	DEFINIÇÃO	33
3.2	TERMOS VINCULADOS AO DOE	33
3.3	FORMAS DE EXECUÇÃO DO DOE	35
3.3.1	Experimentos com Fatoriais Completos 2^k	35
3.3.2	Experimentos Fatoriais Fracionários 2^{k-p}	38
3.3.3	Resolução de um Experimento	39
3.4	MÉTODO DE LENTH	40
3.5	PLANEJAMENTO DE DOE'S	44
3.5.1	Definição dos Objetivos e das Métricas	45
3.5.2	Seleção dos Fatores e dos Níveis	45
3.5.3	Hipóteses, Teorias e Previsões	45

3.5.4	Definição do Espaço de Inferência e a Quantidade de Tratamentos	45
3.5.5	Elaboração do FRD - Factor Relationship Diagram	46
3.5.6	Fomulário Padrão para DOE	47
4	MATERIAIS E MÉTODOS	52
4.1	CONDIÇÕES DE CONTORNO	53
4.2	APLICAÇÃO E PLANEJAMENTO DO DOE	60
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	65
5.1	ANÁLISE DO 1º DOE	65
5.1.1	Conclusão do 1º DOE	74
5.2	ANÁLISE DO 2º DOE	76
5.2.1	O Modelo Reduzido	85
5.2.2	Análise dos Fatores Kre e Krr	89
5.2.3	Conclusão do 2º DOE	92
6	CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS	94
	REFERÊNCIAS	96

1 INTRODUÇÃO

Uma máquina elétrica é um dispositivo que pode converter tanto a energia mecânica em energia elétrica como a energia elétrica em energia mecânica. Quando tal dispositivo é usado para converter energia mecânica em energia elétrica, ele é denominado gerador e quando é usado para converter energia elétrica em mecânica é denominado motor (CHAPMAN, 2005).

No contexto industrial, os motores de indução, dispositivos elétricos constituídos por campos magnéticos, apresentam inúmeras aplicações devido ao seu baixo custo de manutenção e por ser um equipamento robusto. Em se tratando do projeto de sistemas de engenharia, objetiva-se produzir máquinas para realizar tarefas específicas com ótima economia e eficiência. O problema de projeto e fabricação de máquinas elétricas é construir, o mais economicamente possível, uma máquina que cumpra um determinado conjunto de especificações. Tradicionalmente, o projeto do motor de indução tem sido contemplado para alcançar melhores características de desempenho ou para a redução do custo. É notório que, qualquer melhoria significativa na eficiência operacional do motor de indução implica na conservação de energia (MALAGOLI; LUZ; CAMACHO, 2014).

Um bom desempenho da máquina elétrica começa com a escolha de bons materiais, principalmente os condutores, os dielétricos e os magnéticos, e obviamente um bom projeto. Para poder iniciar o dimensionamento do volume ativo da máquina é necessário que o projetista conheça as principais características da aplicação do cliente, tais como: Tipo da Carga, Fator de Serviço, Regime de Serviço, Temperatura Ambiente, Altitude, Elevação de Temperatura em Operação, Tensão e Frequência Nominal e, é claro, a Potência (RUNCOS, 2018).

Engenheiros e pesquisadores frequentemente utilizam o método chamado OFAT - One Factor at a Time quando desejam investigar a influência de um fator em um processo ou produto. Esse método tem a característica de se variar apenas um fator e manter os outros fixos. Porém, estatisticamente, experimentos planejados (DOE), os quais variam mais de um fator simultaneamente, são mais eficientes, pois é possível encontrar correlações entre os fatores (CZITROM, 1999).

Atualmente, para a realização de um projeto, o engenheiro se baseia em projetos já existentes. Porém, isso pode causar algumas incompatibilidades, já que para um mesmo projeto, dois engenheiros podem ter escolhas diferentes de projetos de referência, o que irá influenciar no desempenho final da máquina a ser fabricada. Além disso, o projeto de referência utilizado, poderá possuir características de aplicação, diferentes das exigidas no projeto atual, o que também poderá acarretar em mudanças nas condições de contorno, e como consequência, influenciar no dimensionamento do volume ativo do motor.

Com esses pontos em mente, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de entender melhor a influência de cinco fatores relacionados às características da aplicação no dimensionamento do volume ativo de um motor de indução trifásico.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo Geral

O Trabalho de Conclusão de Curso a ser desenvolvido tem como objetivo principal elaborar um estudo sobre a influência de cinco fatores - Temperatura Ambiente, Corrente de Partida, Inércia da Carga na Aplicação, Tensão de Alimentação, bem como a Elevação de Temperatura Admissível em Operação - em um projeto de um Motor de Indução Trifásico, avaliando questões de desempenho e principalmente buscando entender a relação desses fatores com a densidade volumétrica de energia do motor. Esse estudo fará uso da metodologia DOE - Design of Experiments, aplicada em grandes empresas na abordagem Six Sigma, o qual busca encontrar e validar influências de variáveis em um processo ou em um produto da empresa, com o objetivo de propor melhorias.

1.1.2 Objetivos Específicos

Considerando o desenvolvimento do trabalho e o objetivo geral apresentado, destacam-se os seguintes objetivos específicos:

- Pesquisar sobre o princípio de funcionamento de motores de indução trifásicos bem como características gerais e de projeto e aplicação;
- Fazer um estudo sobre o método DOE - Design of Experiments;
- Realizar 16 projetos do mesmo motor, aplicando as condições de contorno definidas, utilizando a metodologia do DOE;
- Analisar os resultados obtidos;
- Concluir sobre os resultados.

1.2 ORGANIZAÇÃO

O presente trabalho está organizado da seguinte forma:

Capítulo 1: Introdução

Capítulo 2: Os conceitos relacionados às máquinas de indução trifásicas: tipos, torque, circuito equivalente, potência de saída, aplicações e conceito de densidade volumétrica de energia.

Capítulo 3: Apresentação da metodologia DOE com exemplos.

Capítulo 4: Materiais e a metodologia utilizada no trabalho.

Capítulo 5: Análise dos resultados obtidos.

Capítulo 6: Conclusão e Trabalhos Futuros.

1.3 JUSTIFICATIVA

Motores de indução são amplamente utilizados em vários campos, desde aplicação residencial até tecnologia utilizada no espaço, por esse motivo, o dimensionamento do motor é de grande importância. Durante um projeto, existem várias situações contraditórias às quais impactam no resultado final, por exemplo, caso se deseje uma alta eficiência, o tamanho e o preço do motor aumentarão, caso se deseje um preço mais baixo, outros fatores relacionados ao desempenho serão ignorados, tais quais: rendimento, torque, fator de potência (YETGIN *et al.*, s.d.).

No presente contexto, a justificativa desse trabalho está associada ao desejo do acadêmico de aprimorar conhecimentos na área de projetos de motores de indução trifásicos e também apresentar um estudo sobre a influência de cinco fatores relacionados às aplicações de motores de indução trifásicos no dimensionamento do volume ativo.

2 MÁQUINAS DE INDUÇÃO TRIFÁSICAS

2.1 DEFINIÇÃO

Segundo (CHAPMAN, 2005), uma máquina com apenas um conjunto contínuo de enrolamentos amortecedores é denominada máquina de indução. Essas máquinas, são denominadas máquinas de indução porque a tensão do rotor (que produz a corrente do rotor e o campo magnético do rotor) é induzida nos enrolamentos do rotor em vez de ser fornecida por meio de uma conexão física de condutores. A característica que diferencia uma máquina de indução das demais é que não há necessidade de uma corrente de campo contínua para fazer a máquina funcionar.

Deste modo, a máquina de indução pode ser vista como um transformador generalizado em que quando é utilizada como motor, a potência elétrica absorvida no estator é transformada em potência mecânica na ponta de eixo. Já para a utilização como gerador, a potência mecânica é suprida no eixo por meio de uma turbina e a potência elétrica fornecida no estator (FITZGERALD *et al.*, 2003).

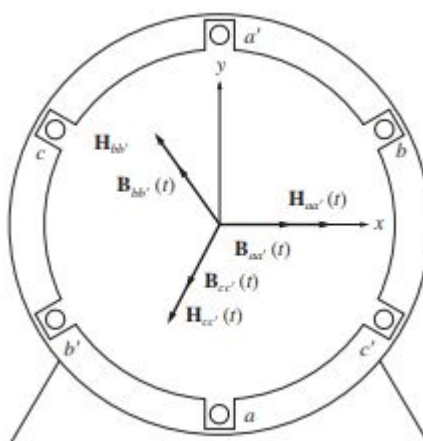
Embora seja possível usar uma máquina de indução como motor ou como gerador, ela apresenta algumas desvantagens como gerador, sendo uma dessas a impossibilidade de controlar o reativo na rede, e, por isso, ela é usada como gerador somente em aplicações especiais, especialmente em aplicações envolvendo energia eólica (FITZGERALD *et al.*, 2003). Por essa razão, as máquinas de indução são usualmente referidas como motores de indução.

2.1.1 O Campo Girante

Segundo (CHAPMAN, 2005), o princípio de funcionamento de uma máquina elétrica de corrente alternada e por consequência também as máquinas de induções trifásicas, é baseado na teoria do Campo Girante que diz que se correntes trifásicas, todas de mesma intensidade e defasadas de 120° entre si, estiverem fluindo em um enrolamento trifásico, um campo magnético girante de intensidade constante será produzido. O enrolamento trifásico consiste em três enrolamentos espaçados de 120 graus elétricos entre si ao redor da superfície da máquina. Esse campo magnético é criado de acordo com a lei de Ampere, que diz que quando uma corrente percorre um condutor, um campo magnético é criado. Como a corrente nos enrolamentos é alternada o campo magnético também é alternado, sendo de intensidade constante, porém sempre girando em direção e completando uma volta ao fim do ciclo de 360 graus elétricos. Esse campo girante alternado causa variação do fluxo magnético, a qual de acordo com a lei de Faraday induzirá uma tensão nas barras do rotor (já que as linhas de fluxo variável cortam as barras do rotor), as quais geram correntes e consequentemente um campo também no rotor, porém de polaridade oposta à do campo girante. Como os campos são opostos, eles se atraem o que faz com que o rotor acompanhe a rotação do campo do estator, fazendo com que se desenvolva um conjugado (WEG, 200-?).

O conceito de campo magnético girante, em sua forma mais simples, é ilustrado por um estator vazio contendo apenas três bobinas, distanciadas de 120° entre si, como mostrado na Figura 1.

Figura 1 – Campo Girante.



Fonte: (CHAPMAN, 2005)

2.2 FORMAS CONSTRUTIVAS

Segundo (CHAPMAN, 2005) um motor de indução possui o mesmo estator da máquina síncrona, porém seu rotor é diferente. Existem dois tipos de construção de rotores em máquinas de indução, o *rotor gaiola esquilo* e o *rotor bobinado*.

2.2.1 Rotor de Gaiola Esquilo

O rotor de gaiola esquilo, mostrado na Figura 2, é um rotor que consiste em uma série de barras condutoras que estão inseridas dentro de ranhuras na superfície do rotor e postas em curto-circuito em ambas as extremidades (CHAPMAN, 2005).

Segundo (WEG, 200-?) o núcleo do rotor é formado por chapas de aço silício. Os condutores podem ser de cobre, latão e alumínio injetado e o formato das barras dos rotores de gaiola pode variar bastante para atender as condições de partida, rendimento e fator de potência.

Como as barras estão em curto-circuito no rotor de gaiola, os parâmetros do circuito equivalente do rotor estão fixos após sua construção. Logo, não é possível variar a impedância do rotor adicionando uma resistência externa (AGRAWAL, 2001).

Figura 2 – Rotor de Gaiola.



Fonte: (WEG, 200-?)

2.2.2 Rotor Bobinado

O rotor bobinado mostrado na Figura 3, é um rotor que possui um conjunto completo de enrolamentos trifásicos que são similares aos enrolamentos do estator. As três fases do enrolamento são normalmente ligadas em estrela e suas terminações são conectadas aos anéis coletores deslizantes, os quais são colocados em curto-circuito externamente com as escovas, as quais se apoiam sobre os anéis deslizantes (CHAPMAN, 2005). Com essa conexão externa é possível tirar proveito com a conexão de uma resistência externa chamada reostato, a qual pode ser utilizada para aumentar o torque do motor. Ainda segundo (CHAPMAN, 2005) esse tipo de rotor demanda um maior custo operacional, pela existência de um desgaste tanto dos anéis coletores, quanto pelas escovas devido ao atrito, o que implica em mais manutenções, além do valor adicional pago pelo reostato e pelo próprio rotor.

No rotor bobinado, as bobinas são confeccionadas com barras de cobre nu. Uma espira da bobina é composta por duas partes, as quais são soldadas entre si na bobina. O isolamento das bobinas, normalmente é por revestimento com fitas a base de mica. É o mesmo processo do estator. As bobinas são fixadas rigidamente dentro das ranhuras através de cunhas. Os anéis coletores são fornecidos em aço inoxidável, entretanto poderão ser fornecidos em bronze ou latão, dependendo da aplicação e de onde foi instalado (WEG, 200-?).

Embora possa parecer fácil de se alterar as condições de Torque x Velocidade e também as características de Corrente x Velocidade, com a introdução de um reostato externo, o uso de motores com rotor bobinado é recomendado somente para aplicações específicas, as quais o motor com rotor de gaiola não é adequado, pois, como já fora exposto, o preço desse tipo de máquina é maior. Aplicações as quais são comuns a esse tipo de motor são: Moinhos de Bola, Moinhos de Rolos e Guindastes. (AGRAWAL, 2001)

Figura 3 – Rotor Bobinado.



Fonte: (WEG, 200-?)

2.3 CONCEITOS BÁSICOS

2.3.1 O Conjugado Induzido

Um conjunto trifásico de tensões é aplicado ao estator resultando em um conjunto trifásico de correntes circulando no estator. Pela lei de Ampere exposta na equação 1 quando uma corrente percorre um condutor, é criado um campo magnético \vec{H} rotacional. Como a corrente I é alternada, o campo também é alternado. O fluxo magnético produzido, atravessa o rotor e se fecha através dos polos norte e sul no estator. Assim, um campo girante é produzido, com intensidade constante.

$$\oint \vec{H} \cdot d\vec{l} = I_{liq} \quad (1)$$

Onde,

\vec{H} = Vetor Campo Magnético (A/m)

$d\vec{l}$ = Diferencial de Comprimento (m)

I_{liq} = Corrente Líquida (A)

Esse campo girante induz tensões nas barras do rotor de acordo com a lei de Faraday exposta na Equação 2. Essas tensões geram correntes, as quais geram outro campo \vec{H} , porém com polaridade oposta ao campo original criado pelo estator. Como os campos se atraem, o rotor tende a acompanhar o campo do estator, fazendo assim com que seja produzido um conjugado o qual acionará a carga.

$$e_{ind} = -N \frac{d\phi}{dt} \quad (2)$$

Onde,

e_{ind} = Tensão Induzida (V)

N = Número de Espiras

ϕ = Fluxo Magnético (Wb)

Ainda segundo (CHAPMAN, 2005), é o movimento relativo do rotor em relação ao campo magnético \vec{H}_S do estator que produz uma tensão induzida em uma barra do rotor. A velocidade das barras superiores do rotor em relação ao campo magnético é para a direita, desse modo, a tensão induzida nas barras inferiores é para dentro da página. Isso resulta em um fluxo de corrente para fora da página das barras superiores e para dentro da página das barras inferiores. Entretanto, como o rotor é indutivo, a corrente de pico no rotor está atrasada de 90° da tensão de pico do rotor, conforme mostrado na Figura 4. O fluxo de corrente do rotor produz um campo magnético \vec{H}_R . O conjugado induzido é dado por:

$$\tau_{ind} = k \vec{H}_R \times \vec{H}_S \quad (3)$$

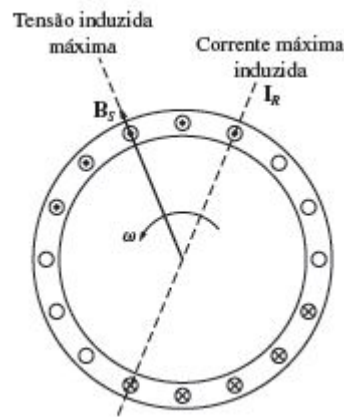
Onde,

τ_{ind} = Torque Induzido (Nm)

\vec{H}_R = Vetor Campo Magnético no Rotor (A/m)

\vec{H}_S = Vetor Campo Magnético no Estator (A/m)

Figura 4 – Corrente e Tensão no Rotor.



Fonte: (CHAPMAN, 2005)

O conjugado resultante é anti-horário. Como o conjugado induzido do rotor é anti-horário, o rotor acelera nesse sentido.

É bom atentar também que se o motor estivesse girando na velocidade síncrona do campo girante, as barras do rotor estariam estacionárias em relação ao campo magnético e não haveria tensão induzida, logo não seria produzido um torque. Tendo isso, é necessário estabelecer um limite de velocidade do rotor, o qual será explicado na próxima seção.

2.3.2 Escorregamento

Como a velocidade do rotor nunca pode ser igual à aquela velocidade síncrona gerada pelo campo girante do estator, pois assim a corrente induzida seria zero e não seria produzido nem fluxo magnético e nem torque, deve ser necessário que exista um escorregamento em velocidade a fim de que se produza um torque. Isso resulta em uma diferença de velocidades produzidas entre a velocidade síncrona do campo magnético girante e a velocidade de "escorregamento", na qual gira o rotor como resultado do torque produzido por interação entre seu campo e o campo magnético girante. Essa diferença de velocidade é chamada de *velocidade de escorregamento* e é normalmente expressa como uma porcentagem da velocidade síncrona.

$$s(\%) = \frac{n_s - n_r}{n_s} \times 100 \quad (4)$$

Onde,

s = Escorregamento

n_s = Velocidade Síncrona (rpm)

n_r = Velocidade do Motor (rpm)

2.3.3 Classe de Isolação

Sendo o motor de indução uma máquina robusta e de construção simples, se não considerar as peças que se desgastam devido ao uso, como escovas e rolamentos, a sua vida útil depende quase que exclusivamente da vida útil do material isolante (WEG, 200-?).

Esse material isolante pode ser afetado por várias condições tais quais: umidade, vibrações, ambientes corrosivos e principalmente a temperatura.

Segundo (WEG, 200-?) a partir das curvas de características dos materiais em função da temperatura, determina-se a sua vida útil, que é reduzida pela metade a cada 8 a 10 graus de operação acima da temperatura nominal da classe.

Para fins de normalização os materiais isolantes foram agrupados em classes, as quais estão definidas por uma temperatura máxima que o material pode suportar sem que seu tempo de vida seja comprometido. As classes de isolamento referentes à ABNT NBR-7094 são expostas na Tabela 1:

Tabela 1 – Classe de Isolação

Classe	A	E	B	F	H
Temperatura(°C)	105	120	130	155	180

Fonte: Adaptado de (WEG, 200-?)

2.3.4 Classe de Elevação

A classe de elevação define a maior elevação e temperatura absoluta que se pode atingir quando a máquina está operando. Normalmente, a máquina possui uma classe de elevação que permite uma temperatura absoluta em operação menor que a classe de isolação, para que se preserve o tempo de vida útil do equipamento. As classes de elevação de temperatura estão de acordo com as normas às quais a máquina será fabricada. As classes de elevação para uma classe de isolação F e temperatura ambiente de 40°C estão expostas na Tabela 2:

Tabela 2 – Classes de Elevação para Classe de Isolação F

Classe	B	F
Elevação(K)	80	105
Temperatura Absoluta(°C)	120	145

Fonte: Adaptado de (WEG, 200-?)

2.3.5 Fator de Serviço

O fator de serviço de uma máquina é o limite de operação dessa máquina em uma potência acima da sua potência nominal, sem que essa operação ultrapasse os limites da isolação térmica da máquina, ou seja, é a máxima sobrecarga que a máquina pode operar continuamente em condições desfavoráveis.

2.3.6 Regime de Serviço

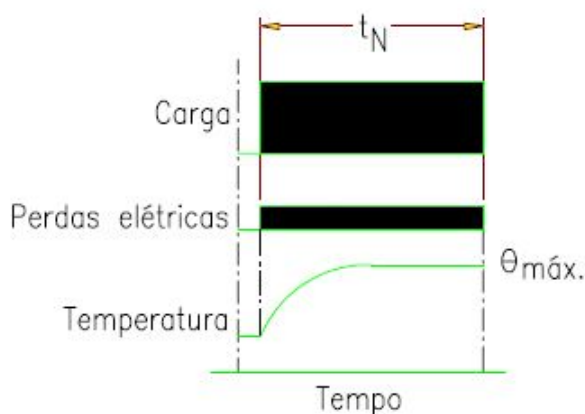
O regime de serviço de uma máquina é o período de operação que a mesma será exposta durante um determinado limite de tempo. Durante esse tempo a máquina pode trabalhar em diversas condições as quais implicam variações de carga ou não. Esse regime está associado com a carga que motor acionará. Atualmente de acordo com a norma IEC 60034-1:2017, existem 10 tipos de ciclos de trabalho os quais podem ser impostos e que são classificados de S1 à S10. A Tabela 3 descreve o comportamento da máquina em cada um desses ciclos e a Figura 5 exhibe o comportamento do ciclo S1 o qual é utilizado em aplicações comuns como bombas, ventiladores e compressores (AGRAWAL, 2001). O regime de serviço S1 será o ciclo utilizado nesse trabalho.

Tabela 3 – Regimes de Serviço pela IEC 60034-1:2017

S1	Regime contínuo
S2	Regime de tempo limitado
S3	Regime intermitente periódico
S4	Regime intermitente periódico com partidas
S5	Regime intermitente periódico com frenagem elétrica
S6	Regime de funcionamento contínuo com carga intermitente
S7	Regime de funcionamento contínuo com frenagem elétrica
S8	Regime de funcionamento contínuo com mudança periódica na relação carga/velocidade
S9	Regime não periódico
S10	Regime com carga constante discreta

Fonte: Adaptado de (AGRAWAL, 2001)

Figura 5 – Regime de Serviço S1 com carga constante.



Fonte: (WEG, 200-?)

2.3.7 Tempo de Rotor Bloqueado

Tempo de rotor bloqueado é o maior tempo que o rotor pode permanecer bloqueado sem comprometer a isolação da máquina, ou seja, é o tempo pelo qual os fabricantes de motores elétricos garantem que a temperatura limite da isolação dos enrolamentos não será ultrapassada, quando estes forem percorridos pela corrente de partida (WEG, 200-?).

2.3.8 Tempo de Aceleração

Tempo de aceleração é o tempo que o rotor leva para acionar a carga desde a rotação zero até a nominal (WEG, 200-?). Para condições de partida, o tempo de rotor bloqueado deve ser maior que o tempo de aceleração, para que não haja um sobreaquecimento nos componentes do motor. O tempo de aceleração pode ser dado pela equação 5:

$$T_a = \frac{\pi n_r}{30} \cdot \frac{J_m + J_c}{T_{motor} - T_{carga}} \quad (5)$$

Onde,

J_m = Inércia do Motor (kgm^2)

J_c = Inércia da Carga (kgm^2)

T_{motor} = Torque do Motor (Nm)

T_{carga} = Torque da Carga (Nm)

2.4 MÉTODOS DE REFRIGERAÇÃO

O sistema de resfriamento é uma parte vital para garantir a operação dos motores. Ao passo que a potência equivalente de um motor aumenta, além de o seu volume ativo aumentar, o sistema de refrigeração também deve ser mais eficiente. Esse trabalho abordará alguns sistemas de refrigeração utilizados em motores de média e alta tensão, inclusive o método IC01 o qual será utilizado no trabalho.

Existem vários sistemas de resfriamento adotados por vários fabricantes, dependendo do tamanho da máquina e das perdas geradas nas diversas partes durante uma operação em plena carga (AGRAWAL, 2001).

Os métodos de refrigeração podem ser auto-ventilados, circuito fechado - não sendo requerido nenhuma fonte externa para aumentar a refrigeração, ou um sistema de ventilação forçada o qual implica em uma fonte externa para trabalhar basicamente como um propulsor do fluido para a troca térmica (AGRAWAL, 2001).

Pela norma IEC, os métodos de refrigeração são designados por códigos de uma maneira que se possa identificar exatamente o tipo de refrigeração utilizada pela máquina. A refrigeração é descrita pelas letras IC, as quais significam International Cooling, sucedidas do código o qual identifica o método de refrigeração.

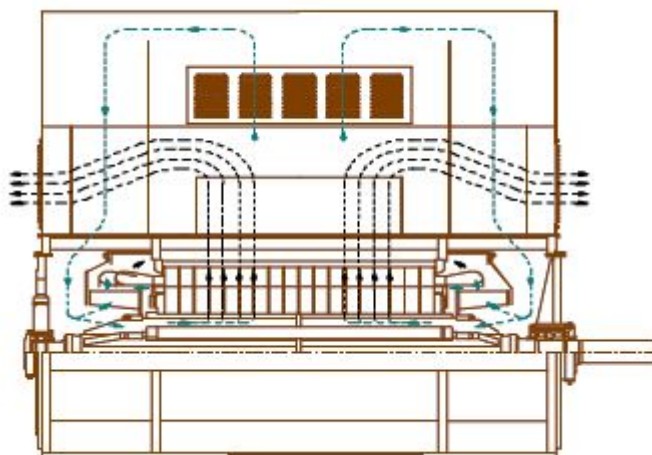
Como exemplo, tem-se IC81W. O primeiro número significa o arranjo da refrigeração, o segundo significa o circuito primário de refrigeração e o terceiro o qual é uma letra, significa o arranjo secundário do circuito de refrigeração.

O motor ainda pode ser do tipo ventilação bilateral ou misto. No sistema bilateral, mais comum a motores com rotação média a alta ou de grande comprimento, existem dois ventiladores internos montados sobre o eixo do motor, normalmente localizados abaixo da cabeça de bobina do rotor. Já no sistema misto, mais comum a motores com rotação baixa ou de comprimento curto, existe apenas um ventilador interno, o qual normalmente está montado no anel de prensar do rotor.

1. IC01 (Auto-ventilado) Bilateral

Nesse sistema conforme a Figura 6, o motor normalmente possui dois ventiladores internos acoplados ao eixo, o qual ventilam o ar interno para a parte externa da máquina, fazendo com que o ar passe pelo pacote de chapas até chegar à caixa de ventilação onde existirá a troca térmica com o ar externo.

Figura 6 – Ventilação IC01 Biletaral.

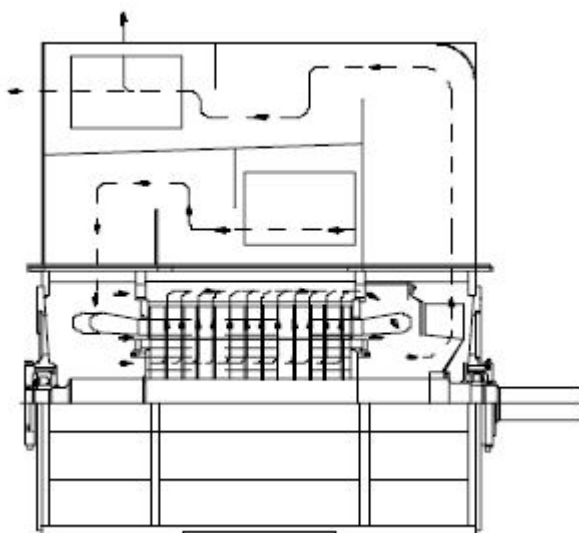


Fonte: (WEG, 200-?)

2. IC01 (Auto-ventilado) Misto

Nesse sistema conforme a Figura 7, o motor normalmente possui um ventilador interno acoplado ao eixo, o qual ventila o ar que está externo à máquina para a parte interna, fazendo com que haja a troca de calor.

Figura 7 – Ventilação IC01 Misto.



Fonte: (WEG, 200-?)

2.5 DIMENSIONAMENTO DA MÁQUINA

2.5.1 Conceitos Básicos

Para dimensionar uma máquina, alguns fatores básicos devem ser levados em consideração pelo projetista: a tensão de alimentação, a potência, a frequência, o número de fases e a rotação. Com isso em mente, define-se também a conexão: delta ou estrela, o tipo de bobinagem, o número de polos e de ranhuras, bem como as dimensões da ranhura e também os fatores de bobinagem. Como consequência, ter-se-á uma máquina com determinado fator de potência, rendimento e torques de partida e máximos.

Segundo (RUNCOS, 2018), a máquina elétrica deve atender algumas características que são as expectativas do ponto de vista do cliente. As características de desempenho tais como: rendimento, torque máximo e de partida, fator de potência, dependem basicamente do projeto eletromagnético da máquina. O bom desempenho da máquina começa com a escolha de bons materiais, principalmente os condutores, os dielétricos e os magnéticos e obviamente de um bom projeto.

Ainda segundo (RUNCOS, 2018), no dimensionamento do volume ativo de uma máquina elétrica são necessários, como dado de entrada para o projeto, três parâmetros básicos:

1. A densidade de corrente elétrica admissível nos condutores do estator e do rotor em A/mm^2
2. O módulo da amplitude da indução magnética admissível nos diversos pontos do circuito magnético em Tesla. A indução no entreferro, na coroa e no dente do circuito magnético do estator, na coroa e no dente do circuito magnético do rotor.
3. A constante de aproveitamento do volume ativo C_{AVA} da máquina expressa em $W \cdot s/m^3$. Essa constante representa a densidade volumétrica de energia da máquina, conhecida na literatura como fator de Esson da máquina.

A constante de aproveitamento do volume ativo deve ser um dado de entrada no projeto de uma máquina. Ela depende do sistema de refrigeração, pois quanto melhor o sistema, mais viável será alocar mais energia em um volume menor, ou seja para cada classe de isolamento, tem-se uma constante diferente. Além disso, esse volume ativo dependerá dos dados nominais do motor e também das condições de aplicação (RUNCOS, 2018).

2.5.2 A Constante de Aproveitamento de Volume Ativo da Máquina

O conceito da constante de aproveitamento de volume ativo de uma máquina tem por base a idéia da relação entre a energia que pode ser alocada dentro de um

certo volume de máquina. Essa constante, relaciona quatro parâmetros da máquina: a potência, a rotação síncrona, o diâmetro interno do estator e o pacote de chapas do estator. Algumas literaturas também trazem o entreferro no dimensionamento com o princípio de que a conversão eletromecânica da potência em torque acontece no entreferro.

Como essa constante relaciona a energia a um dado volume, ela deve ser sempre maximizada, para que se possa fazer o aproveitamento máximo do volume de uma máquina.

Essa constante varia para os diferentes tipos de refrigeração existentes, dentre os quais, alguns foram apresentados no item 2.4. A variação da constante vem da ideia de que quanto melhor o sistema de ventilação da máquina, maior é a capacidade dessa de remover as perdas da máquina.

Outro fator que influencia nessa constante é a classe de isolamento da máquina, pois quanto maior for a classe de isolamento, maior será a capacidade de se alocar uma maior energia dentro de um certo volume de uma máquina sem que isso acarrete na diminuição da sua vida útil.

Segundo (RUNCOS, 2018) o fator de aproveitamento ativo da máquina é definido por:

$$C = \frac{\pi^2 \cdot k_{Forma} \cdot B_{Entreferro} \cdot FP \cdot J_{Acond1}}{1 - k_{Ufase}} \quad (6)$$

Onde,

C = Constante de Carregamento do Volume Ativo ($W \cdot s/m^3$)

k_{Forma} = Constante Harmônica

$B_{Entreferro}$ = Indução Magnética no Entreferro (T)

FP = Fator de Potência

J_{Acond1} = Densidade de Corrente no Estator (A/m^2)

k_{Ufase} = Constante da Máquina

Segundo (RUNCOS, 2018) o fator k_{Ufase} varia de 0 até 0,05 quando é motor e de -0,05 até 0 quando é gerador, já o k_{Forma} é aproximadamente 1,11.

Outra forma de definir o fator C da máquina é dado por (RUNCOS, 2018) por:

$$C = \frac{P_{saída}}{L_{Ferro1} \cdot n_s \cdot (D_1 - \delta)^2} \quad (7)$$

Onde,

$P_{saída}$ = Potência de Saída (W)

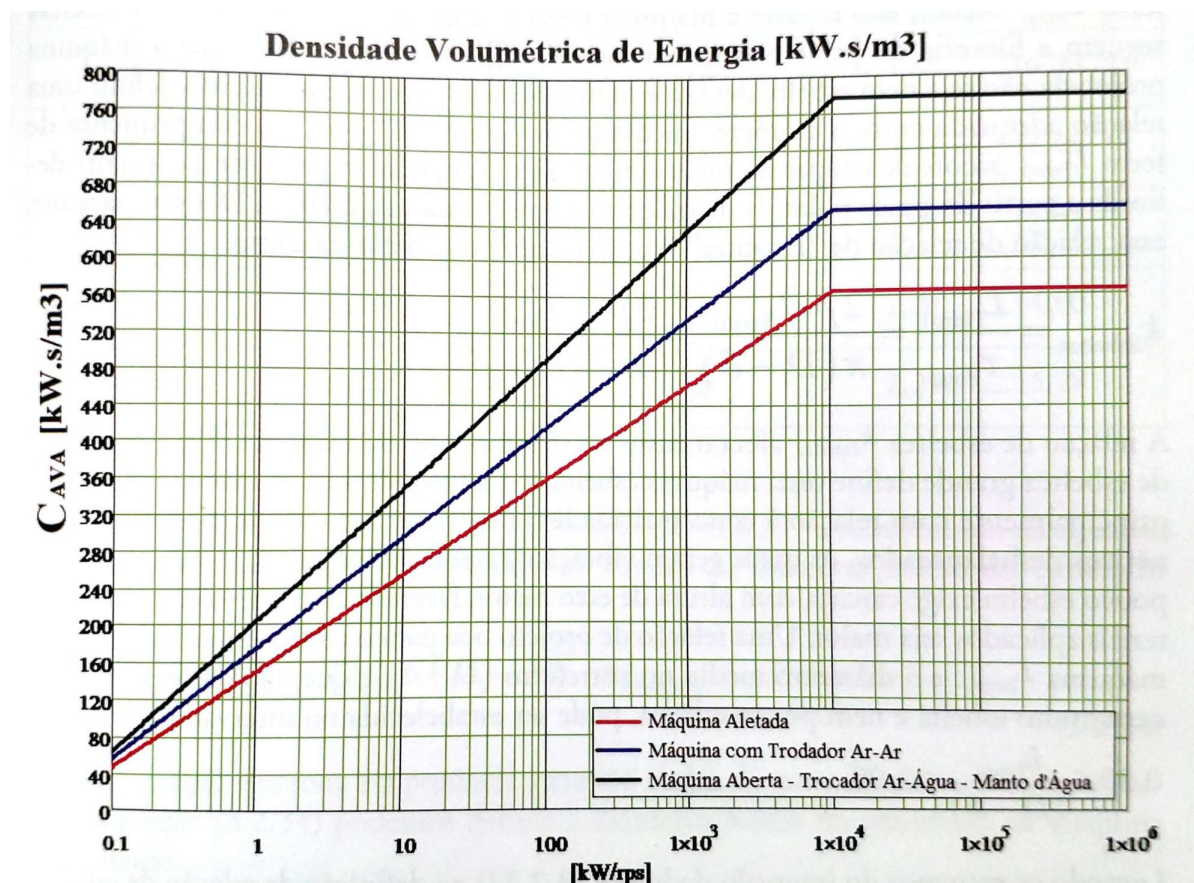
L_{Ferro1} = Comprimento do Pacote de Chapas do Estator(m)

D_1 = Diâmetro Interno do Estator (m)

δ = Entreferro (m)

Onde é possível também ver a relação desse fator com a potência ativa P , a rotação síncrona n_s , comprimento do pacote de chapas do estator L_{Ferro1} , o diâmetro interno do estator D_1 e o entreferro δ . Na Figura 8 é possível ver como esse fator se relaciona com outro fator o kW/rps da máquina que em outras palavras é o torque.

Figura 8 – Fator C pelo fator kW/rps.



Fonte: (RUNCOS, 2018)

Ainda existem outras abordagens similares para esse mesmo fator, segundo (ION; SYED, 2001), o fator de aproveitamento ativo é dado de acordo com a Equação 8.

$$C = k_{Forma} \cdot \alpha_i \cdot B_{Entreferro} \cdot k_W \cdot J_{Acond1} \cdot \pi^2 \quad (8)$$

Onde,

α_i = Fator de Indução Magnética no Dente

k_W = Fator de Enrolamento da Bobinagem

Existe também outra forma de se apresentar a constante de aproveitamento C segundo (ION; SYED, 2001), onde é possível relacionar ela também com a potência, porém nesse caso a aparente, o diâmetro e o pacote de chapas do estator e também

a rotação síncrona.

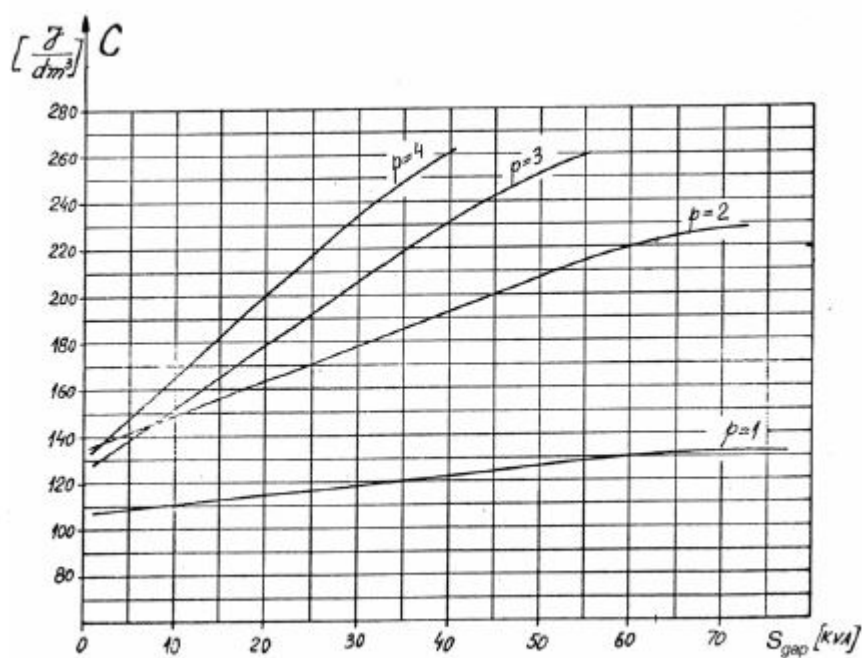
$$C = \frac{60S_{gap}}{D_1^2 L_{Ferro1} n_s} \quad (9)$$

Onde,

S_{gap} = Potência Aparente no Entreferro (VA)

Na Figura 9 é possível ver também uma curva parecida com a da Figura 8, porém relacionando a constante C expressa em Joule por decâmetro cúbico no eixo das ordenadas a potência aparente da máquina no eixo das abcissas. Como essa abordagem não indica a rotação no eixo das abcissas, é possível ver a diferença no fator de carregamento de volume ativo pelas curvas que mostram que a constante de aproveitamento C tende a ser diferente para pares de polos diferentes. Máquinas com mais pares de polos tendem a ter uma constante maior do que máquinas com menos pares de polos. O motivo é que para uma mesma potência, máquinas de polos maiores possuem mais torque do que máquinas de polos menores.

Figura 9 – Fator C pela potência aparente da máquina.



Fonte: (ION; SYED, 2001)

3 DOE - DESIGN OF EXPERIMENTS

3.1 DEFINIÇÃO

Design of Experiments é um método sistemático para determinar a relação entre fatores que influenciam em um processo, resultado de um processo ou um produto. Em outras palavras, é um método para descobrir as relações de causa e efeito entre variáveis independentes e uma variável dependente de interesse. Esse tipo de informação é normalmente requerido quando se deseja controlar as entradas de um processo para otimizar uma saída (MONTGOMERY, 2017).

O DOE é um método para se determinar e tomar conhecimento de como algo ocorreu, ocorre ou possa vir a ocorrer em um certo produto ou processo de um sistema (WERNKE, 2011).

Um bom exemplo de aplicação desse método é o desenvolvimento de um novo processo. A maioria dos processos possuem variáveis controláveis, como temperatura, pressão, dentre outras. Essas variáveis controláveis podem ser estudadas por meio de um experimento, para poder caracterizar a influência que cada uma possui em uma variável de saída a qual é dependente (MONTGOMERY; RUNGER, 2007).

Ainda segundo (MONTGOMERY; RUNGER, 2007), métodos de Design of Experiments são úteis em atividades de projeto de engenharia, nos quais novos produtos são desenvolvidos e os já existentes são melhorados. Algumas das aplicações típicas desses métodos em indústrias são (BONANNI, 2005):

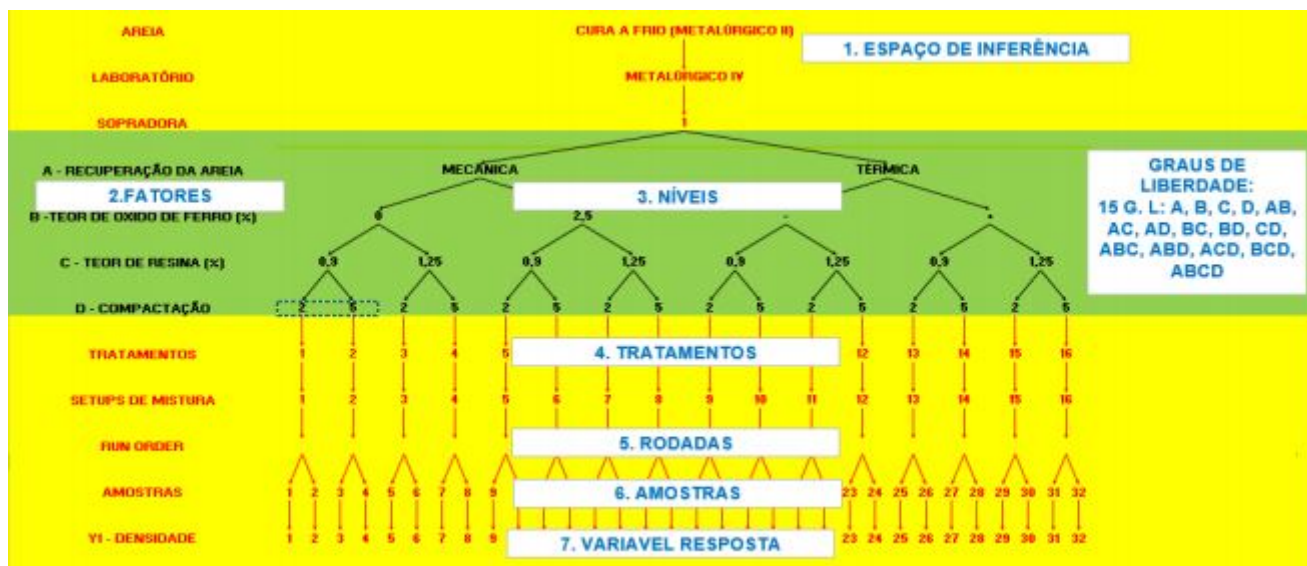
- Reduzir do tempo de projeto e desenvolvimento de produto e processo;
- Estudar o comportamento de um processo sobre uma ampla gama de condições operacionais;
- Entender o processo em estudo e assim melhorar seu desempenho;
- Aumentar a produtividade do processo reduzindo retrabalho, perdas, etc;
- Melhorar o rendimento e estabilidade de um processo industrial em andamento;
- Fazer produtos insensíveis à variações ambientais, tais como umidade relativa, vibração, temperatura, etc;
- Estudar a relação entre as variáveis independentes do processo e sua saída ou resposta.

3.2 TERMOS VINCULADOS AO DOE

Em um planejamento de DOE - Design of Experiments, alguns termos são utilizados na formação do processo experimental. Tendo isso em mente, apresenta-se

após a Figura 10, alguns desses termos, os quais serão de importância para esse trabalho. A Figura 10 esboça um exemplo dos termos numa FRD.

Figura 10 – Exemplo das terminologias em um FRD.



Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?)

1. **Espaço de inferência do experimento:** É onde os resultados coletados são aplicáveis, ou seja, são as condições de contorno do experimento.
2. **Fatores:** São as variáveis independentes, as quais o autor do experimento deve manipular de forma a tentar atingir o objetivo do projeto. Os fatores são divididos em discretos ou nominais e numéricos ou contínuos.
3. **Níveis:** Os níveis são os valores pré-estabelecidos para os fatores, os quais terão impacto no estudo do experimento. Em um processo de DOE, podem existir 2 ou 3 níveis por fator. Caso o fator apresente 2 níveis, os níveis serão divididos em (-1) e $(+1)$ e caso haja 3 níveis, esses serão divididos em (-1) , (0) e $(+1)$.
4. **Tratamentos:** Os tratamentos são as diferentes combinações dos níveis dos fatores. Caso o experimento tenha 4 fatores, ele terá 16 rodadas e 16 tratamentos. Cada um dos tratamentos representa uma combinação única entre os níveis e os fatores analisados no experimento.
5. **Rodada:** A rodada representa o número de tentativas de realizar um determinado experimento.
6. **Amostra:** É a unidade relacionada aos dados coletados nos experimentos.
7. **Variável Resposta:** É a variável do propósito do estudo, ou seja, a variável dependente dos fatores e dos seus respectivos níveis.

8. **Efeito de um Fator:** O efeito de um fator é a variação da variável resposta (variável dependente) em relação à variação de um ou mais fatores em relação aos seus diferentes níveis.
9. **Interação entre Fatores:** Variação da variável de um fator em função de um outro fator.
10. **Matriz Experimental:** É a matriz onde estão especificadas todas as combinações dos fatores e níveis do experimento (RAMM, 2007).

3.3 FORMAS DE EXECUÇÃO DO DOE

Os experimentos fatoriais podem ser do tipo completos, os chamados Full Factorial Designs, também conhecidos como os modelos 2^k , ou fracionários, chamados de Fractional Factorial Designs também conhecidos como os modelos 2^{k-p} .

3.3.1 Experimentos com Fatoriais Completos 2^k

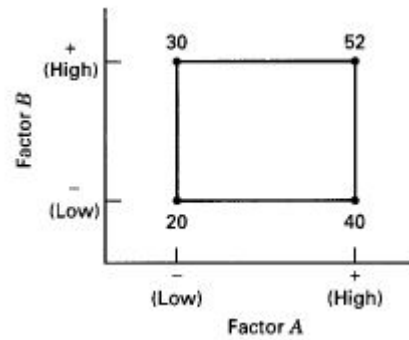
Planejamentos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos com vários fatores os quais é necessário estudar o efeito de conjunto desses em relação a uma variável resposta. O experimento é de k fatores com apenas dois níveis entre cada fator (MONTGOMERY; RUNGER, 2007).

Segundo (GALDÁMEZ, 2002), um planejamento fatorial completo é indicado na fase final do experimento, onde já se conhecem os principais fatores que influenciam na variável resposta. Já um planejamento fatorial fracionado é utilizado com o objetivo de conhecer os efeitos de duas ou mais variáveis, para que seja possível definir os fatores de controle e avaliar seus efeitos sobre a variável resposta adotada, logo é utilizado na fase inicial do projeto.

Os experimentos fatoriais completos são aqueles em que são testadas todas as combinações possíveis entre os fatores dentre os dois níveis possíveis de cada um deles, dentre as vantagens desse tipo de experimento é possível destacar o aumento no número de rodadas do experimento, o que faz com que a análise seja mais precisa, já que alguns resultados não são desconsiderados.

Para ilustrar essa técnica, considere-se um experimento apresentado por (MONTGOMERY, 2017) que investigará o efeito de dois fatores, A e B arbitrários, cada um deles com dois níveis + e - 1. Essa abordagem resultaria em um experimento 2^2 , onde seriam feitos 4 tratamentos por rodada para investigar uma variável resposta Y arbitrária. Esse experimento é apresentado na Figura 11 e sua matriz experimental é apresentada na Figura 12.

Figura 11 – Experimento com dois fatores com a variável resposta Y mostrada nos cantos.



Fonte: (MONTGOMERY, 2017)

Figura 12 – Matriz Experimental.

Tratamento	A	B	AB	Y
1	-1	-1	+1	Y_1
2	-1	+1	-1	Y_2
3	+1	-1	-1	Y_3
4	+1	+1	+1	Y_4

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?)

Segundo (MONTGOMERY, 2017) o efeito de A e B pode ser medido através da comparação entre as médias dos valores de Y obtidos em cada nível, assim como seguem as Equações (10) a (13):

$$\text{Efeito de A} = \text{mean}[A_{+1}] - \text{mean}[A_{-1}] = \frac{Y_3 + Y_4}{2} - \frac{Y_1 + Y_2}{2} \quad (10)$$

$$\text{Efeito de A} = \frac{40 + 52}{2} - \frac{20 + 30}{2} = 21 \quad (11)$$

$$\text{Efeito de B} = \text{mean}[B_{+1}] - \text{mean}[B_{-1}] = \frac{Y_2 + Y_4}{2} - \frac{Y_1 + Y_3}{2} \quad (12)$$

$$\text{Efeito de B} = \frac{30 + 52}{2} - \frac{20 + 40}{2} = 11 \quad (13)$$

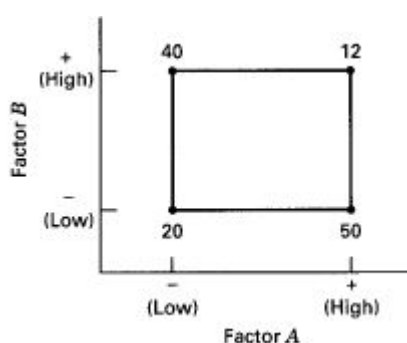
O efeito de AB corresponde à interação entre os fatores e indica a dependência do efeito de B em função do Efeito de A e vice-versa. A Equação 14 mostra que para o caso abordado não há muita interação entre os fatores, logo quando A muda de um nível mais baixo para um mais alto com B em um nível fixo, a variação é muito pequena na variável resposta Y.

$$\text{Efeito de AB} = \text{mean}[AB_{+1}] - \text{mean}[AB_{-1}] \quad (14)$$

$$\text{Efeito de AB} = \frac{Y_1 + Y_4}{2} - \frac{Y_2 + Y_3}{2} = \frac{20 + 52}{2} - \frac{30 + 40}{2} = 1 \quad (15)$$

Isso significa que aumentando o fator A do nível - 1 para o nível + 1 impacta a média da variável Y em 21 unidades. Para B esse impacto é de 11 unidades. Segundo (MONTGOMERY, 2017), em alguns experimentos pode-se perceber que a diferença da resposta entre os níveis de um fator não é a mesma para todos os níveis de outros fatores e quando isso acontece, tem-se uma interação entre esses fatores. Como exemplo, será verificado a resposta do experimento mostrado na Figura 13.

Figura 13 – Experimento com interação entre os fatores.



Fonte: (MONTGOMERY, 2017)

Como pode ser visto na Figura 13, o efeito de A depende do nível de B, já que a resposta tem sentidos opostos, caso seja comparado o nível baixo de B, ou seja, B_- , em relação ao nível alto, ou seja, B_+ . Abaixo é possível ver isso de forma mais clara:

Para o nível baixo:

$$\text{Efeito de A} = 50 - 20 = 30 \quad (16)$$

Para o nível alto:

$$\text{Efeito de A} = 12 - 40 = -28 \quad (17)$$

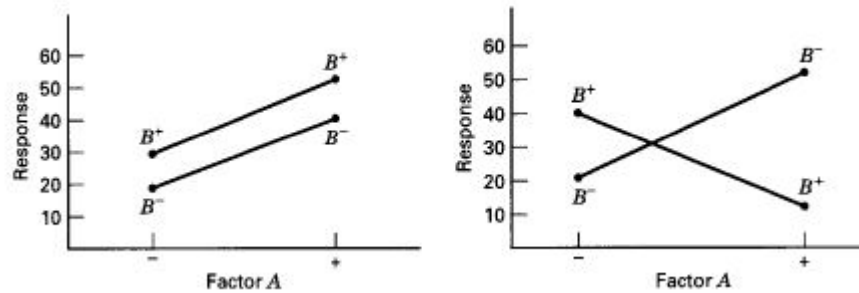
Com isso, a magnitude do efeito de interação AB é a média da diferença desses dois efeitos em A. A Equação (18) confirma a forte interação entre esses fatores.

$$\text{Efeito de AB} = \frac{-28 - 30}{2} = -29 \quad (18)$$

Segundo (MONTGOMERY, 2017) essa interação pode ser visualizada graficamente. Na Figura 14, é possível ver à esquerda o gráfico da variação do Fator A em relação ao Fator B em seus diferentes níveis e a variável resposta Y. Note, que quando o Fator A vai do nível menor para o maior, o Fator B em seus dois níveis cresce da mesma forma, o que acarreta em um paralelismo entre as curvas, indicando uma falta de interação entre esses fatores. Já na figura à direita, é possível notar que as curvas

de B são diferentes e inclusive se cruzam para diferentes níveis do fator A, o que mostra que os dois fatores possuem uma interação grande.

Figura 14 – À esquerda um resultado de uma interação baixa entre os fatores e à direita uma interação alta.



Fonte: (MONTGOMERY, 2017)

• Modelo por Regressão Linear

Segundo (MONTGOMERY, 2017), o modelo fatorial pode ser expresso em termos de uma regressão linear, tal qual:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \epsilon \quad (19)$$

Onde Y é a resposta, e os β 's são os parâmetros a serem determinados pelos principais efeitos de A e B. Já os x's representam os fatores. Sendo x_1 o fator A, x_2 o fator B e $x_1 x_2$ a interação entre os fatores ou seja o fator AB. Já ϵ representa um erro aleatório. O método de cálculos dos β 's será exibido nas Equações (20) a (23):

$$\beta_1 = \frac{\text{Efeito de A}}{2} \quad (20)$$

$$\beta_2 = \frac{\text{Efeito de B}}{2} \quad (21)$$

$$\beta_{12} = \frac{\text{Efeito de AB}}{2} \quad (22)$$

$$\beta_0 = \frac{Y_1 + Y_2 + Y_3 + Y_4}{4} \quad (23)$$

3.3.2 Experimentos Fatoriais Fracionários 2^{k-p}

Experimentos Fatoriais Fracionários estão entre os tipos de experimentos mais utilizados para melhorar um processo ou um produto e avaliar o desempenho desse processo em relação aos parâmetros de entrada (MONTGOMERY; RUNGER, 2007).

Em um experimento com fatoriais 2^k , conforme o número de variáveis cresce, o número de rodadas requerida para realizar o experimento cresce de forma exponencial, o que faz com que se limite um dos recursos mais preciosos para a realização de experimentos, o tempo (MONTGOMERY; RUNGER, 2007). Com essa abordagem, experimentos fatoriais fracionários aparecem como uma excelente alternativa para que se possa haver um equilíbrio entre tempo e resultado.

Segundo (SILVA, 2014), em geral, um planejamento fatorial completo 2^k que pode ser reduzido em uma fração $\frac{1}{2^p}$ é chamado de planejamento fatorial fracionado 2^{k-p} . A Tabela 4 exibe o número de tratamentos dos fatoriais para diferentes valores de p.

Tabela 4 – Número de tratamentos para k fatores com dois níveis.

k	Fatorial 2^k	Fatorial 2^{k-1}	Fatorial 2^{k-2}	Fatorial 2^{k-3}	Fatorial 2^{k-4}
2	4	2	1	-	-
3	8	4	2	1	-
4	16	8	4	2	1
5	32	16	8	4	2
6	64	32	16	8	4
7	128	64	32	16	8
8	256	128	64	32	16
9	512	256	128	64	32
10	1024	512	256	128	64

Fonte: (RIBEIRO JÚNIOR, 2012)

Os experimentos fatoriais baseiam-se em três idéias chaves (MONTGOMERY, 2017):

1. **O princípio da esparcidade dos efeitos:** Quando existem diversas variáveis, a probabilidade maior é que o sistema e/ou o processo sejam influenciados em sua maior parcela pelos efeitos principais e as interações de ordem baixa;
2. **A propriedade da projeção:** Experimentos fracionários podem ser transformados em experimentos mais robustos dentro de uma parcela dos fatores significantes;
3. **Experimentação sequencial:** É possível combinar as rodadas de dois ou mais fatoriais fracionários para reunir sequencialmente um experimento maior o qual possa estimar o fator dos efeitos e às interações de interesse.

3.3.3 Resolução de um Experimento

A resolução de um experimento se refere à quantidade de informações que podem ser obtidas a partir dos testes. Segundo (MONTGOMERY; RUNGER, 2007),

o conceito de resolução de um experimento é útil para categorizá-los de acordo com os padrões de associação que eles produzem. Experimentos podem ser de resolução III, IV e V. Experimentos de III e IV ordem são mais úteis para seleção de fatores (MONTGOMERY; RUNGER, 2007).

1. **Resolução III:** É um experimento, onde os efeitos de segunda ordem, entre dois fatores, são confundidos com os fatores principais (GALDÁMEZ, 2002);
2. **Resolução IV:** São mais comuns na fase exploratória e é um experimento onde efeitos de terceira ordem são confundidos com os de ordem principal e os de segunda ordem são confundidos entre si (GALDÁMEZ, 2002);
3. **Resolução V:** É um experimento onde fatores de ordem principal são confundidos com interações de quarta ordem e os de segunda ordem se confundem com os de terceira ordem (GALDÁMEZ, 2002).

Na Figura 15 é possível verificar a resolução de acordo com o número de rodadas e fatores.

Figura 15 – Resolução de experimentos fatoriais.

	Factors													
Runs	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
4	Full	III												
8		Full	IV	III	III	III								
16			Full	V	IV	IV	IV	III	III	III	III	III	III	III
32				Full	VI	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
64					Full	VII	V	IV	IV	IV	IV	IV	IV	IV
128						Full	VIII	VI	V	V	IV	IV	IV	IV

Fonte: (RAMM, 2007)

3.4 MÉTODO DE LENTH

O método de Lenth avalia através do cálculo das médias dos valores das respostas em cada um dos níveis testados no experimento, os graus de liberdade que possuem alguma significância na variável resposta. Esse método utiliza como base o princípio da esparsidade, que diz que apenas alguns graus de liberdade possuem efeito significativo na variável de interesse num experimento (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?). Os resultados desse método podem ser observados em dois gráficos, o Pareto e de Probabilidade Normal (SILVA, 2014).

Supondo-se que existam m contrastes de interesse, ou seja, m efeitos relacionados aos graus de liberdade do experimento da forma c_1, c_2, \dots, c_m . Se o planejamento é um fatorial 2^k não replicado, estes contrastes correspondem a $m = 2^k - 1$ estimativas

de efeitos para os fatores e interações experimentais. A base do Método de Lenth é a estimativa da variância de um contraste referente à menor estimativa de contraste do experimento, em valor absoluto (RAMM, 2007).

A primeira etapa do procedimento é a determinação do PSE (Pseudo Standard Error), que posteriormente será utilizado na análise de significância estatística dos efeitos dos fatores (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?). O PSE é utilizado para julgar a significância dos contrastes e também de estimar a variância desses quando não existem muitos efeitos significativos (RAMM, 2007). Para determinar o PSE, tem-se:

$$PSE = 1,5 \times mediana|C_j| \quad (24)$$

Para os efeitos C_j onde j é o número de graus de liberdade do experimento, considerando apenas os efeitos que forem menores que $2,5 \cdot S_o$, onde:

$$S_o = 1,5 \times mediana|C_j| \quad (25)$$

Um contraste individual pode ser comparado com a Margem de Erro (ME), definida por (RAMM, 2007):

$$ME = t_{0,975;d} \times PSE \quad (26)$$

Já constrastes múltiplos podem ser comparados com a Margem de Erro Simultânea (SME), a qual pode ser calculada por:

$$SME = t_{\gamma;d} \times PSE \quad (27)$$

Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?) os valores de ME e SME são utilizados como referência nos gráficos de efeitos dos fatores estatisticamente positivos, pois os fatores que possuem o "estimate" maior que SME são considerados estatisticamente significativos e quando o fator está entre ME e SME existe uma probabilidade de este fator ser significativo. Já os valores de "t" se referem aos valores tabelados da distribuição t-Student. O valor "d" é obtido dividindo o número de graus de liberdade por 3. Os valores de γ são obtidos através da Equação (28):

$$\gamma = \frac{(1 + 0,95^{1/GL})}{2} \quad (28)$$

$$d = \frac{GL}{3} \quad (29)$$

A Tabela 5 mostra alguns valores dessas variáveis, para os experimentos mais comuns de ser realizados.

Tabela 5 – Valores padrões para as variáveis $t_{0,975;d}$ e $t_{\gamma;d}$ em função dos GL.

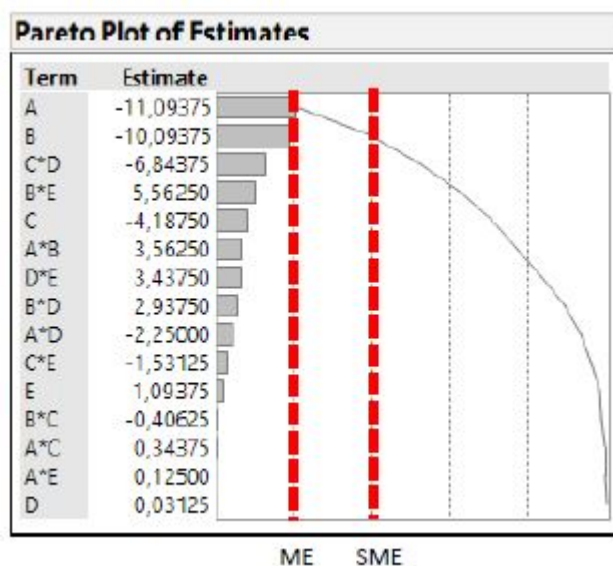
m	$t_{0,975;d}$	$t_{\gamma;d}$
7	3.76	9.01
15	2.57	5.22
31	2.22	4.22
63	2.08	3.91
127	2.02	3.84
255	1.99	3.89

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

• Gráfico de Pareto

O gráfico de Pareto permite detectar um fator e os efeitos de interações que se mostram mais importantes para o processo ou para a otimização do estudo do experimento. Ele mostra os valores absolutos dos efeitos e desenha a linha de referência no gráfico. Qualquer efeito que tenha passado dessa linha de referência ou seja o SME, é um efeito potencialmente significativo para a variável resposta. A Figura 16 mostra um exemplo do gráfico de Pareto.

Figura 16 – Gráfico de Pareto com a linha de corte SME e ME.



Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

• Gráfico de Probabilidade Normal

O Gráfico de Probabilidade Normal faz uma plotagem dos parâmetros dos fatores principais e as interações entre eles contra uma probabilidade cumulativa. Fatores principais e as interações que são inativas, ou seja, não possuem significância tendem a ficar perto da curva reta enquanto que fatores principais e

interações que possuem significância tendem a ficar afastados dessa curva (ANTONY, 2014). Ainda segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?), os gráficos de probabilidade normal são elaborados relacionando os efeitos dos graus de liberdade contra os quantis normais desses graus de liberdade, e comparando os pontos com uma reta definida pelo PSE - Pseudo Standard Error. O exemplo mostrado na Tabela 9 mostra como os quantis normais são calculados num experimento com 8 rodadas não-replicado, onde os "estimates" geram um PSE de 0,24375.

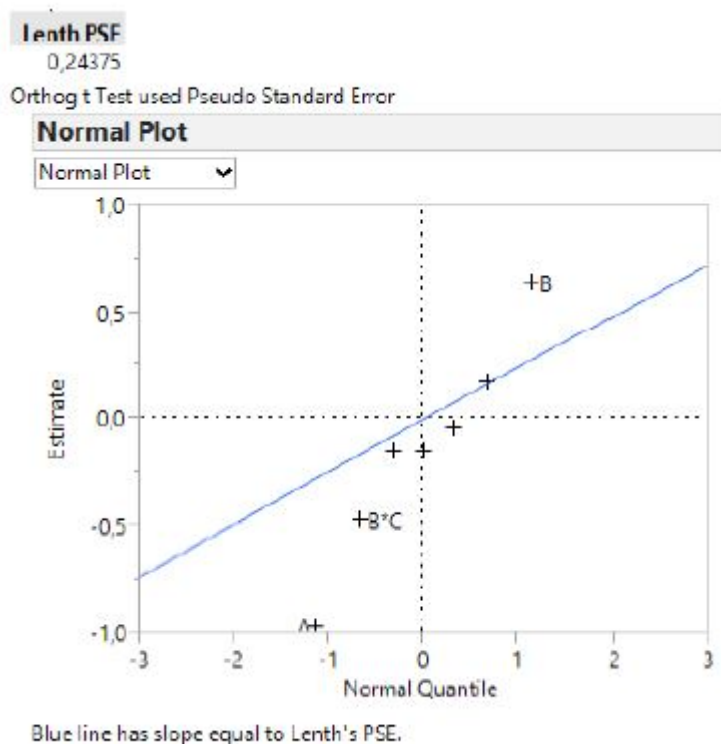
Tabela 6 – Exemplo de cálculo dos quantis.

GL	Probabilidade [1/GL]	Inverso da probabilidade normal padrão	Estimates
1	0,142857143	-1,067570524	-0,96625
2	0,285714286	-0,565948822	-0,46625
3	0,428571429	-0,18001237	-0,14875
-	0,5	0	-0,14875
4	0,571428571	0,18001237	-0,04125
5	0,714285714	0,565948822	0,17625
6	0,857142857	1,067570524	0,65125

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?)

Um exemplo de um Gráfico de Probabilidade Normal é mostrado na Figura 17, onde os estimates estão plotados no eixo y e os quantis normais no eixo x. A reta PSE deve passar por zero e pelo estimate quando o normal quantil é igual a 1 (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?).

Figura 17 – Gráfico de Probabilidade Normal.



Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

3.5 PLANEJAMENTO DE DOE'S

A validação das conclusões tomadas a partir de um Design of Experiments depende em grande parte do seu planejamento. Inúmeros erros e principalmente alarmes falsos e negligências pela falta de um bom planejamento podem acontecer e como consequência gerar uma desistência do método.

Para reduzir a probabilidade de erro, deve seguir as seguintes etapas:

1. Definição dos objetivos e das métricas;
2. Seleção dos fatores e dos níveis;
3. Hipóteses, Teorias e Previsões;
4. Definição do espaço de inferência e da quantidade de tratamentos;
5. Definição da estratégia de tratamento dos ruídos experimentais;
6. Elaboração do FRD - Factor Relationship Diagram;
7. Preenchimento do formulário padrão para DOE;

3.5.1 Definição dos Objetivos e das Métricas

A definição dos objetivos corresponde à determinação da variável ou das variáveis respostas Y 's, ou seja, aquilo que se deseja estudar em função de outros parâmetros (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?).

3.5.2 Seleção dos Fatores e dos Níveis

Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?), DOE's são experimentos onde diversas combinações de fatores são testadas a fim de se obter uma expressão, no formato $Y = f(x) + e$, que reproduz uma métrica Y em função de algumas variáveis independentes significativas (x 's), mais uma parcela dedicada às variáveis não significativas, chamadas de "erro" (e). Logo, a seleção dos fatores deve se basear em critérios lógicos, os quais estão relacionados à fontes de informações a partir dos quais os fatores podem ser identificados. Os tipos de fatores que podem entrar em um DOE e a quantidade depende da fase do projeto.

A seleção dos níveis é tão crítica quanto a dos fatores. Geralmente apenas dois níveis são utilizados, por questão da quantidade de recursos e tempo disponíveis. Um ponto importante aqui é evitar também um espaçamento excessivo, o qual pode inflacionar a variação gerada pelo experimento ou expor o DOE a não-linearidades (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?).

3.5.3 Hipóteses, Teorias e Previsões

Em um experimento planejado, deve-se levantar as questões pertinentes. A definição dos fatores do DOE deve partir de uma teoria ou de uma hipótese relacionada ao fenômeno que estabelece a causalidade entre os fatores e as métricas. Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?) a hipótese no método científico é uma suposição que tem por base a análise de percepção sobre o objeto a ser estudado, podendo assim ser comprovada ou refutada ao longo de uma linha de tempo. Em um DOE uma hipótese tem importância no sentido da expectativa acerca do experimento.

A teoria é tudo aquilo que um dia já foi uma hipótese e já foi comprovada como verdade absoluta até o momento e para permanecer sendo teoria, essa nunca deve ser contrariada. A previsão é aquilo que se espera em relação a variável resposta (Y) em relação à mudança de nível de um fator (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?). Caso uma hipótese, teoria ou previsão seja invalidada, essa ocorrência deve ser documentada como fonte de informação para futuros experimentos.

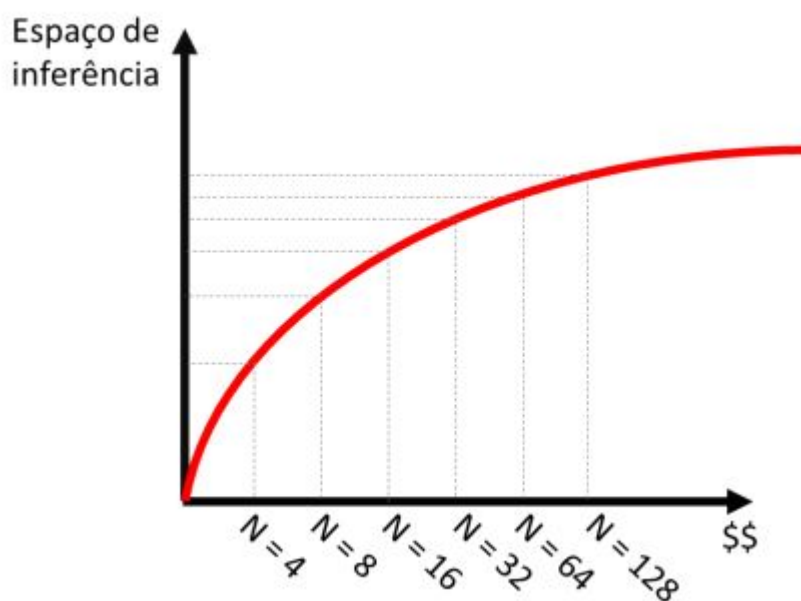
3.5.4 Definição do Espaço de Inferência e a Quantidade de Tratamentos

O espaço de inferência é onde os dados coletados são aplicáveis. Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?) o espaço é definido pelos fatores críticos

mantidos constantes durante um experimento, pelos níveis de cada fator e pela forma que o ruído é tratado.

Já a definição da quantidade de tratamentos depende única e exclusivamente da questão custo-benefício do experimento e da abrangência que se deseja obter. O custo benefício de um experimento não é uma relação linear segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?) e atinge um ponto ótimo em 16 tratamentos. A Figura 18 mostra a relação do custo em função do número de tratamentos pelo custo.

Figura 18 – Espaço de inferência x custo em função do número de tratamentos.

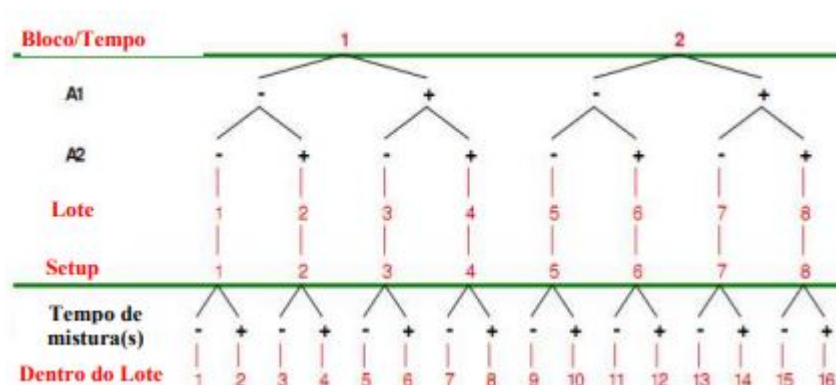


Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT, 200-?)

3.5.5 Elaboração do FRD - Factor Relationship Diagram

O FRD é uma amostragem gráfica de um plano experimental usado para examinar a estratégia experimental antes de realmente se executar o DOE. Este gráfico é uma ferramenta poderosa que permite ao investigador entender se existem ou não restrições na randomização e que orienta o desenvolvimento de perguntas relacionadas às condições nas quais o experimento será conduzido (RAMM, 2007). A Figura 19 mostra um exemplo de um FRD.

Figura 19 – Uma exemplificação de um FRD.



Fonte: (WERNKE, 2011)

As regiões em vermelho são os fatores não manipulados durante o experimento, já as linhas horizontais de cor verde se referem à divisão do material experimental e são definidas como uma LOR - Line of Restriction (RAMM, 2007).

Ainda segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?), um FRD deve conter 5 componentes fundamentais:

1. **Estrutura do experimento:** São os fatores e níveis de um DOE.
2. **Estrutura da unidade:** É aquela que documenta o que acontecerá no experimento, menos a manipulação dos fatores. Exemplos seriam fontes de variação mantidas constantes, estratégias para ruídos, ordem de realização das medições e as variáveis respostas.
3. **Linhas de Restrição:** Restrições de tempo e de orçamentos são comuns num experimento e tais restrições oferecem limitações quanto às possibilidades de randomização das rodadas.
4. **Descrição de um experimento em forma de notação:** Refere-se a quantidade de níveis, fatores e rodadas de um experimento. Exemplo um DOE fracionado com 16 rodadas com 5 fatores manipulados em 2 níveis e resolução V será 2_{V}^{5-1}
5. **Graus de Liberdade:** Abreviado como GL, é o número de determinações independentes a serem avaliados no experimento. A formulação é $n-1$, onde n é o número de amostras. Logo, caso se obtenham 16 amostras com 16 rodadas, o experimento terá 15 graus de liberdade.

3.5.6 Fomulário Padrão para DOE

Corresponde ao documento no qual se tem o planejamento do experimento. Nele, deverá constar o título do DOE, o objetivo, as informações prévias, as variáveis

respostas, os fatores com os níveis definidos, a teoria e a previsão gráfica, o FRD, o ruído e os métodos de controle e também estrutura de confundimento de acordo com os parâmetros do experimento e a sua resolução (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?). As Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 mostram um exemplo de um formulário padrão.

Figura 20 – Título, Objetivo, Informações prévias e variáveis resposta.

Título do experimento
Amassamento de fios durante a inserção das bobinas - Linha WSC2
Objetivo
Entender quais dos fatores estudados tem maior significância estatística no amassamento dos fios e respectivamente em sua vida útil após a bobinagem.
Informações prévias
Fios com maior tempo de estoque possuem menor índice de lubrificação, que de acordo com a hipótese 4 será pior para a
As ferramentas de inserção da linha 4 possuem registro e controle com o painel central, necessário acompanhar e registrar
A zona de travamento real não é de acordo com a zona calculada pela engenharia, atentar para a definição dos fios e ferramentas utilizadas.
A variação normal dos fios pode estar atrelada a diferença entre máquinas e não de lotes. (COV-1)
Variáveis de resposta
Y1 - Camada de verniz restante [%]
Y2 - Amassamento visível
Y5 - Tensão de surto disruptiva [V]

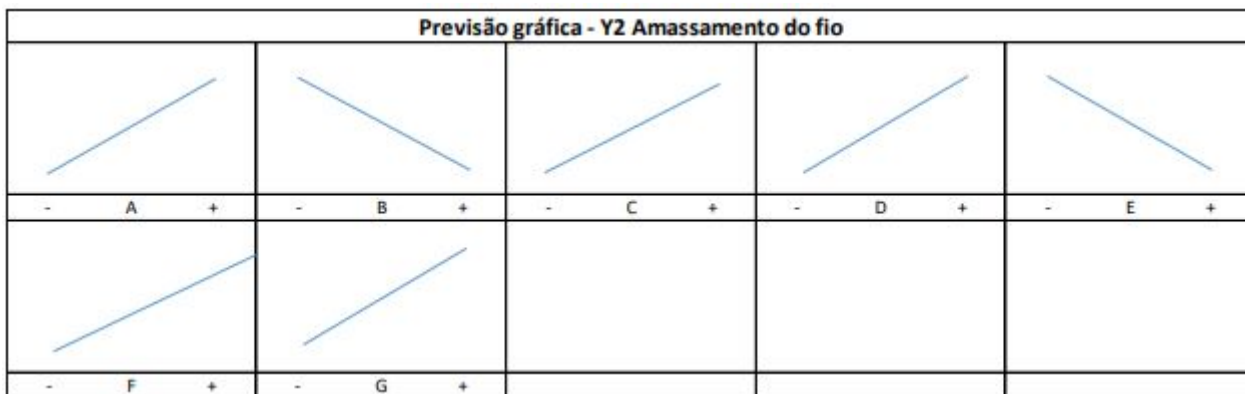
Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

Figura 21 – Fatores, Níveis, Teoria e Previsão.

Fator	Nível (-)	Nível (+)	Teoria	Previsão (Hipótese)
A - Lubrificação do Fio	Com	Sem	A lubrificação diminui o atrito existente entre fios e ferramentas, reduzindo assim a força necessária para inserir os fios.	A (+) maior Y2 e menor Y1 (H4)
B - Zona de travamento	Zona Livre (13370563)	Zona Travamento (12768241)	A zona de travamento determina a força de atrito durante a inserção. Consequentemente a força necessária que o fio será exposto no momento da inserção.	B (+) maior Y2 e menor Y1 (H1)
C - Echimento da ranhura (tratar como nominal)	70%	82%	O enchimento determina a quantidade de fios que deverá ser inserida no estator, a quantidade de fios é diretamente proporcional a força exercida nos fios	C (+) maior Y2 e menor Y1 (H5)
D - Comprimento do pacote	33 mm	52 mm	O comprimento do pacote determina o tempo e o espaço necessário a ser percorrido pelo fio durante a inserção, ou seja, o tempo e espaço que o fio está sofrendo esforços	D (+) maior Y2 e menor Y1
E - Comprimento do perímetro (LZ1)	0 mm	5 mm	O comprimento do perímetro disponibiliza uma quantidade maior de fio que permanecerá em uma só posição na inserção	E (+) menor Y2 e maior Y1 (H6)
F - Velocidade de inserção	30 mm/s	45 mm/s	A velocidade de inserção permite maior ou menor tempo para a acomodação dos fios na transição entre ferramental e estator.	F (+) maior Y2 e menor Y1 (H2)
G - Tipo de inserção	Lamela Móvel	Lamela Fixa	A movimentação da lamela reduz a força de atrito entre fio e lamelas, fazendo com que seja necessária menor força para inserção dos fios.	G (+) maior Y2 e menor Y1

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

Figura 22 – Previsão gráfica para os fatores.



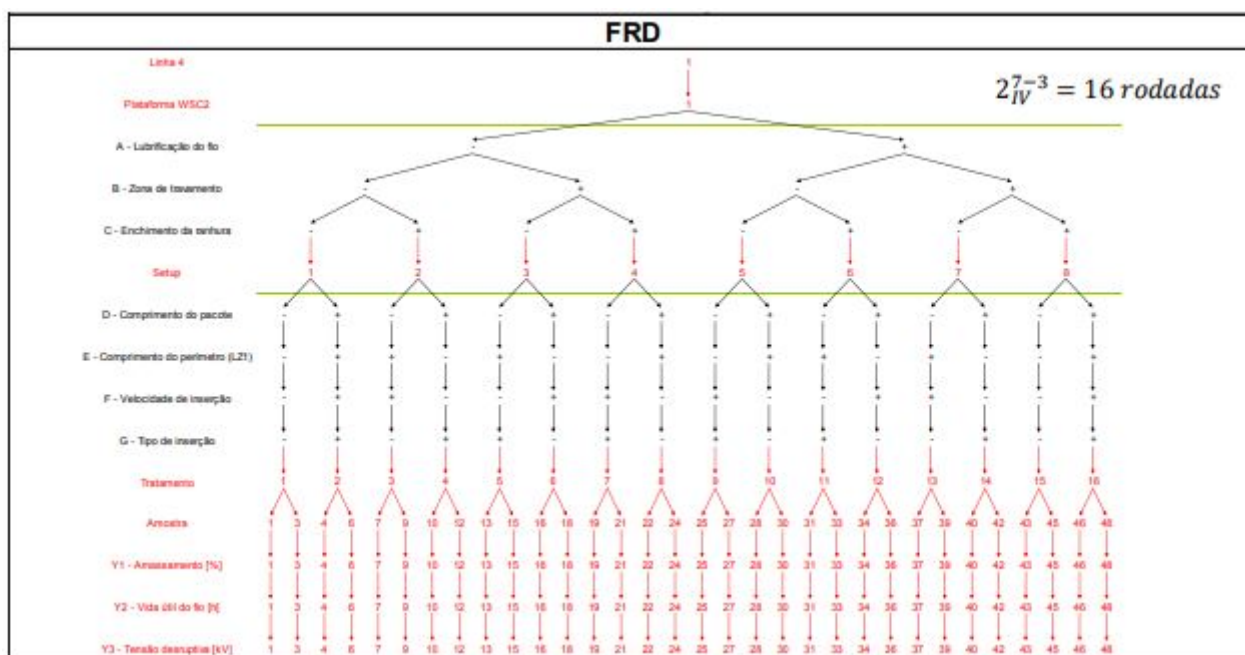
Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

Figura 23 – Identificação do Ruído bem como seu método de Controle.

Variáveis ruído	Método de controle
Tensionamento do fio	Ignorar
Ø esmaltado do fio	Monitorar
Área da ranhura do estator (variação natural)	Ignorar
Força de inserção	Monitorar
Posição final da estrela inseridora	Fixar

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

Figura 24 – A FRD a ser documentada.



Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

Figura 25 – Estrutura de confundimento.

Estrutura de confundimento
<p>Singularity Details</p> <p>A*G = B*D = C*E A*F = B*E = C*D A*E = B*F = C*G A*D = B*G = C*F B*C = D*E = F*G A*C = D*F = E*G A*B = D*G = E*F G = A*B*D = A*C*E = B*C*F = D*E*F F = A*B*E = A*C*D = B*C*G = D*E*G E = A*B*F = A*C*G = B*C*D = D*F*G D = A*B*G = A*C*F = B*C*E = E*F*G A*B*C = A*D*E = A*F*G = B*D*F = B*E*G = C*D*G = C*E*F C = A*D*F = A*E*G = B*D*E = B*F*G B = A*D*G = A*E*F = C*D*E = C*F*G A = B*D*G = B*E*F = C*D*F = C*E*G</p>

Fonte: (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?)

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Nesse presente estudo foi utilizado o método DOE para a investigação da influência de 5 fatores, sendo esses: A - Temperatura Ambiente, B - Corrente de Partida, C - Inércia da Carga, D - Tensão de Alimentação e E - Classe de Elevação de Temperatura, na variável resposta Y1 - Fator $C(kW.s/m^3)$, buscando obter o maior valor possível dessa variável, desde que as condições iniciais de contorno e critérios de experimento fossem satisfeitos. Para a realização do experimento, aplicou-se o método de fatorial fracionado com 5 fatores e resolução V, com cada variável em 2 níveis o que resultou em um experimento 2_V^{5-1} . O experimento foi conduzido de acordo com o Planejamento de DOE's abordado no capítulo anterior. Condições de contorno do Projeto da Máquina também foram impostas e serão abordadas na seção posterior. As Tabelas 7 e 8 mostram os fatores e os níveis utilizados nesse experimento para as duas rodadas.

Tabela 7 – Fatores e níveis do experimento na 1ª rodada.

	Fator	Nível(-)	Nível(+)
A	Temperatura Ambiente	40 °C	60 °C
B	Corrente de Partida	3 a 3,5 pu	6 a 6,5 pu
C	Inércia da Carga	$3 \times J_{motor}$	$9 \times J_{motor}$
D	Tensão	4000 V	6600 V
E	Classe de Elevação	B	F

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 8 – Fatores e níveis do experimento na 2ª rodada.

	Fator	Nível(-)	Nível(+)
A	Temperatura Ambiente	40 °C	60 °C
B	Corrente de Partida	3 a 3,5 pu	6 a 6,5 pu
C	Inércia da Carga	$3 \times J_{motor}$	$5 \times J_{motor}$
D	Tensão	4000 V	6600 V
E	Classe de Elevação	B	F

Fonte: Autoria Própria.

4.1 CONDIÇÕES DE CONTORNO

Para a realização desse projeto, algumas condições de contorno foram estabelecidas, como a especificação de uma máquina de referência: um projeto já realizado na WEG de um motor trifásico de indução. Nas Tabelas 9 e 10, estão os dados nominais do motor, bem como os dados de ensaio. O rendimento da máquina foi determinado pelo procedimento de ensaio IEEE 112:2004, o qual é utilizado pela NEMA. Já na Tabela 11 estão expostos os dados dimensionais do motor o qual serão necessários para as futuras análises.

Tabela 9 – Dados da máquina escolhida.

Modelo	Carcaça	Polos	Tensão(V)
MGP	710	4	4000
Frequencia(Hz)	Classe de Isolação	Classe de Elevação	Método de Refrigeração
60	F	B	IC 01
Fator de Serviço	Regime de Serviço	Altitude(m)	kW/rps
1,0	S1	1000 m	298,33

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 10 – Dados do ensaio da máquina escolhida

Rendimento(%)	Fator de Potência	Perdas Mec(W)	Elevação(K)	Torque(Nm)
96,97	0,932	38851,75	61,3	47675,9

Fonte: Autoria Própria.

Tabela 11 – Dimensional do motor base utilizado.

$D_{e1}(mm)$	$D_1(mm)$	$D_{e2}(mm)$	$D_{I2}(mm)$	N1	N2
1250	790	782	420	60	72

Fonte: Autoria Própria.

Como dito acima, para a realização do experimento baseado no DOE, esse foi submetido ao método fatorial fracionado com 5 fatores e resolução V, ou seja, um experimento 2^{5-1}_V . Esse experimento resulta em 16 tratamentos, os quais foram executados no software de cálculo de motores de indução trifásicos da WEG chamado NEWTON. O NEWTON é um software que a partir das dimensões da máquina e construtivos de sua bobinagem, resolve o circuito equivalente para que se possa gerar na saída um relatório com o desempenho da máquina. A Figura 26 ilustra um exemplo de um relatório gerado pelo NEWTON.

Figura 26 – Relatório gerado pelo software de cálculo NEWTON.

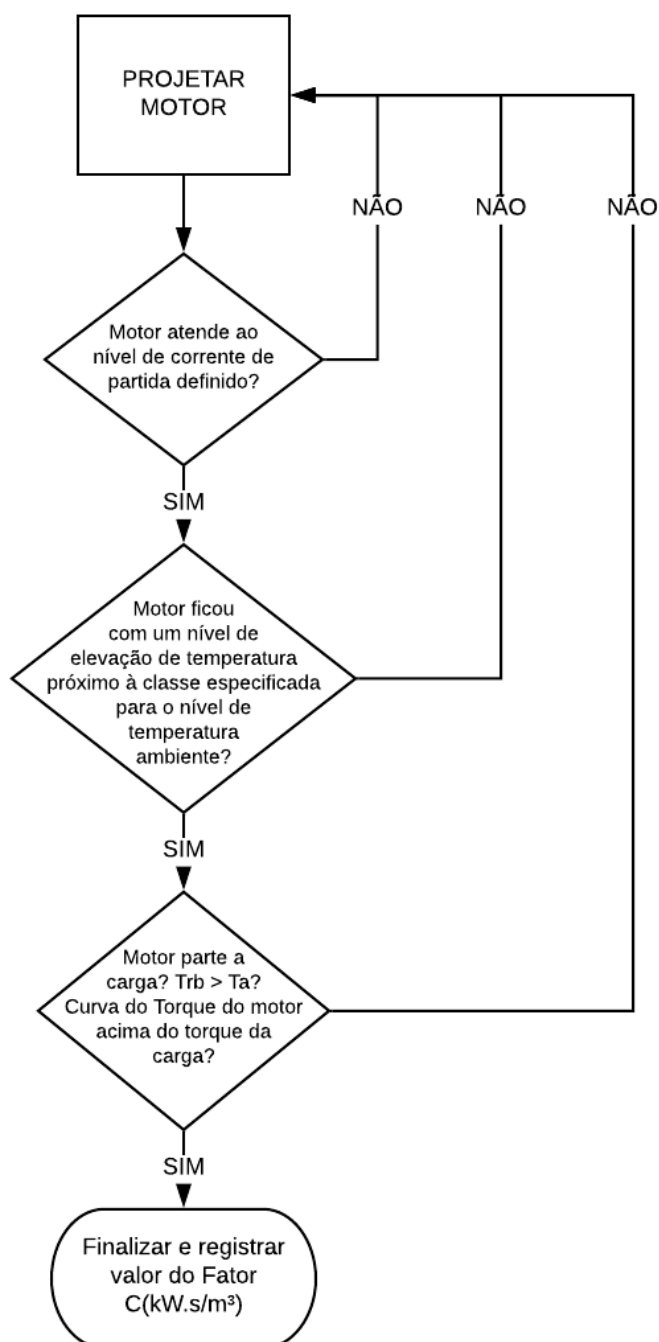
ID Newton : 1054723920		Versão : 19.08								
Alterado por : fernandotn		Data : 22/12/2019 18:16:22								
Nota : TCC										
Modelo : MGP	Carcaça : 710	Potência : 8950.0 (kW)								
Tensão estator : 4000.0 (V)	Polos : 4	Freqüência : 60.0 (Hz)								
Desempenho a 95.0 °C										
Carga	: 0%	25%	50%	75%	100%	125%				
Entrada	: 94.4	2330.9	4595.1	6856.7	9156.0	11466.5	(kW)			
Saída	: 0.0	2229.7	4473.6	6700.8	8949.4	11191.1	(kW)			
η	: 0.0	95.66	97.35	97.72	97.74	97.59	(%)			
Cos Φ	: 0.055	0.788	0.9056	0.9295	0.9321	0.9252				
I1	: 248.05	426.98	732.38	1064.75	1417.92	1788.99	(A)			
s	: 0.0	7.3E-4	0.00148	0.00227	0.00311	0.00403				
Rotação	: 1800.0	1798.68	1797.33	1795.92	1794.4	1792.74	(rpm)			
Pcu1 ac	: 1.301	3.854	11.338	23.965	42.499	67.653	(kW)			
Pcu1 dc	: 1.215	3.6	10.592	22.386	39.7	63.198	(kW)			
Pcu2	: 3.093	5.025	10.888	20.91	35.796	56.222	(kW)			
Pcu2 p	: 0.0	1.669	6.725	15.361	28.178	45.752	(kW)			
Pcu2 ny	: 3.093	3.355	4.164	5.55	7.619	10.475	(kW)			
Prgb	: 38.85	38.793	38.735	38.674	38.609	38.537	(kW)			
Pfe	: 51.2	51.023	50.641	50.173	49.242	48.159	(kW)			
Pzus	: 0.0	2.842	11.16	25.185	45.781	73.723	(kW)			
Psum	: 0.5% value according IEC 60034-2@1972.				211.926	(100%)	(kW)			
Dados nominais										
J1	: 4.0	J2	: 4.37	j2a	: 0.0	Jr	: 2.15	Jra	: 0.0 (A/mm²)	
Dt1	: 51.5 (K)	Dt2	: 0.0 (K)	C	: 457.64 (Ws/m²)	Kdl	: 1.862	Hpac	: 824.0 (W/m²K)	
U2	: 0.0 (V)	I2	: 2620.8 (A)	Cnom	: 47626.3 (Nm)	Frad	: 11.071 (kN)	exc	: 0.05	
Partida										
	M/Mn	I/I _n	M(Nm)	I(A)	Cos Φ	Rotação(rpm)	B2si(mm)			
Partida teórica	: 0.62	5.88	29739.1	8330.85	0.126		8.71			
Partida-kka= 0.3	: 0.67	6.1	31964.9	8645.88	0.129		8.83			
Maximo	: 2.6	3.56	123828.4	0.0	0.0	1769.0	0.0			
Minimo	: 0.54					260.6				
Tempo rotor bloqueado										
tb1	: 21.1	tb2	: 15.5	tb2a	: 0.0	tbr	: 21.7	tbra	: 0.0 (seg)	
Circuito magnético										
	entreferro	dente estator	coroa estator	dente rotor	coroa rotor					
B	: med	max	med	max	med	max	(T)			
mmf	: 3348.2	1.648	1.428	1.383	1.886	1.719	1.493			
Fluxo	: 359.42 (mWb)	71.3	196.2	206.9	133.2	133.2	(A)			
	alpha	: 1.542	kc1	: 1.2652	kc2	: 1.0253	ks	: 1.181	fw	: 0.9095
Massas líquidas										
Gch1	: 4737.3 (kg)	E170	Gch2	: 2154.7 (kg)	E170					
Gw1	: 987.241 (kg)	Cobre eletrolítico	Gw2	: 0.0 (kg)						
G2	: 510.357 (kg)	Cobre eletrolítico	G2a	: 0.0 (kg)						
Gr	: 270.565 (kg)	Cobre fundido	Gra	: 0.0 (kg)						
J	: 319.056 (kgm²)	Jantr	: 8660.2 (kg)							
Carga - Partida teórica à 1.0x Un										
Curva	: 0.0 (kgm²)	Mgn	: 47626.0 (Nm)	Curva	: Torque quadrático	Mgend	: 0.35			
Mglos	: 0.15	Mgsat	: 0.05 (Nm)	Nsat	: 0.15	Nend	: 0.0 (rpm)			
Erw1	: 0.0 (K)	Erw2	: 0.0 (K)	Erwa2	: 0.0 (K)	Ta	: 0.0 (s)			
Circuito equivalente referido ao estator - Conexão Triângulo - 95.0 °C										
	s=0	s=sn	s=Maximo	s=1teórico(A)	s=1(kka=0.3)					
s1	: 1.0E-9	0.00310937	0.0172455	1.0	1.0	Ω				
r1	: 0.0211385	0.0211385	0.0211385	0.0211385	0.0211385	Ω				
x1	: 0.548602	0.549126	0.551118	0.55235	0.522938	Ω				
r2	: 0.0147704	0.0150584	0.0163681	0.0841826	0.0841826	Ω				
x2	: 0.47141	0.470992	0.423453	0.274985	0.274135	Ω				
rfe	: 900.79	899.633	893.197	885.044	885.044	Ω				
xm	: 27.3956	27.8128	29.9186	30.5802	27.3956	Ω				
kz	: 271.651	ke	: 81.8579	ki	: 0.301335	kr	: 5.16	kx	: 0.27	
Torque síncrono (s=1)										
Msyn/Mn	: 0.0	M/Mn	: 0.624	MsynDin/Mn	: 0.0	Msyn/M	: 0.0			
Torque síncrono (s≠1)										
Ny	146.0	s	0.97297	48.6	Msyn/Mn	0.014	M/Mn	0.656	Msyn/M	0.021
	-298.0	1.01351	-24.3	0.126	0.609	0.609	0.207			

*** WARNING: MSYN/M HIGHER THAN 0.20 ***

Fonte: Autoria Própria.

As análises foram feitas com o objetivo de atingir o maior fator de carregamento de volume ativo C possível, desde que os valores de elevação de temperatura máxima da máquina em operação fiquem próximos ao ideal, e atender ao mesmo tempo a condição de partida de um ventilador em situações de inércia distintas. Um fluxograma que mostra o critério de validação do experimento é exibido na Figura 27.

Figura 27 – Fluxograma do experimento.



Fonte: Autoria Própria.

As condições de torque da carga foram definidas em um valor padrão característico de ventiladores, ou seja, uma curva parabólica que tende a crescer quadraticamente com a elevação da rotação. A inércia base desse ventilador foi a própria inércia do motor. Os valores de torque estão em pu e o torque base é o do motor utilizado nesse experimento. É possível ver o formato da curva da carga na Figura 30. O método de partida utilizado nessa análise será o DOL - Direct On Line ou Partida Direta na Rede.

Tabela 12 – Dados da curva de carga do ventilador.

$T_o(pu)$	$T_{min}(pu)$	$T_{final}(pu)$	Inércia(kgm ²)
0,15	0,05	0,35	291

Fonte: Autoria Própria.

Para confirmar a capacidade de partida é necessário verificar se a curva de torque da máquina está acima da curva de carga e também se o tempo de rotor bloqueado está acima do tempo de aceleração. Para realizar essa confirmação, a análise foi feita por meio de um cálculo periférico do software NEWTON, o WBUEGEL, o qual mostra o tempo de rotor bloqueado da máquina, bem como o tempo que o motor demora para partir a carga.

Para definir o tempo de rotor bloqueado da máquina, faz-se a seguinte consideração: Supondo-se uma máquina que operará em condições ambientes com a temperatura ambiente máxima de 40 °C e a altitude de 1000 m. Supondo ainda que essa máquina tenha uma classe de isolamento F e classe de elevação B, ou seja admita uma elevação de 80°C em operação para uma temperatura de 40°C ambiente, sendo 120° absolutos em operação. É considerado como temperatura limite no estator quando este está "bloqueado" uma temperatura de 200 °C absolutos, e para o rotor, aproximadamente 500 °C absolutos. Logo, quando a máquina está operando, ou seja, com uma temperatura absoluta de até 120° C, caso ela pare de operar e precise partir a quente a carga novamente, ela deve atingir uma elevação em tempo de rotor bloqueado de apenas 80K no estator e 380K no rotor. Essa verificação de tempo é feita pelo cálculo WBUEGEL, e um exemplo dessa verificação é exibido na Figura 28 a qual mostra que a máquina atingiu perto dos 380K no topo da barra rotor em aproximadamente 20 segundos, logo, este é o tempo de rotor bloqueado da máquina.

Figura 28 – Tempo de rotor bloqueado da máquina em 20 segundos.

```

DESCRIPTION OF EACH TEMPERATURE RISE:
T1W - STATOR WINDING OVERHANG
T1P - STATOR WINDING INSIDE CORE PACKAGE
T1Z - STATOR TOOTH
T1J - STATOR YOKE
T2BO - OPERATION CAGE / TOP OF BAR
T2BU - OPERATION CAGE / BOTTOM OF BAR
T2RB - OPERATION CAGE / SHORT-CIRCUIT RING
T2ZB - TOOTH / OPERATION CAGE
T2A - STARTINGS CAGE
T2RA - STARTINGS CAGE / SHORT-CIRCUIT RING
T2ZA - TOOTH / STARTINGS CAGE
T2J - ROTOR YOKE
>>>> CALCULATION FOR NOMINAL VOLTAGE <<<<<
STARTING CURRENT, P H A S E VALUE: 2949.2 A
>>>> PCU1 TEMPERATUR DEPENDENT <<<<<

T E - T I M E - T A B L E :

    T   T1W   T1P   T1Z   T2BO   T2BU   T2RB   T2ZB   T2A   T2RA   T2ZA
0.0    0.    0.    0.    4.    0.    0.    0.    0.    0.    0.
0.6    1.    1.    0.    35.   2.    3.    0.    0.    0.    0.
1.1    2.    2.    0.    62.   4.    6.    1.    0.    0.    0.
1.5    3.    3.    0.    84.   8.    9.    2.    0.    0.    0.
2.0    4.    4.    0.    103.  12.   12.   3.    0.    0.    0.
2.5    5.    5.    0.    120.  17.   15.   5.    0.    0.    0.
3.0    6.    6.    0.    134.  22.   18.   7.    0.    0.    0.
3.5    8.    7.    0.    147.  27.   21.   8.    0.    0.    0.
4.0    9.    9.    0.    158.  33.   24.   10.   0.    0.    0.
4.5   10.   10.   0.    168.  38.   27.   13.   0.    0.    0.
5.1   11.   11.   0.    178.  44.   30.   15.   0.    0.    0.
5.6   12.   12.   0.    187.  50.   33.   17.   0.    0.    0.
6.1   13.   13.   0.    195.  56.   36.   19.   0.    0.    0.
6.6   14.   14.   0.    203.  62.   40.   22.   0.    0.    0.
7.1   15.   15.   0.    211.  68.   43.   24.   0.    0.    0.
7.6   16.   16.   0.    218.  75.   46.   27.   0.    0.    0.
8.1   17.   17.   0.    225.  81.   49.   30.   0.    0.    0.
8.6   18.   18.   0.    233.  87.   52.   32.   0.    0.    0.
9.1   20.   19.   0.    239.  93.   55.   35.   0.    0.    0.
9.6   21.   20.   0.    246.  99.   59.   38.   0.    0.    0.
10.1  22.   21.   0.    253.  105.  62.   41.   0.    0.    0.
10.6  23.   23.   0.    259.  111.  65.   43.   0.    0.    0.
11.1  24.   24.   0.    266.  117.  68.   46.   0.    0.    0.
11.6  25.   25.   0.    273.  123.  72.   49.   0.    0.    0.
12.1  26.   26.   0.    279.  129.  75.   52.   0.    0.    0.
12.6  28.   27.   0.    285.  135.  78.   55.   0.    0.    0.
13.1  29.   28.   0.    292.  141.  82.   58.   0.    0.    0.
13.6  30.   29.   0.    298.  147.  85.   61.   0.    0.    0.
14.1  31.   30.   0.    304.  153.  88.   64.   0.    0.    0.
14.6  32.   31.   0.    311.  159.  92.   67.   0.    0.    0.
15.1  33.   32.   0.    317.  165.  95.   70.   0.    0.    0.
15.6  35.   34.   1.    323.  171.  98.   74.   0.    0.    0.
16.1  36.   35.   1.    329.  177.  102.  77.   0.    0.    0.
16.6  37.   36.   1.    335.  183.  105.  80.   0.    0.    0.
17.1  38.   37.   1.    341.  188.  109.  83.   0.    0.    0.
17.6  39.   38.   1.    347.  194.  112.  87.   0.    0.    0.
18.1  41.   39.   1.    353.  200.  115.  90.   0.    0.    0.
18.6  42.   40.   1.    359.  206.  119.  93.   0.    0.    0.
19.0  43.   41.   1.    365.  211.  122.  96.   0.    0.    0.
19.5  44.   42.   1.    371.  217.  126.  100.  0.    0.    0.
20.0  45.   44.   1.    377.  223.  129.  103.  0.    0.    0.
20.5  47.   45.   1.    383.  228.  133.  107.  0.    0.    0.
21.0  48.   46.   1.    389.  234.  136.  110.  0.    0.    0.
RELATIVE THERMAL EXPANSION AT OPERATION BARS / TOP : 0.006614
RELATIVE THERMAL EXPANSION AT OPERATION BARS / BOTTOM : 0.003978
RELATIVE THERMAL EXPANSION OF THE STARTINGS BARS : 0.000000
    
```

Fonte: Autoria Própria.

O tempo de aceleração é calculado conforme a Equação 5 e assim como o tempo de rotor bloqueado, também é verificado pelo cálculo WBUEGEL. É possível verificar o tempo de aceleração na Figura 29, e as temperaturas atingidas na partida, em pontos do estator e do rotor. O WBUEGEL também exibe uma saída com dados de torques do motor e da carga bem como de corrente de partida do motor. Com esses dados é possível desenhar curvas no software Excel para verificar o comportamento na partida para cada situação proposta no experimento. A Figura 30 exibe um exemplo de avaliação de uma curva de Torque vs Rotação e da Corrente de Partida do motor, sendo todos os valores em pu referenciados aos valores base de torque e de corrente nominais do motor.

Figura 29 – Tempo de aceleração.

```

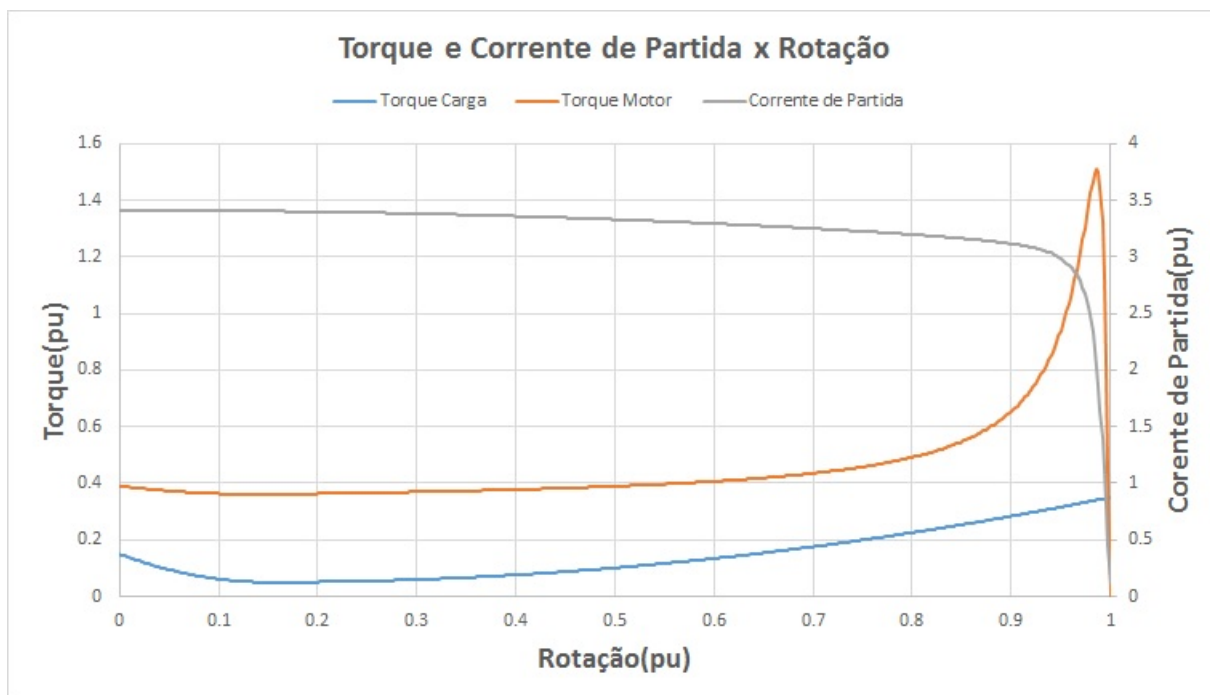
DESCRIPTION OF EACH TEMPERATURE RISE:
T1W  - STATOR WINDING OVERHANG
T1P  - STATOR WINDING INSIDE CORE PACKAGE
T1Z  - STATOR TOOTH
T1J  - STATOR YOKE
T2BO - OPERATION CAGE / TOP OF BAR
T2BU - OPERATION CAGE / BOTTOM OF BAR
T2RB - OPERATION CAGE / SHORT-CIRCUIT RING
T2ZB - TOOTH / OPERATION CAGE
T2A  - STARTINGS CAGE
T2RA - STARTINGS CAGE / SHORT-CIRCUIT RING
T2ZA - TOOTH / STARTINGS CAGE
T2J  - ROTOR YOKE
>>>> CALCULATION FOR NOMINAL VOLTAGE <<<<<
STARTING CURRENT, P H A S E VALUE: 2949.2 A
>>>> PCU1 TEMPERATUR INDEPENDENT <<<<<

THE SUFFIX 'M' INDICATES THE MAXIMUM TEMPERATURE OF THAT LOCATION
DURING A HEATING OR COOLING PHASE.

END OF WARMING PHASE AT TIME T = 14.41 SEC
-----
      T1W   T1P   T1Z   T1J
      28.   27.    0.    0.
      T1WM  T1PM  T1ZM  T1JM
      28.   27.    0.    0.
      T2BO  T2BU  T2RB  T2ZB   T2A   T2RA  T2ZA   T2J
      104.  81.   43.   37.    0.    0.    0.    5.
      T2BOM T2BUM  T2RBM T2ZBM  T2AM  T2RAM  T2ZAM  T2JM
      135.  81.   43.   37.    0.    0.    0.    5.
RELATIVE THERMAL EXPANSION AT OPERATION BARS / TOP      : 0.002301
RELATIVE THERMAL EXPANSION AT OPERATION BARS / BOTTOM   : 0.001383
RELATIVE THERMAL EXPANSION OF THE STARTINGS BARS      : 0.000000
    
```

Fonte: Autoria Própria.

Figura 30 – Curva de partida da máquina.



Fonte: Autoria Própria.

Para analisar a elevação térmica da máquina, considerou-se o valor de elevação de temperatura exposto na Tabela 10 como um valor de referência e comparado com o medido na saída do cálculo térmico SASVP, o qual é outro dos cálculos periféricos do NEWTON, utilizado para verificar a elevação de temperatura da máquina em operação. Como o valor da saída do cálculo térmico da máquina base foi de 48,9K de elevação e no ensaio foi medido uma elevação de 61,3K, um valor 1,25 vezes maior, uma correção de elevação de temperatura foi imposta nos outros cálculos para que se respeitasse as condições de contorno da máquina de referência. A Figura 31 mostra a saída do cálculo térmico com destaque para a elevação de temperatura.

Figura 31 – Saída do Cálculo Térmico.

STATOR TEMPERATURES (in degree C):			
WINDING BY RESISTANCE INCREASE:	TMW1	=	88.9 (48.9 K)
AVERAGE VALUE OF THE WINDING IN THE CORE:	TMNW1	=	91.0 (51.0 K)
AVERAGE VALUE IN THE CENTER OF THE CORE:	TMPW1	=	91.1 (51.1 K)
HOT SPOT OF THE TOTAL WINDING:	THW1	=	91.3 (51.3 K)
HOT SPOT OF THE WINDING IN THE CORE AREA:	THNW1	=	91.3 (51.3 K)
AVERAGE VALUE OF THE IRON:	TMB1	=	81.8
HOT SPOT OF THE IRON:	THB1	=	85.3

Fonte: Autoria Própria.

Outra consideração a ser feita foi acerca do anel de curto do motor. O anel de curto utilizado no projeto do motor base possuía as dimensões indicadas na parte

esquerda da Tabela 13. Já o anel utilizado no experimento possui dimensões conforme a parte direita da mesma Tabela. O motivo para a utilização desse anel maior foi a limitação que o anel do motor base causava no experimento quando os fatores variavam entre os níveis estabelecidos. Um anel menor condicionava a elevação de temperatura e partida da carga a níveis não aceitáveis para a realização do experimento.

Tabela 13 – A direita o anel de curto da máquina base e a esquerda o anel de curto utilizado no experimento.

Dimensões anel máquina base			Dimensões anel utilizado		
Dext(mm)	Din(mm)	Espessura(mm)	Dext(mm)	Din(mm)	Espessura(mm)
744	640	60	744	600	100

Fonte: Autoria Própria.

Outra condição de contorno para os projetos realizados foi a perda mecânica da máquina. Como a perda mecânica da máquina no ensaio foi de 38851,75 W e nos outros projetos foi utilizado o mesmo ventilador, mancal e sistema de refrigeração dessa máquina base, essa perda foi mantida constante.

4.2 APLICAÇÃO E PLANEJAMENTO DO DOE

O principal objetivo nesse trabalho é entender os fatores que afetam a densidade volumétrica de energia da máquina para uma mesma condição de contorno, logo a variável resposta Y1 é o Fator C. Para isso, foram selecionados 5 fatores definidos com dois níveis conforme a Tabela 8. A partir desses fatores gerou-se uma matriz experimental com a ordem dos tratamentos. Foi formulado também a teoria e previsões da resposta de cada fator na variável objetivo. A quantidade de tratamentos foi estabelecida conforme a Figura 15, e por consequência, foi realizado um experimento 2^{5-1}_V o qual teve 16 tratamentos e 15 graus de liberdade. Uma FRD para definição do plano experimental também foi produzida, bem como o formulário padrão para o DOE, no qual é exposto as instruções do experimento.

A parte da simulação dos tratamentos foi feita no software de cálculo de motores de indução da WEG chamado NEWTON e a parte da análise dos resultados foi feita utilizando o software JMP *Statistical Discovery*. A matriz experimental está exibida na Tabela 14.

Tabela 14 – Matriz experimental do estudo.

A	B	C	D	E
-1	-1	-1	-1	1
-1	-1	-1	1	-1
-1	-1	1	-1	-1
-1	-1	1	1	1
-1	1	-1	-1	-1
-1	1	-1	1	1
-1	1	1	-1	1
-1	1	1	1	-1
1	-1	-1	-1	-1
1	-1	-1	1	1
1	-1	1	-1	1
1	-1	1	1	-1
1	1	-1	-1	1
1	1	-1	1	-1
1	1	1	-1	-1
1	1	1	1	1

Fonte: Autoria Própria.

Como parte do planejamento descrito no capítulo 3 desse trabalho, deve-se teorizar acerca dos fatores e os possíveis resultados com as mudanças de níveis dos parâmetros e após isso, fazer uma previsão do que acontecerá com a variável resposta quando o nível do fator for alterado. Deve-se também construir uma previsão gráfica a qual está exibida na Figura 32.

1. A - Temperatura Ambiente

Teoria: O aumento da temperatura ambiente leva a uma limitação da elevação de temperatura da máquina em regime permanente a 100% de carga o que faz com que se utilize mais material ativo na máquina para tentar compensar essa limitação. Uma maior utilização do material ativo da máquina leva por consequência um aumento no volume da máquina que se relaciona com o Fator C da máquina de maneira inversa.

Previsão: Aumentando a temperatura ambiente espera-se um decréscimo do Fator C

2. B - Corrente de Partida

Teoria: A corrente de partida de uma máquina está relacionada com o fluxo magnético da mesma. Já o fluxo magnético da máquina também está relacionado com volume ativo da máquina, pois quanto maior o fluxo, menor será o volume ativo, já que um maior fluxo está relacionado à uma diminuição do número de

espiras da máquina e isso acarretará em uma maior seção de condutores da máquina o que impacta de forma favorável na elevação de temperatura em operação e partida para uma mesma quantidade de pacote de chapas.

Previsão: Aumentando a corrente de partida espera-se um acréscimo do Fator C

3. C - Inércia da Carga

Teoria: A inércia da carga está relacionada de forma inversa ao tempo de aceleração do motor. Maiores inércias demandam um tempo de aceleração maior e como consequência, é necessário que o motor tenha um tempo de rotor bloqueado maior também para atender a condição de partida da máquina ($T_{rb} > T_a$). Um maior tempo de rotor bloqueado está relacionado a baixas densidades de corrente, logo é necessário um maior volume ativo na máquina para que a densidade de corrente dos condutores no estator e no rotor sejam menores.

Previsão: Aumentando a inércia da carga espera-se um decréscimo do Fator C

4. D - Tensão

Teoria: A tensão está relacionada diretamente com a isolação da máquina. O aumento na isolação faz com que se reduza a quantidade de condutores dentro da ranhura, o que por consequência faz com que se aumente a densidade de corrente da máquina. O aumento dessa densidade de corrente pode ser compensado, aumentando-se o volume ativo da máquina.

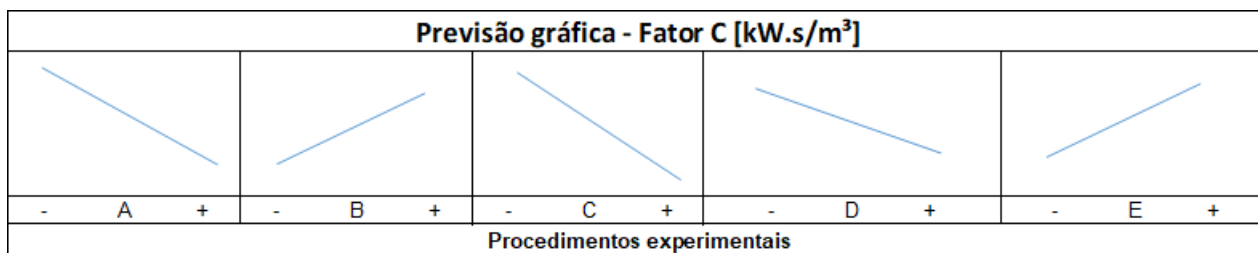
Previsão: Aumentando e tensão espera-se um decréscimo do Fator C.

5. E - Classe de Elevação

Teoria: A classe de elevação de temperatura da máquina relaciona a maior temperatura absoluta que uma máquina atinge em operação, desde que seja conhecida a máxima temperatura ambiente a qual ela está exposta. A classe de elevação B, permite uma temperatura absoluta de 120 graus Celsius e a F de 145 graus Celsius.

Previsão: Aumentando e elevação de temperatura espera-se um acréscimo do Fator C.

Figura 32 – Previsão gráfica acerca da variável resposta em função dos fatores e níveis.

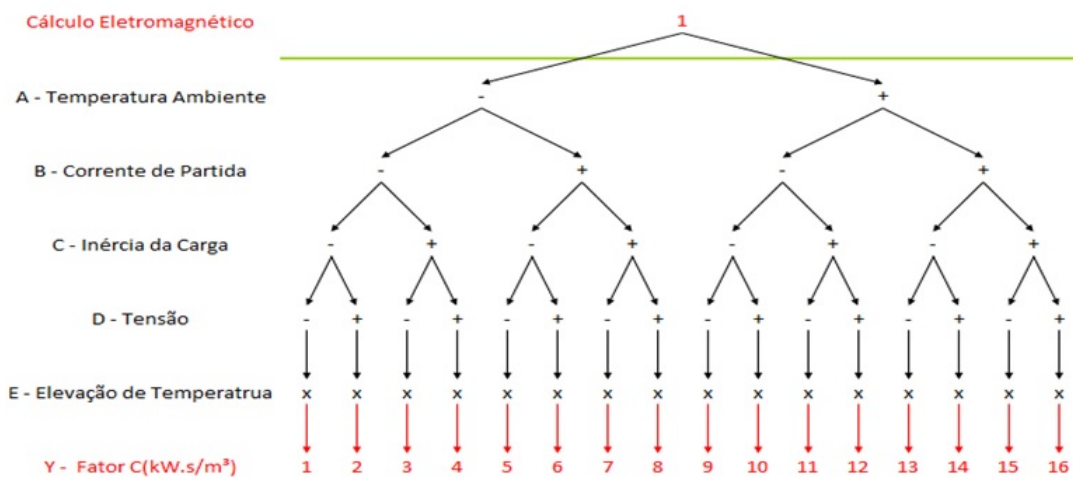


Fonte: Autorial Própria.

Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?), uma possibilidade para analisar o ruído é mantê-lo constante, caso haja poucos recursos disponíveis e o mesmo seja uma fonte de variação conhecida. Porém, é de ressaltar que isso limita o escopo da análise a apenas essas condições de contorno. Como o experimento será feito por simulação, não há ruídos provenientes de processos, logo o único ruído considerado aqui serão as próprias condições de contorno.

Após teorizar sobre os fatores e a influencia deles na variável objetivo e também fazer a previsão gráfica, é necessário formular o FRD e fazer a estrutura de confundimento. Como o experimento foi de resolução V, os fatores de segunda ordem se confundem com os de terceira e os de primeira se confundem com os de quarta ordem. As Figuras 33 e 34 mostram a FRD e a estrutura de confundimento.

Figura 33 – FRD para o experimento do trabalho.



Fonte: Autorial Própria.

Figura 34 – Estrutura de confundimento do experimento.

Singularity Details	
Term	Details
D*E	=A*B*C
C*E	=A*B*D
C*D	=A*B*E
B*E	=A*C*D
B*D	=A*C*E
B*C	=A*D*E
A*E	=B*C*D
A*D	=B*C*E
A*C	=B*D*E
A*B	=C*D*E
E	=A*B*C*D
D	=A*B*C*E
C	=A*B*D*E
B	=A*C*D*E
A	=B*C*D*E

Fonte: Autoria Própria.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esse capítulo tem como objetivo principal a análise da realização do experimento abordado no capítulo anterior e objetivos complementares como: A avaliação de fatores de utilização da coroa da chapa do estator e do rotor os quais serão definidos por K_{re} e K_{rr} . Após a escolha do projeto de referência, das definições das condições de contorno do experimento bem como da realização do planejamento do DOE, o experimento foi conduzido conforme os 16 tratamentos da matriz experimental apresentada na Figura 14 com o objetivo de maximizar a variável resposta, Fator C e entender a influência dos cinco fatores escolhidos nesse processo de maximização. Como já mencionado na metodologia, as análises de projeto e condições de contorno relacionadas ao motor foram realizadas no software de cálculo NEWTON da WEG, já as análises estatísticas foram feitas no software comercial JMP.

Os resultados serão divididos em duas seções, já que foram realizadas duas rodadas para esse experimento. Isso se deu, pelo fato de que na primeira rodada o nível de inércia da carga considerado foi muito alto, o que provocou uma distorção do experimento em relação aos outros fatores os quais não foram atendidos a níveis definidos pelo experimento.

5.1 ANÁLISE DO 1º DOE

Na primeira rodada do experimento, como já foi exposto, foram executados os 16 tratamentos da matriz experimental (Figura 14) e registrados os valores da variável resposta (Y_1) - Fator C. A matriz experimental com os dados da variável resposta estão exibidos na Tabela 15. É possível perceber que os valores da variável resposta ficaram próximos aos da literatura exibida na Figura 8. O valor do kW/rps do motor base escolhido fica em torno de 300 como pode ser visto na Tabela 9. Observando o eixo das ordenadas e tomando como referência a linha preta para máquina abertas, o Fator C cairia em torno de 560 como pode ser visto na Figura 8, próximo ao alcançado no experimento, como mostrado na Tabela 15.

Tabela 15 – Matriz experimental com a variável resposta.

Tratamento	A	B	C	D	E	Y1
1	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	F	722,672
2	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	B	557,724
3	40°C	3-3,5 pu	9× Inércia	4000V	B	516,72
4	40°C	3-3,5 pu	9× Inércia	6600V	F	538,491
5	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	B	574,027
6	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	F	633,649
7	40°C	6-6,5 pu	9× Inércia	4000V	F	423,974
8	40°C	6-6,5 pu	9× Inércia	6600V	B	402,834
9	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	B	480,928
10	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	F	608,518
11	60°C	3-3,5 pu	9× Inércia	4000V	F	474,509
12	60°C	3-3,5 pu	9× Inércia	6600V	B	393,841
13	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	F	608,884
14	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	B	389,595
15	60°C	6-6,5 pu	9× Inércia	4000V	B	349,518
16	60°C	6-6,5 pu	9× Inércia	6600V	F	421,179

Fonte: Autoria Própria.

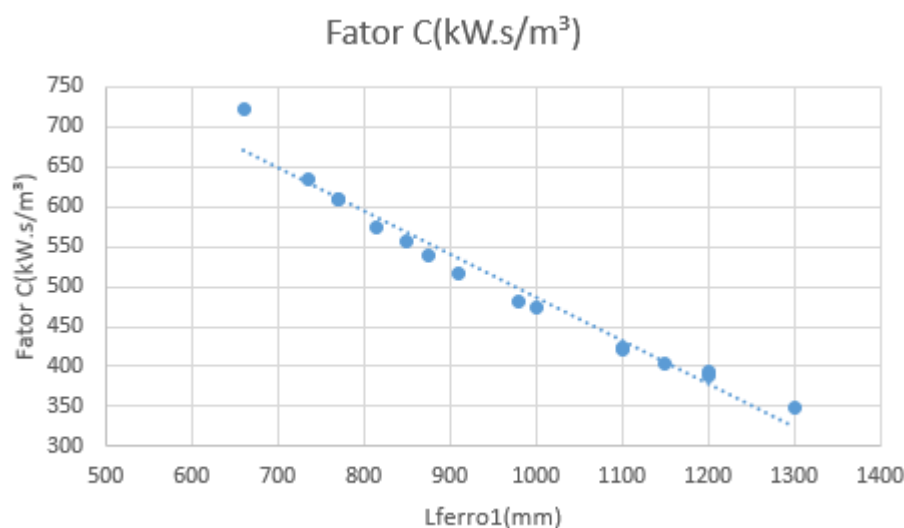
Como a variável resposta é inversamente proporcional ao pacote de chapas L_{Ferro1} de acordo com a Equação 7 e as outras variáveis se mantiveram constantes durante o experimento, é possível dizer que a variável resposta tem uma relação muito forte com o comprimento do pacote de chapas. Na Tabela 16 é possível ver o comprimento registrado para cada tratamento do experimento.

Tabela 16 – Comprimento do pacote de chapas L_{Ferro1} em milímetros para cada tratamento do experimento na 1ª rodada.

Tratamento	A	B	C	D	E	$L_{Ferro1}(mm)$
1	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	F	660
2	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	B	850
3	40°C	3-3,5 pu	9× Inércia	4000V	B	910
4	40°C	3-3,5 pu	9× Inércia	6600V	F	875
5	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	B	815
6	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	F	735
7	40°C	6-6,5 pu	9× Inércia	4000V	F	1100
8	40°C	6-6,5 pu	9× Inércia	6600V	B	1150
9	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	B	980
10	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	F	770
11	60°C	3-3,5 pu	9× Inércia	4000V	F	1000
12	60°C	3-3,5 pu	9× Inércia	6600V	B	1200
13	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	F	770
14	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	B	1200
15	60°C	6-6,5 pu	9× Inércia	4000V	B	1300
16	60°C	6-6,5 pu	9× Inércia	6600V	F	1100

Fonte: Autoria Própria.

De acordo com a Equação 7, é possível ver que o Fator C tem uma forte correlação com o pacote de chapas L_{Ferro1} . A Figura 35 mostra aumentando-se o pacote de chapas no experimento, o Fator C decai quase que linearmente.

Figura 35 – Correlação entre o Fator C e o pacote de chapas L_{Ferro1} .

Fonte: Autoria Própria.

É possível ver através da Tabela 17 que a condição de partida $Tr_b > Ta$ foi atendida para todos os experimentos. Esses dados foram coletados diretamente do perifé-

rico do NEWTON chamado WBUEGEL conforme comentado no Capítulo 4.

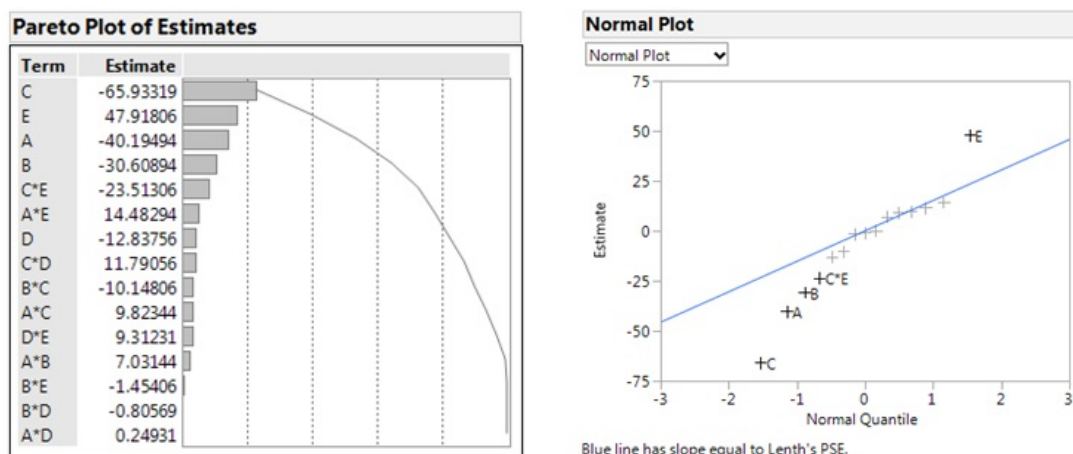
Tabela 17 – Tempo de rotor bloqueado e tempo de aceleração para todos os tratamentos da 1ª rodada.

Tratamento	Trb(s)	Ta(s)
1	17,60	13,87
2	31,00	17,81
3	58,50	57,53
4	58,50	53,00
5	7,10	6,65
6	7,30	6,86
7	24,80	23,00
8	26,30	24,87
9	54,00	21,90
10	21,00	14,80
11	68,00	63,17
12	85,10	65,10
13	7,10	6,16
14	16,60	9,92
15	30,00	23,64
16	22,50	21,74

Fonte: Autoria Própria.

A partir da geração da matriz experimental com os dados da variável resposta é possível fazer a análise da significância estatística dos fatores em relação à variável resposta através do método de Lenth. O gráfico de Pareto está exposto na Figura 36 junto ao gráfico da Distribuição Normal. Como já exposto no capítulo 3, o Pareto mostra por ordem o nível de influência, ou seja o efeito que cada grau de liberdade influenciou na variável resposta, já a Distribuição Normal mostra quais desses se destacaram e foram os mais influentes.

Figura 36 – A esquerda o gráfico de Pareto e a direita o gráfico de Distribuição Normal.



Fonte: Autoria Própria.

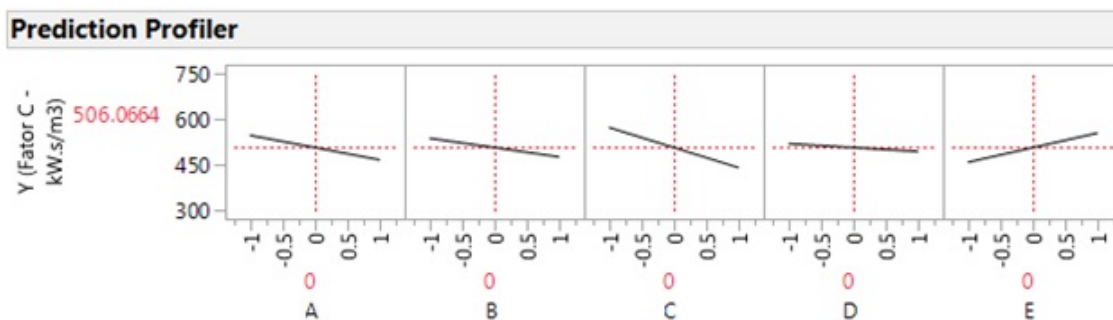
É importante notar que a partir desses gráficos é possível perceber que os fatores que se destacaram foram o C, E, A e B, e a interação C*E, estes em ordem por nível de significância. A coluna "Estimate" no Pareto mostra o coeficiente o qual será utilizado para construção da fórmula do modelo do experimento para futuras previsões a partir de dados de entrada novos. Esse "Estimate" é calculado da seguinte forma:

$$\text{Estimate} = \frac{\text{Efeito do GL}}{2} \quad (30)$$

O valor do Estimate pode ser negativo ou positivo, caso o valor apareça como negativo, isso significa que ao passar do nível menor (-1) para o maior(+1), a variável resposta será reduzida em 2 vezes o valor do Estimate desse grau de liberdade e caso apareça positivo o efeito será de aumento da variável resposta em duas vezes.

Outro gráfico, o qual facilita no entendimento da relação entre a variável resposta e os fatores do experimento é o gráfico de Perfil de Predição exibido na Figura 37. A partir desse, é possível observar o comportamento da variável resposta para os diferentes níveis dos fatores selecionados. É possível notar novamente que os fatores que se destacam são os fatores C, E e A, os quais são a Inércia da Carga, Classe de Elevação e Temperatura Ambiente. O fator B, Corrente de Partida não teve tanta influência no experimento, já o fator D, Tensão, influenciou muito pouco o experimento. À esquerda do gráfico é exibido o valor médio da variável resposta para os 16 tratamentos. O valor ficou em torno de $506 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$, próximo ao valor da literatura o qual é $560 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ para o motor base.

Figura 37 – Relação entre os fatores e a variável resposta.



Fonte: Autoria Própria.

Apesar de conseguir observar o impacto de cada fator na variável resposta na Figura 37, é necessário ainda aplicar o método de Lenth para identificar se os graus de liberdade expostos no gráfico de Pareto são relevantes estatisticamente. Para isso, deve-se calcular os parâmetros S_o , PSE, ME e SME para verificar a partir do Pareto se esses fatores são realmente significantes na variável resposta. Da Figura 36 é possível retirar o valor da mediana dos Graus de Liberdade do experimento. A mediana é o valor intermediário de uma distribuição, ou seja aquele que está exatamente no meio, logo a mediana será 11.79056 tomando como valores os "Estimates" dos fatores expostos na Figure 38. A partir da mediana é possível calcular o valor de S_o

$$S_o = 1,5 \times mediana|C_j| = 17,68584 \tag{31}$$

Porém, para calcular o valor do PSE, deve-se ainda retirar a mediana de efeitos que são menores que 2,5 vezes o valor de S_o , o que levaria a retirar a mediana de efeitos os quais possuem um Estimate menor que 44,2146 em módulo. Logo a nova mediana para o cálculo do PSE será 10,14806 e a partir desse valor é possível calcular o novo valor do PSE e também os valores de ME e SME. Para efeitos de cálculo, como o experimento proposto teve 15 Graus de Liberdade, foram considerados os valores da segunda linha da Tabela 5 o cálculo do ME e do SME.

$$PSE = 1,5 \times mediana|C_j| = 15,2221 \tag{32}$$

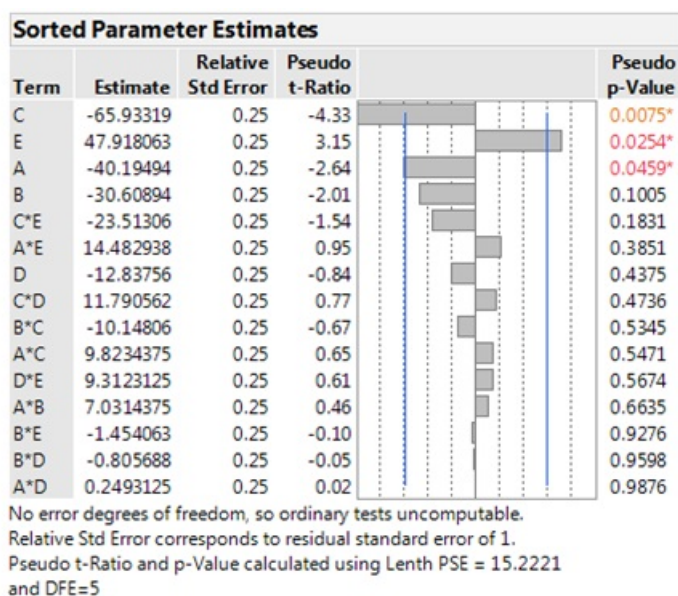
$$ME = t_{0,975;d} \times PSE = 39,1207 \tag{33}$$

$$SME = t_{\gamma;d} \times PSE = 79,4593 \tag{34}$$

Com esses valores é possível analisar no gráfico da Figura 38, qual fator é realmente estatisticamente relevante para a variável resposta. A linha em azul simboliza o valor de corte de ME, o que significa que os fatores com o Estimate acima desse

ponto de corte são relevantes estatisticamente. Logo, apenas a Inércia da Carga - C, Classe de Elevação - E e Temperatura Ambiente - A possuem forte influência na variável resposta Fator $C(kW \cdot s/m^3)$ nesse experimento.

Figura 38 – Gráfico do Estimates organizados pela significância.



Fonte: Autoria Própria.

Durante o primeiro experimento, observou-se que os valores de elevação de temperatura dos projetos ficaram muito distantes do valor proposto na metodologia, logo não foi possível atingir um ponto ótimo em todos os tratamentos em função do valor alto da inércia da carga para o maior nível, o qual foi 9 vezes a inércia motor. Os valores de elevação dos 16 tratamentos foram registrados e se encontram na Tabela 18.

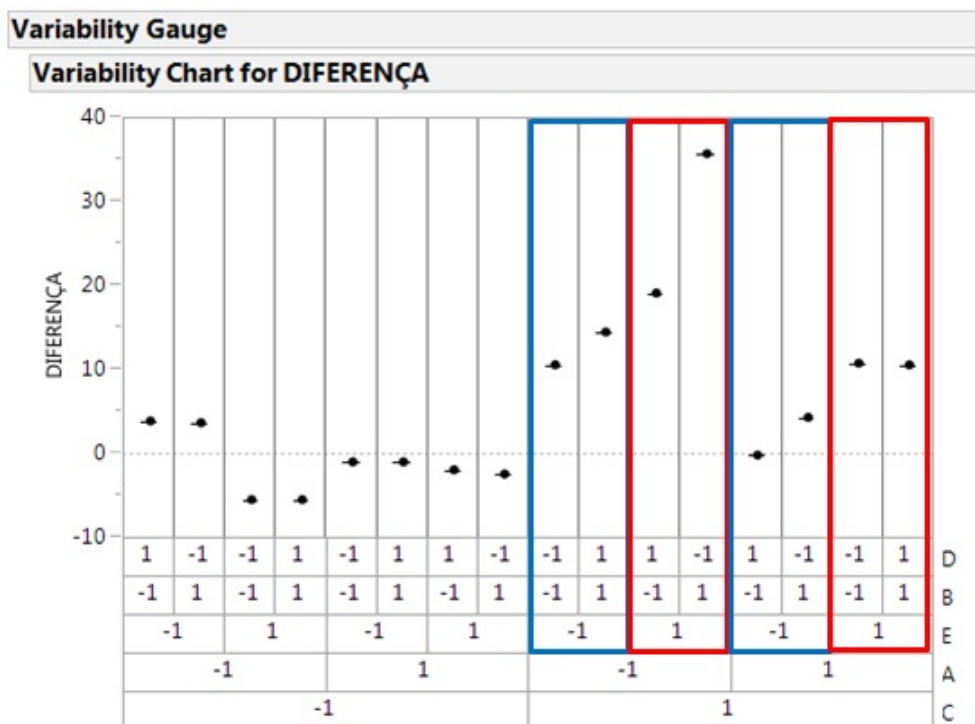
Tabela 18 – Elevação de temperatura da máquina em operação para os 16 tratamentos.

Tratamento	Elevação(K)	Elevação Esperada(K)	Diferença(K)
1	89,3	83,76	-5,54
2	60	63,82	3,82
3	53,3	63,82	10,52
4	64,7	83,76	19,06
5	60,2	63,82	3,62
6	89,3	83,76	-5,54
7	48,1	83,76	35,66
8	49,4	63,82	14,42
9	48,9	47,86	-1,04
10	69,8	67,81	-1,99
11	57,1	67,81	10,71
12	48,1	47,86	-0,24
13	70,3	67,81	-2,49
14	48,9	47,86	-1,04
15	43,6	47,86	4,26
16	57,3	67,81	10,51

Fonte: Autoria Própria.

A partir da Tabela 18 é possível verificar que nos tratamentos 3,4,7,8,11 e 16 a elevação de temperatura em operação registrada ficou longe da elevação permitida pela classe de elevação determinada pelo experimento, sendo está já corrigida pelo fator 1,25 devido à influência do ensaio da máquina base citado no capítulo anterior. Todos esses tratamentos citados tinham o nível(+) de Inércia de Carga como é possível ver pela Tabela 14. Para auxiliar essa observação, analisou-se o a Figura 39 de Medição de Variabilidade da Diferença(K) de temperatura em relação à Elevação Esperada(K).

Figura 39 – Variação da elevação de temperatura em função dos fatores e seus respectivos níveis.



Fonte: Autoria Própria.

Analisando a Figura 39 é possível observar que quando a Inércia da Carga - C está no nível (-1) ou seja o nível menor, os valores registrados de elevação de temperatura da máquina ficam próximos ao valor de elevação de temperatura definido no experimento, o que significa que a máquina estaria no seu limite térmico, logo a variável resposta conseguiu ser elevada ao seu máximo. Porém, quando a Inércia da Carga - C está no nível(+1), esses mesmos valores se distanciam de zero, logo a diferença entre a elevação de temperatura observada e a definida pelo experimento está distante. É ainda possível observar que níveis diferentes de Temperatura Ambiente - A e Classe de Elevação - E também geram variações diferentes, quando o nível desses fatores é (-1) o menor, a diferença da elevação(K) aumenta e quando o nível é (+1) a diferença da elevação(K) diminui. Esse comportamento se deve ao fato de que para temperaturas menores a máxima elevação permitida em operação é maior, logo a diferença da elevação em operação e da Classe de Elevação determinada pelo experimento aumentará, já para temperaturas maiores o efeito será oposto. Outro fator que ainda tem influência é a Corrente de Partida - B, já que para correntes de partida maiores, a diferença de elevação em geral será maior, o que está relacionado ao fluxo da máquina, pois fluxos altos levam a tempos de rotor bloqueado menores e apesar de a máquina possuir mais torque para partir a carga, a inércia se mostrou tão alta que só o aumento do torque não foi suficiente para compensar a perda do tempo de rotor

bloqueado devido a alta corrente de partida. Portanto, foi necessário dar uma folga maior no tempo de rotor bloqueado da máquina, inserindo uma maior seção de cobre, o que aumentou o tempo de rotor bloqueado, porém impediu um aumento no Fator C da máquina, evitando assim um ponto ótimo no projeto o qual seria uma diferença de elevação(K) baixa.

5.1.1 Conclusão do 1º DOE

Após analisar a 1ª rodada, vimos que os valores da variável resposta do experimento ficaram próximos à literatura exibida no capítulo 2 com algumas variações devido às condições de contorno impostas ao projeto, sendo que o valor médio foi de $506 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ e o da literatura está em $560 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$.

Os graus de liberdade que mais se destacaram no experimento e influenciaram a variável resposta foram em ordem a Inércia da Carga - C, a Classe de Elevação - E, a Temperatura Ambiente - A, a Corrente de Partida - B e a interação C*E entre a Inércia da Carga e a Classe de Elevação.

À medida que a Inércia da Carga é aumentada a variável resposta tende a diminuir, pois é necessário aumentar o volume ativo do motor para que se eleve o tempo de rotor bloqueado e como consequência, atenda a condição de $T_{rb} > T_a$ para que a partida seja atendida. Porém, ficou visível que o nível (+) desse fator teve um valor exacerbado no experimento o que por consequência fez com que esse fator influenciasse mais do que a Temperatura Ambiente e a Classe de Elevação e também do que a Corrente de Partida - B, gerando a diferença de temperatura registrada na Tabela 18.

No início do experimento não se esperava essa diferença de elevação(K) grande, pois como o objetivo era diminuir ao máximo o volume ativo para maximizar a variável resposta, logo a diferença de elevação(K) deveria estar sempre próxima ao limite, porém altos valores de Inércia da Carga - C fizeram com que essa condição não seja atendida.

Dentre os cinco fatores escolhidos, o único fator o qual não foi impactante, foi a Tensão - D. Apesar de valores maiores de Tensão exigirem uma maior isolação dos condutores na ranhura do estator, a diferença entre 6600 V e 4000 V os quais foram os níveis escolhidos para esse fator, não foi suficiente para que essa variável se tornasse impactante na variável resposta, pois um possível aumento da densidade de corrente $J(\frac{A}{\text{mm}^2})$ causado por esse aumento de isolação foi irrelevante graças aos outros fatores que tiveram que ser compensados em uma intensidade maior. Portanto, os outros fatores foram mais determinantes no aumento da seção de cobre na ranhura do estator do que a Tensão de alimentação da máquina.

É bom salientar que caso o nível positivo (+) da Tensão fosse maior do que os 6600 volts aplicado ao experimento, esse fator poderia ter uma relevância maior na

variável resposta, pois quanto maior o nível de Tensão, maior deve ser a isolação dos condutores na ranhura.

Para essa rodada, o maior valor registrado da variável resposta aconteceu no primeiro tratamento, o que não era esperado, pois como foi teorizado no capítulo 4, esperava-se que valores altos do fator Corrente de Partida - B levariam a um maior valor da variável resposta, o que não foi observado nesse experimento. É importante também registrar que quase todos os fatores seguiram a previsão feita no planejamento do DOE, exceto o fator B o qual foi a Corrente de Partida. No capítulo anterior, foi previsto que quando se aumenta a Corrente de Partida de um Motor de Indução, seu Fator C tende a aumentar, porém o que se observou ao longo do experimento foi o oposto. Isso se deve ao fato de que para que se possa maximizar a variável resposta, deve-se diminuir o volume ativo desta, porém, caso a corrente de partida esteja em um nível alto, o fluxo da máquina também será alto, logo diminuindo o pacote de chapas da máquina, variável L_{Ferro1} da Equação 7, a máquina ficará com níveis de indução nos pontos do entreferro e também nos dentes e nas coroas do estator e do rotor não adequados para um projeto, o que acarretará em um aumento do volume ativo do motor para compensar essa saturação, que por consequência reduzirá a variável resposta.

O que se pode concluir disso, é que para se obter Correntes de Partidas altas, deve-se aumentar o fluxo magnético do motor e esse aumento é mais influente no aumento do volume ativo do motor do que uma compensação no volume ativo devido ao aumento no número de espiras e, portanto, diminuição da seção de cobre útil da ranhura do estator para se obter um baixo nível de fluxo magnético e consequentemente baixos valores de Corrente de Partida. Logo, houve uma divergência em relação a previsão para esse fator no início do experimento, porém, não significa que isso acontecerá para todos os casos, pois apenas foi avaliada uma situação. Deve-se portanto avaliar condições de contorno diferentes para que essa hipótese seja uma verdade, como por exemplo, uma aplicação que tenha como condição mandatória uma partida com tensão reduzida, que por consequência dificultará a partida de motores que possuam um fluxo baixo, já que o fluxo da máquina é diretamente proporcional ao torque.

O menor valor registrado da variável resposta esteve no tratamento número 15 o qual também teve o maior comprimento L_{Ferro1} do pacote de chapas. Esse tratamento continha as piores condições previstas para os fatores A, C e E, ou seja, Temperatura Ambiente alta, Inércia da Carga alta e Classe de Elevação baixa o que impactou em um aumento no volume ativo da máquina para compensar essas condições desfavoráveis. Apesar de o nível do fator B ser alto - para o qual foi previsto uma condição considerada favorável - foi constatado ao longo do experimento que esse nível seria a pior condição, fazendo portanto com que 4 dos 5 fatores observados estivessem em sua pior condição, corroborando com o resultado encontrado na variável resposta.

O único fator o qual esteve no nível inferior era a Tensão - D, porém como fora explicado e observado, esse fator não teve grande impacto na variável resposta, logo, o fato desse fator estar no nível (+) se tornou algo irrelevante.

5.2 ANÁLISE DO 2º DOE

Na análise do 2º DOE, também foram executados os 16 tratamentos da matriz experimental (Figura 14) e registrados os valores da variável resposta (Y1) - Fator C, para cada tratamento. A matriz experimental com os dados da variável resposta estão exibidos na Tabela 19. A segunda rodada foi realizada com o intuito de verificar o efeito da diminuição do nível positivo (+) da Inércia da Carga - C, na variável resposta e tentar identificar possíveis alterações dos efeitos dos outros fatores. Primeiro foi realizado um modelo fracionado o qual é útil no início do projeto e depois foi feito um modelo completo o qual é mais utilizado em fins de projeto, esse apenas com os fatores que se tornaram efetivamente relevantes na variável resposta e partir desse modelo, se construiu um modelo preditivo para a variável resposta a partir dos fatores relevantes. No decorrer dessa análise foram inseridas também outros parâmetros para serem analisados em função dos mesmos fatores. Esses parâmetros respostas são: o Kre e o Krr.

Tabela 19 – Matriz experimental com a variável resposta.

Tratamento	A	B	C	D	E	Y1
1	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	F	682,409
2	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	B	557,724
3	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	4000V	B	577,453
4	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	6600V	F	612,364
5	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	B	574,027
6	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	F	618,331
7	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	4000V	F	534,219
8	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	6600V	B	497,948
5	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	B	480,928
10	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	F	608,518
11	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	4000V	F	555,198
12	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	6600V	B	393,841
13	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	F	608,884
14	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	B	389,595
15	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	4000V	B	350,420
16	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	6600V	F	522,820

Fonte: Autoria Própria.

É possível perceber que os valores da variável resposta para essa rodada também ficaram próximos aos da literatura exibida na Figura 8. O valor do kW/rps do motor base escolhido fica em torno de 300. Observando o eixo das ordenadas e tomando

como referência a linha preta para máquina abertas, o Fator C cairia em torno de 560, próximo ao alcançado no experimento, como mostra na Tabela 19 a qual possui valor médio entre os experimentos de $535,2924 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$. O valor médio da variável resposta já mostra por si só que a mudança do nível positivo da Inércia da Carga de 9 vezes a Inércia do Motor Base para 5 vezes a Inércia do Motor Base fez com que esse fator influenciasse menos no resultado final, fazendo com que os outros fatores se tornassem mais relevantes, como será percebido nas análises posteriores.

Como a variável resposta é inversamente proporcional ao pacote de chapas L_{Ferro1} de acordo com a Equação 7 e as outras variáveis se mantiveram constantes durante o experimento, é possível dizer que a variável resposta tem uma relação muito forte com o comprimento do pacote de chapas. Na Tabela 16 é possível ver o comprimento registrado para cada tratamento do experimento.

Tabela 20 – Comprimento do pacote de chapas L_{Ferro1} em milímetros para cada tratamento do experimento do 2º DOE.

Tratamento	A	B	C	D	E	$L_{Ferro1}(\text{mm})$
1	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	F	690
2	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	B	850
3	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	4000V	B	820
4	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	6600V	F	780
5	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	B	815
6	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	F	760
7	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	4000V	F	850
8	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	6600V	B	950
9	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	4000V	B	980
10	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	6600V	F	770
11	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	4000V	F	850
12	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	6600V	B	1200
13	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	4000V	F	770
14	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	6600V	B	1200
15	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	4000V	B	1300
16	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	6600V	F	900

Fonte: Autoria Própria.

É possível ver na Tabela 21 que a condição de partida $Trb > Ta$ foi atendida para todos os experimentos. Esses dados foram coletados diretamente do periférico do NEWTON chamado WBUEGEL conforme comentado no Capítulo 4.

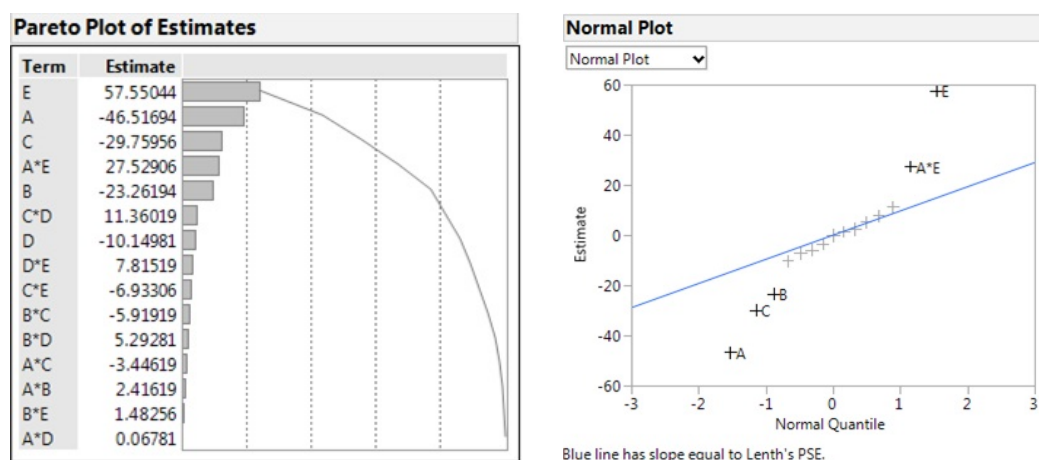
Tabela 21 – Tempo de rotor bloqueado e tempo de aceleração para todos os tratamentos do 2º DOE.

Tratamento	Trb(s)	Ta(s)
1	20,30	14,41
2	31,00	17,81
3	31,50	30,76
4	37,50	34,39
5	7,10	6,65
6	8,10	7,46
7	12,40	11,16
8	12,80	12,31
9	54,00	21,90
10	21,00	14,80
11	44,00	33,12
12	85,10	39,72
13	7,10	6,16
14	16,60	9,92
15	31,30	15,82
16	14,60	13,91

Fonte: Autoria Própria.

Novamente como no DOE anterior, a partir da geração da matriz experimental, junto ao auxílio do software JMP, é possível fazer a análise estatística dos fatores em relação à variável resposta observando o gráfico de Pareto e também o gráfico da Distribuição Normal que estão expostos na Figura 40. Além dessas ferramentas, também deve-se fazer a análise através do método de Lenth.

Figura 40 – A esquerda o gráfico de Pareto e a direita o gráfico de Distribuição Normal para a 2ª rodada.



Fonte: Autoria Própria.

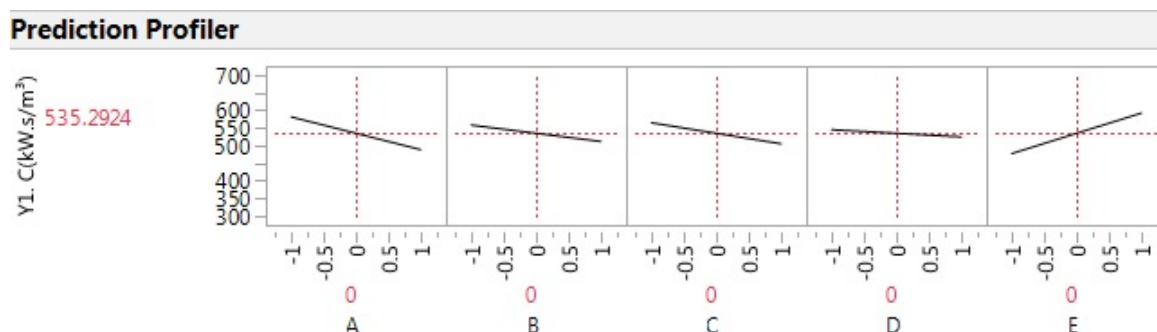
Observando o gráfico da Distribuição Normal exibido na direita da Figura 40,

pode-se verificar que os graus de liberdade que foram estatisticamente significativos foram em ordem o fator Classe de Elevação - E, seguido pela Temperatura Ambiente - A, logo após vê-se a Inércia da Carga - C seguido pela interação dos fatores A*E e por último a Corrente de Partida - B. Portanto, os mesmos fatores observados na primeira rodada, porém a diferença aqui está no impacto de cada fator. No 1º DOE, o fator que se mostrou mais relevante para a variável resposta foi a Inércia da Carga - C, já para o 2º DOE, a Classe de Elevação teve a maior influência e isso teve relação direta com a diminuição do nível positivo (+) da Inércia da Carga, o que fica bem claro quando se observar o gráfico do Perfil de Predição dos fatores. Ainda é bom salientar que, apesar de haver mudanças nas influências dos fatores, o fator Tensão - D ainda se tornou irrelevante em relação à variável resposta.

Observando o gráfico de Pareto, o qual está exibido na esquerda da Figura 40 e tomando como referência os principais graus de liberdade que se destacaram no gráfico de Distribuição Normal, tem-se como base o valor dos Estimates, o quais já foram explicados na análise do 1º DOE. É possível perceber que uma mudança de nível do fator Classe de Elevação - E, causa um acréscimo de 115,1 na variável resposta, já o fator Temperatura Ambiente - A causa um decréscimo de 93,03, o fator Inércia da Carga causa um decréscimo de 59,52, a interação A*E causa um acréscimo de 55,05 e por último o fator Corrente de Partida - B causa um decréscimo de 46,52, isto é o Efeito de cada grau de liberdade no variável resposta, como está exposto na Equação 30.

O próximo passo de análise, assim como no 1º DOE, é verificar o comportamento dos fatores em relação à variável resposta com o gráfico de Perfil de Predição exibido na Figura 41. Diferente do 1º DOE no qual existia um nível positivo (+) exacerbado no fator Inércia da Carga - C, que por consequência o fazia se tornar o fator mais impactante, dessa vez o fator mais impactante na variável resposta foi a Classe de Elevação - E. O fator Temperatura Ambiente - A também se tornou mais relevante, já que é possível ver a sua curva está mais acentuada em relação à da Figura 37 e como comentado anteriormente o fator Inércia da Carga - C teve a sua curva menos acentuada, justamente pela diminuição do seu nível positivo(+). O fator Corrente de Partida - B se tornou menos relevante dessa vez, e é possível ver isso não só pelo pela diminuição inclinação da curva, mas também pelo nível do valor do Estimate que passou de -30,60894 para -23,26194.

Figura 41 – Relação entre os fatores e a variável resposta.



Fonte: Autoria Própria.

Após verificar o novo comportamento dos fatores no 2º DOE, deve-se aplicar o método de Lenth para identificar se os graus de liberdade expostos no gráfico de Pareto são realmente relevantes estatisticamente. Logo, deve-se novamente calcular os valores de S_o , PSE, ME e SME para verificar a partir do gráfico de Pareto se esses fatores são realmente significantes em relação à variável resposta. Da Figura 40 é possível retirar a mediana da distribuição do Pareto a qual é 7,81519. A partir da medianas dos valores dos Esimates da Figura 40, é possível cálculo o valor de S_o .

$$S_o = 1,5 \times mediana|C_j| = 11,7227 \tag{35}$$

Porém, para calcular o valor do PSE, deve-se ainda retirar a mediana de efeitos que são menores que 2,5 vezes o valor de S_o , o que levaria a retirar a mediana de efeitos os quais possuem um Estimate menor que 29,3069 em módulo. Logo a nova mediana para o cálculo do PSE será 6,426125 e a partir desse valor é possível calcular o novo valor do PSE e também os valores de ME e SME. Para efeitos de cálculo, como o experimento proposto teve 15 Graus de Liberdade, foram considerados os valores da segunda linha da Tabela 5 o cálculo do ME e do SME.

$$PSE = 1,5 \times mediana|C_j| = 9,6391 \tag{36}$$

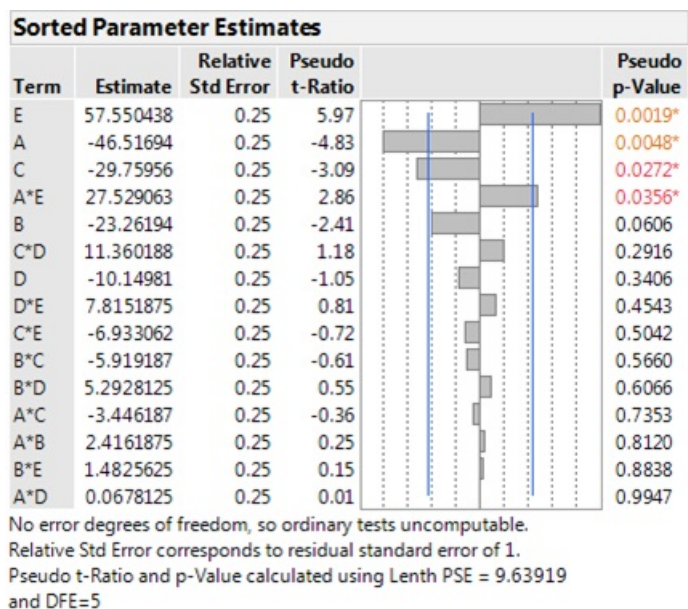
$$ME = t_{0,975;d} \times PSE = 24,7727 \tag{37}$$

$$SME = t_{\gamma;d} \times PSE = 50,3165 \tag{38}$$

A partir desses valores, é possível verificar no gráfico da Figura 42, o fator que é estatisticamente relevante para a variável resposta. Como já dito no 1º DOE, a linha azul representa o ponto de corte ME, o que significa que os fatores com os Estimates acima desse ponto de corte são considerados estatisticamente relevantes. Logo os

fatores realmente relevantes foram: a Classe de Elevação - E, Temperatura Ambiente - A, Inércia da Carga - C e a interação A*E.

Figura 42 – Gráfico do Estimates organizados pela significância.



Fonte: Autoria Própria.

Assim como no 1º DOE, observou-se que os valores de elevação de temperatura em operação nos projetos para que esses não ficassem muito distantes do valor proposto com a metodologia. Além disso, com a diminuição da nível positivo(+) da Inércia da Carga - C, espera-se que esses valores se tornem mais próximos, já que como foi visto na análise de impacto dos fatores, o fator Inércia da Carga - C se tornou menos representativo em relação a variável resposta. Os valores de elevação dos 16 tratamentos foram registrados e se encontram na Tabela 22.

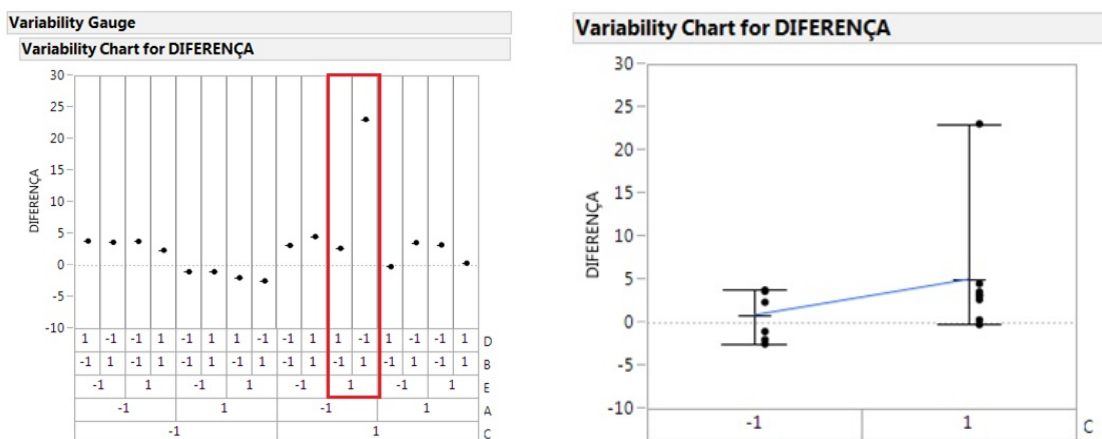
Tabela 22 – Elevação de temperatura da máquina em operação para os 16 tratamentos no 2º DOE.

Tratamento	Elevação(K)	Elevação Esperada(K)	Diferença(K)
1	80	83,76	3,76
2	60	63,82	3,82
3	60,7	63,82	3,12
4	81,1	83,76	2,66
5	60,2	63,82	3,62
6	81,4	83,76	2,36
7	60,7	83,76	23,06
8	59,3	63,82	4,52
9	48,9	47,86	-1,04
10	69,8	67,81	-1,99
11	64,6	67,81	3,21
12	48,1	47,86	-0,24
13	70,3	67,81	-2,49
14	48,9	47,86	-1,04
15	44,3	47,86	3,56
16	67,5	67,81	0,31

Fonte: Autoria Própria.

A partir da Tabela 22 é possível verificar que no 2º DOE apenas o tratamento 7 obteve uma elevação bastante fora da elevação imposta na metodologia do experimento, porém de um modo geral os outros tratamentos obtiveram elevações mais suavizadas e próximas ao ideal. No 1º DOE, o tratamento 7 também possuía a maior disparidade em termos de elevação de temperatura(K), porém com um nível maior. A razão do motivo desse tratamento possuir uma elevação tão alta ainda, é pelo mesmo motivo da 1º DOE. A máquina por ter uma Corrente de Partida - B em um nível alto, entre 6 - 6,5 pu da corrente nominal em plena carga, possui um tempo de rotor bloqueado baixo, o que limita a retirada de material ativo da mesma, para que se atenda a condição de partida da carga, ou seja, caso diminua a seção de cobre da ranhura do estator e o pacote de chapas da máquina para se maximizar a variável respota, a máquina ficará com um tempo de rotor bloqueado abaixo do tempo de aceleração, fazendo com que a partida não seja possível de ser realizada, logo o fator limitante aqui foi novamente a Inércia da Carga - C em conjunto com a Corrente de Partida - B. Para auxiliar essa observação, foi também analisado o gráfico(Figura 43) de Medição de Variabilidade da Diferença(K) de temperatura da Elevação(K) em operação com a Elevação Esperada(K), pelo qual é possível analisar novamente que em apenas um tratamento existiu uma discrepância entre a elevação esperada pelo experimento e a observada na análise do motor em operação.

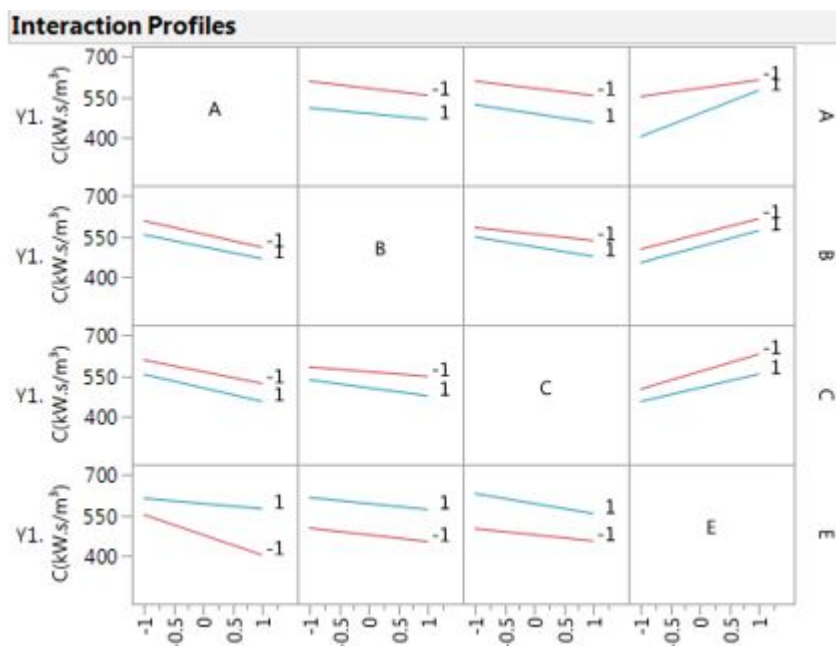
Figura 43 – A esquerda o gráfico de Medição de Variabilidade da Diferença(K) em função dos fatores e seus níveis, já a direita o mesmo gráfico, porém apenas em função do fator Inércia da Carga - C.



Fonte: Autoria Própria.

Tendo em vista que apenas quatro dos cinco fatores foram estatisticamente significativos, após realizar à análise pelo gráficos de Pareto e Distribuição Normal e também pelo Método de Lenth e verificar durante o experimento o impacto não só na variável resposta, mas também no experimento como um todo, foi decidido criar um modelo baseado em apenas os quatro fatores que mais se destacaram: Temperatura Ambiente - A, Corrente de Partida - B, Inércia da Carga - C e Classe de Elevação - E. Com isso, foi possível obter um gráfico o qual permite as análises da influência conjunta desses fatores na variável resposta. Essa gráfico se chama Perfil de Interação, sendo possível de visualizá-lo na Figura 44.

Figura 44 – Gráfico do Perfil de Interação dos fatores que se destacaram no experimento.



Fonte: Autoria Própria.

Como já fora abordado no Capítulo 3 desse trabalho, esse gráfico permite verificar se dois fatores possuem forte interação. Caso as linhas vermelha e azul estejam paralelas, significa que não há interação forte entre os fatores e conforme elas vão chegando perto de se tocarem ou até se cruzarem, a interação vai aumentando, sendo que quando se cruzam a interação é muito forte. É possível ver que os únicos fatores que possuem interação relevante, são o A e o E, e isso já era esperado, pelas análises feitas anteriormente. Tomando o fator A como referência, é possível ver que quando ele está no nível (+1), ou seja, quando a Temperatura Ambiente é 60° Celsius, a variável resposta sofre uma forte variação, quando se alterna o nível do fator E, porém quando o fator A está no nível (-1), ou seja, quando a Temperatura Ambiente é 40° Celsius, a variável resposta não varia muito em relação à mudanças de níveis no fator E. A explicação para essa interação é a seguinte, quando a Temperatura Ambiente é muito alta, a diferença entre a Classe de Elevação de temperatura tem uma grande influência no nível de material ativo que será colocado na máquina, já que para Elevações admissíveis inferiores, terá que se colocar mais material ativo a fim de compensar o nível de Elevação e para Elevações admissíveis superiores, o nível de material ativo que terá que ser colocado será menor, pois a máquina poderá operar mais quente, desde que claro, não ultrapasse sua Classe de Isolação Térmica. Uma máquina que irá operar à Temperatura Ambiente de 60° Celsius com Classe de Elevação F, terá que ter um comportamento parecido em termos de dimensionamento do volume ativo com uma máquina que irá operar à Temperatura Ambiente 40° Celsius com Classe de Ele-

vação B, pois ambas pelo método da resistência, poderão chegar a uma temperatura absoluta em operação de 120° Celsius. Isso pode ser visto, caso seja comparado o fim da curva azul à direita com o início da curva vermelha. Na Figura 45, uma imagem ampliada dessa análise, é possível verificar que esses pontos estão bem próximos em relação à variável resposta, o que corrobora com a afirmação feita.

Figura 45 – Gráfico do Perfil de Interação mostrando a interação entre A e E.



Fonte: Autoria Própria.

5.2.1 O Modelo Reduzido

Após a realização da análise do experimento, e tendo em vista que apenas uma parcela dos graus de liberdade foram realmente estatisticamente significativos, é possível realizar um Fatorial Completo e com isso, um modelo reduzido baseado em uma equação $Y = f(x) + \epsilon$, para que se consiga obter valores da variável resposta em função dos cinco fatores escolhidos, porém, com níveis que podem flutuar entre os valores (-1) e (+1) impostos no início do experimento. Esse método é uma das maneiras de se prever o comportamento da variável resposta perante outros níveis dos fatores, desde que eles estejam entre os níveis escolhidos para cada fator.

Logo, a partir de 15 graus de liberdade, foi montado um modelo baseado em regressão linear múltipla com apenas cinco desses, os quais tinham maior influência na variável resposta. Essa modelo é possível de ser visto na Figura 46.

Figura 46 – Equação $Y = f(x)$ com os graus de liberdade que mais impactaram a variável resposta.

Response Y1. C(kW.s/m ³)	
Summary of Fit	
RSquare	0.947532
RSquare Adj	0.921298
Root Mean Square Error	26.05178
Mean of Response	535.2924
Observations (or Sum Wgts)	16
Prediction Expression	
535.2924375	
+ -46.5169375 • A	
+ -23.2619375 • B	
+ -29.7595625 • C	
+ 57.5504375 • E	
+ A • (E • 27.5290625)	

Fonte: Autoria Própria.

A partir do momento que é realizado um modelo reduzido, todos os outros graus de liberdade os quais foram deixados para trás se tornam ruído no nosso modelo, e é aqui que a análise do RSquare ou R^2 e do RSquare Adjusted ou R_{Adj}^2 tornam-se relevantes. O R^2 é o coeficiente de determinação, o qual é uma medida descritiva de quanto o modelo criado se ajustou em relação à aquilo que foi observado com os dados já obtidos no experimento, logo, como o R^2 foi de 0,947532, isso significa que os graus de liberdade A, B, C, E e AE representam aproximadamente 94,75% da variação gerada no experimento. Segundo (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?), valores de R^2 acima de 0,75 significam um bom ajuste para o modelo, contudo, apenas o R^2 apenas não é uma boa indicativa que o modelo seja adequado, pois é sempre possível aumentar o valor dessa variável se adicionando mais graus de liberdade, porém esses graus de liberdade podem ser irrelevantes para o modelo, logo é importante que se avalie o R_{Adj}^2 , o qual leva em conta também a quantidade de graus de liberdade incluídas no modelo e inclusive deve-se observar caso os valores dessas variáveis sejam muito distantes, pois caso sejam, o modelo estará com muitos graus de liberdade incluídos que não são relevantes para o mesmo. Ainda observando a Figura 46, é possível ver que o valor de R_{Adj}^2 foi de 0,921298, o que significa que os graus de liberdade já citados, correspondem a uma variação de aproximadamente 92% no experimento.

Outro ponto interessante para se analisar, é a RMSE - Raiz Quadrada do Erro Médio ou Root Mean Square Error, a qual pode ser visualizada na Figura 46, a inter-

pretação dessa variável é a diferença entre o valor predito pelo modelo e o observado no experimento, pela diferença total dos graus de liberdade do início do experimento com os graus de liberdade utilizados no modelo realizado, ou seja, é a medida do quão espaçados estão os pontos preditos dos pontos observados. A interpretação é de que quanto menor esse valor, mais confiável é o modelo. Como o obtido no modelo do trabalho foi de 26,0578, isso significa que o mesmo teve uma boa aderência com aquilo que se foi observado.

O R^2 pode ser calculado da seguinte forma (QUININO; REIS; BESSEGATO, 1991):

$$R^2 = \frac{SS_{modelo}}{SS_{total}} = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{Y}_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (39)$$

Onde,

R^2 = Coeficiente de Determinação

SS_{modelo} = Soma dos Quadrados do Modelo

SS_{total} = Soma Total dos Quadrados

O R^2_{Adj} pode ser calculado da seguinte forma (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?):

$$R^2_{Adj} = 1 - \frac{\frac{SS_{error}}{DF_{error}}}{\frac{SS_{total}}{DF_{total}}} \quad (40)$$

Onde,

R^2_{Adj} = Coeficiente de Determinação Ajustado

SS_{error} = Soma dos Quadrados dos Resíduos

DF_{error} = Diferença Entre os Graus de Liberdade do Modelo e do Experimento

DF_{total} = Graus de Liberdade Total

Sendo que o SS_{error} pode ser calculado da seguinte forma (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?):

$$SS_{error} = SS_{total} - SS_{modelo} \quad (41)$$

Tendo $DF_{total} = DF_{total}$, o DF_{error} pode ser calculado da seguinte forma (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?):

$$DF_{error} = DF_{total} - DF_{modelo} \quad (42)$$

Onde,

DF_{modelo} = Graus de Liberdade do Modelo

Já o RMSE pode ser calculado da seguinte forma (PIUCCO; SGUISSARDI; SCHURT; SILVA, 200-?):

$$RMSE = \sqrt{\frac{SS_{error}}{DF_{error}}} \quad (43)$$

Onde,

RMSE = Raiz Quadrada do Desvio Padrão

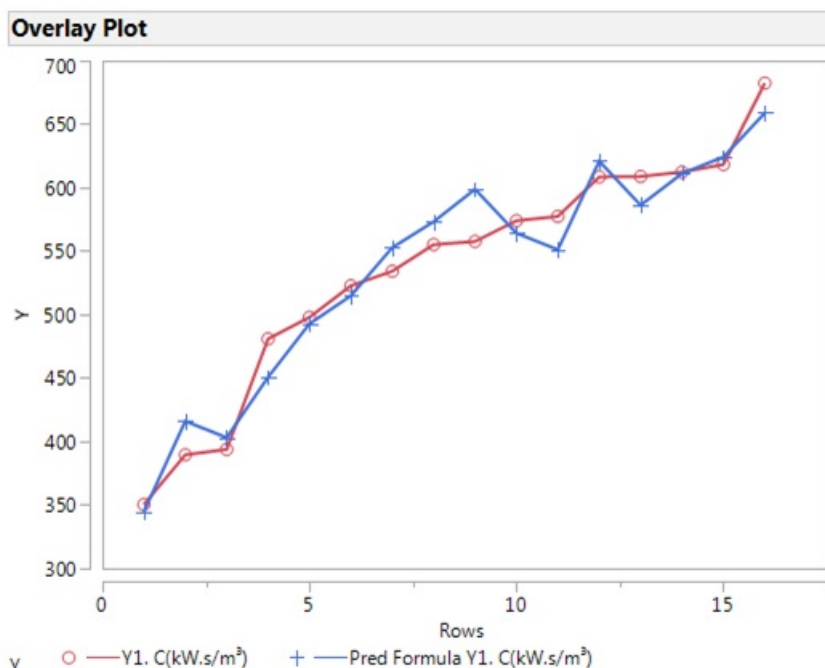
A partir desse modelo, foi calculado de acordo com a Matriz Experimental da Figura 14, os valores para cada um dos 16 tratamentos e a partir disso foi construída a Tabela 23 que mostra todos os valores preditos pela equação. A Figura 47 exhibe um comparativo entre os valores encontrados pelo modelo e os observados no experimento, em azul estão os valores encontrados pelo modelo e em vermelho os valores encontrados no experimento.

Tabela 23 – Comparação dos resultados encontrados a partir do modelo e do experimento.

Tratamento	A	B	C	E	Y1 - C(kW · s/m ³)	Y1 - Modelo. C(kW · s/m ³)
1	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	F	682,409	664,852
2	40°C	3-3,5 pu	3× Inércia	B	557,724	604,810
3	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	B	577,453	545,290
4	40°C	3-3,5 pu	5× Inércia	F	612,364	605,333
5	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	B	574,027	558,286
6	40°C	6-6,5 pu	3× Inércia	F	618,331	618,328
7	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	F	534,219	558,809
8	40°C	6-6,5 pu	5× Inércia	B	497,948	498,767
9	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	B	480,928	456,718
10	60°C	3-3,5 pu	3× Inércia	F	608,518	626,877
11	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	F	555,198	567,357
12	60°C	3-3,5 pu	5× Inércia	B	393,841	397,198
13	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	F	608,884	580,353
14	60°C	6-6,5 pu	3× Inércia	B	389,595	410,194
15	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	B	350,420	350,675
16	60°C	6-6,5 pu	5× Inércia	F	522,820	520,834

Fonte: Autoria Própria.

Figura 47 – Visualização do modelo predito e do resultado das observações do experimento.



Fonte: Autoria Própria.

Após gerar o modelo, também foi proposto a verificação do mesmo em mais três tratamentos criados a para a validação do modelo. Os níveis dos fatores nesses três tratamentos e os resultados encontrados podem ser vistos na Tabela 24. É possível observar que o modelo teve uma boa aderência, já que nos três tratamentos criados, o valor da variável resposta ficou muito próximo ao predito.

Tabela 24 – Tabela da validação do modelo com três tratamentos adicionais.

Tratamento	A	B	C	E	Y1 - C(kW · s/m³)	Y1 - Modelo. C(kW · s/m³)
1	45°C	5-5,5 pu	4,5× Inércia	F	583,760	574,346
2	40°C	4-4,5 pu	4,0× Inércia	F	623,200	615,707
3	50°C	4,5-5 pu	3,5× Inércia	B	534,618	546,788

Fonte: Autoria Própria.

5.2.2 Análise dos Fatores Kre e Krr

Um dos objetivos complementares do trabalho também era a análise de dois parâmetros, o Kre e o Krr perante os mesmos fatores e níveis os quais foram utilizados para fazer a análise da variável resposta Y1 - Fator C. O Kre e o Krr são parâmetros que determinam a utilização da área útil do rotor e do estator em termos de ranhura. As Equações (44) a (49) descrevem como foi feita essa análise.

Com o D_{e1} e o D_1 pode-se calcular a área da seção do estator e com o D_{e2} e o D_{I2} pode-se calcular a área da seção do rotor pelas Equações (44) e (45).

$$\text{Área Seção Estator} = \frac{\pi \times (D_{e1}^2 - D_1^2)}{4} \quad (44)$$

Onde,

D_{e1} = Diâmetro Externo do Estator (m)

$$\text{Área Seção Rotor} = \frac{\pi \times (D_{e2}^2)}{4} \quad (45)$$

Onde,

D_{e2} = Diâmetro Externo do Rotor (m)

Com o $N1$ e $N2$ com a área de cada uma das ranhuras utilizadas, pode-se calcular a área total das ranhuras do estator e do rotor com as equações (46) e (47).

$$\text{Área Total Ranhuras Estator} = N1 \times A_{RE} \quad (46)$$

Onde,

$N1$ = Número de Ranhuras do Estator

A_{RE} = Área da uma Ranhura do Estator (m^2)

$$\text{Área Total Ranhuras Rotor} = N2 \times A_{RR} \quad (47)$$

Onde,

$N2$ = Número de Ranhuras do Rotor

A_{RR} = Área da uma Ranhura do Rotor (m^2)

Com isso, podemos calcular Kre e Krr de forma que:

$$Kre = \frac{\text{Área Total Ranhuras Estator}}{\text{Área Seção Estator}} \quad (48)$$

$$Krr = \frac{\text{Área Total Ranhuras Rotor}}{\text{Área Seção Rotor}} \quad (49)$$

Com isso podemos construir a Tabela 25 referente à cada tratamento formado na matriz experimental com os dados encontrados de Kre e Krr no experimento da 2ª rodada.

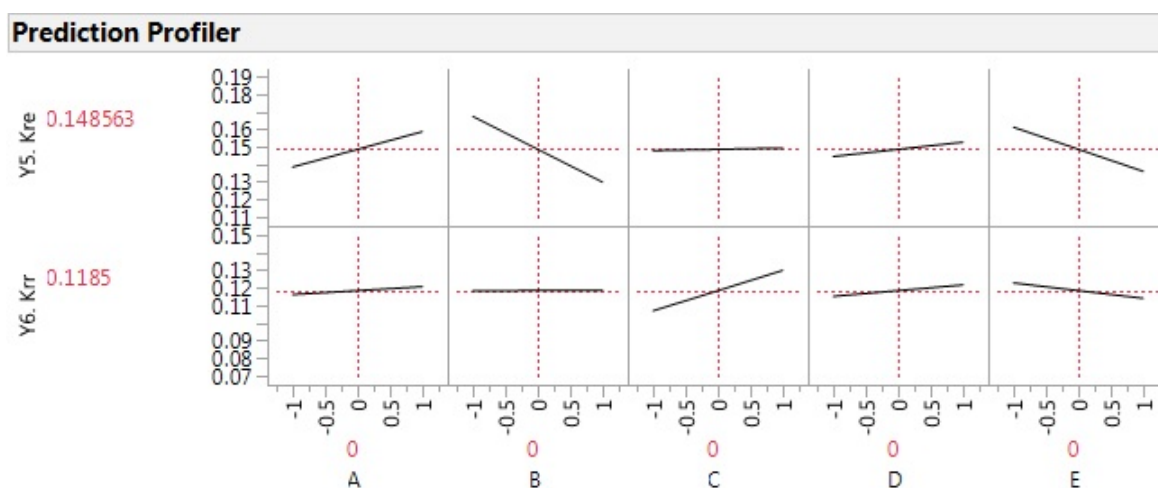
Tabela 25 – Valores de Kre e Krr para cada tratamento da matriz experimental.

Tratamento	Área Seção Estator(m ²)	Área Seção Rotor(m ²)	Área Total Ranhuras Estator(m ²)	Área Total Ranhuras Rotor(m ²)	Kre	Krr
1	0,737	0,480	0,101	0,057	0,137	0,120
2	0,737	0,480	0,136	0,058	0,184	0,120
3	0,737	0,480	0,122	0,048	0,166	0,101
4	0,737	0,480	0,109	0,057	0,148	0,119
5	0,737	0,480	0,090	0,042	0,122	0,088
6	0,737	0,480	0,082	0,050	0,111	0,104
7	0,737	0,480	0,084	0,069	0,114	0,144
8	0,737	0,480	0,093	0,064	0,126	0,134
5	0,737	0,480	0,136	0,062	0,184	0,129
10	0,737	0,480	0,130	0,047	0,176	0,098
11	0,737	0,480	0,113	0,057	0,154	0,119
12	0,737	0,480	0,139	0,068	0,189	0,141
13	0,737	0,480	0,085	0,036	0,115	0,074
14	0,737	0,480	0,113	0,059	0,154	0,123
15	0,737	0,480	0,121	0,070	0,164	0,147
16	0,737	0,480	0,098	0,065	0,133	0,135

Fonte: Autoria Própria.

Após registrar os valores de Kre e Krr para cada experimento com o auxílio do software NEWTON, foi utilizado o software JMP para fazer a análise de cada fator do experimento com o objetivo de verificar qual fator teve uma influência maior nesses parâmetros. Com isso, assim como feito com a variável resposta - Fator C, foi montado um gráfico de Perfil de Predição o qual é possível ver qual fator foi mais influente na variável de cada parâmetro. Esse gráfico está exposto na Figura 48.

Figura 48 – Gráfico de Perfil de Predição com os cinco fatores do experimento para os parâmetros Kre e Krr.



Fonte: Autoria Própria.

É possível ver aqui que para o Kre, o fator que mais influencia a variação é a Corrente de Partida - B. Para Correntes de Partidas altas, o Kre diminui e para Correntes de Partidas Baixas o Kre aumenta. A razão para esse motivo, é que quando se necessita de Correntes de Partidas Baixas, é necessário aumentar o número de espiras da máquina, para que se diminua o fluxo do motor, porém, para compensar esse aumento no número de espiras, é comum aumentar a seção de cobre do estator para que a máquina não perca seção útil de condutores e por consequência não

aumente a densidade de corrente J_1 no estator, logo isso faz com que a Área Total das Ranhuras do Estator aumente, aumentando assim o Kre. Isso é um fato interessante, pois apesar de o fator Corrente de Partida - B não influenciar diretamente na variável resposta - Fator C, a qual é o volume ativo da máquina e foi analisada anteriormente, esse fator tem um peso no cobre total utilizado no estator da máquina já que o Kre aumentou quando esse fator diminuiu. O fator Temperatura Ambiente - A e Classe de Elevação - E também se mostram significativos. Quando a Temperatura Ambiente é maior, é necessário aumentar a Área Total das Ranhuras do Estator para que se diminua a Elevação de Temperatura e quando a Temperatura Ambiente é menor, o Kre diminui, o que faz o Kre ser diretamente proporcional a esse fator. Para a Classe de Elevação, é possível perceber que a mesma é inversamente proporcional ao Kre, o que faz sentido, já que Classes de Elevação maiores demandam menos cobre a ser utilizado no estator e Classes de Elevação menores demandam mais cobre no estator para que se dê a folga suficiente na temperatura absoluta em operação.

Para o Krr, é possível ver que apenas a Inércia da Carga - C foi relevante. A Inércia da Carga tem relação com o tempo de aceleração de uma máquina, logo, para inércias maiores, foi necessário aumentar o Krr, ou seja, a Área Total das Ranhuras do Rotor, para que se pudesse atender as condições de partida.

5.2.3 Conclusão do 2º DOE

Após analisar a 2ª rodada, vimos que os valores da variável resposta do experimento ficaram próximos à literatura exibida no capítulo 2 com algumas variações devido às condições de contorno impostas ao projeto, sendo que o valor médio foi de $535 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$ e o da literatura está em $560 \text{ kW} \cdot \text{s}/\text{m}^3$.

Os graus de liberdade que se destacaram nessa rodada foram em ordem a Classe de Elevação - E, a Temperatura Ambiente - A, a Inércia da Carga - C e a interação C*E entre a Inércia da Carga e a Classe de Elevação.

Assim como no 1º DOE, o efeito da Inércia da Carga faz em relação à variável resposta se manteve, porém em um grau menor. A medida que esse fator aumenta, a variável resposta tende a diminuir, pois é necessário aumentar o volume ativo do motor para que se eleve o tempo de rotor bloqueado e como consequência, atenda-se a condição de $\text{Trb} > \text{Ta}$.

Para esse DOE, foi possível perceber que após a mudança do nível (+) da Inércia da Carga - de $9 \times \text{Inércia}$ para $5 \times \text{Inércia}$ - que a diferença de elevação(K) entre o esperado para o experimento e o atingido ficou menor, como é possível ver na Tabela 22, já que apenas o 7º tratamento ficou com um valor acima de 5K, o que já havia acontecido no 1º DOE e já fora explicado aqui anteriormente, graças ao alto nível de Corrente de Partida - B, do baixo nível da Temperatura Ambiente - A, do alto nível para a Classe de Elevação - F e do alto nível da Inércia da Carga - C a qual impôs um

aumento no Tr_b da máquina para atender as condições de partida, $Tr_b > Ta$ e curva de torque do motor acima da curva de torque da carga.

Assim como no 1º DOE, o único fator que não teve influência relevante para o experimento foi a Tensão - D, a qual foi mantida no mesmo nível.

Para essa rodada o maior valor da variável resposta foi observado no 1º tratamento, o qual não era esperado, graças ao baixo nível da Corrente de Partida - B, porém, como já foi comentado na Conclusão do 1º DOE, esse baixo nível favorece a máquina em termos de indução, logo é possível retirar mais do seu volume ativo, sem que isso sature o motor nos pontos de indução no dente e coroa do estator e do rotor. Já o menor valor da variável resposta foi observado no tratamento número 15, e assim como no 1º DOE, esse tratamento possuía as condições mais críticas para os fatores, menos a Tensão - D, a qual estava em um nível baixo e como fora explicado e observado, esse fator não foi tão relevante para a variável resposta em comparação aos outros fatores.

Nesse 2º DOE, foi possível ver que o através da Figura 44, que os únicos fatores os quais possuíram interação relevante foram o A e o E, os quais por consequência se relacionam diretamente, já que a Classe de Elevação depende da Temperatura Ambiente a qual o motor será submetido. Também para essa rodada construiu-se um modelo reduzido, o qual teve uma boa aderência, já que possui um R_{Adj}^2 de aproximadamente 0.92, o que fez com o que o modelo ficasse bem próximo ao observado no experimento, como foi possível observar tanto na Figura 47 quanto na Tabela 24 a qual mostrou três casos para verificação de eficácia do modelo.

Para esse DOE, também foram analisados dois parâmetros, o K_{re} e o K_{rr} . Foi possível observar que o maior valor de K_{re} registrado se encontrou no 12º tratamento, o qual possuiu níveis de Temperatura Ambiente - A alto, Corrente de Partida - B baixo e Classe de Elevação de Temperatura - E baixo, o que fez com que se aumentasse a seção de cobre no estator para que se pudesse atender a elevação(K) de temperatura em operação. Também é possível ver através da Figura 48 que esses foram os fatores que mais influenciaram o K_{re} . Nessa imagem também fica mais visível e compreensível a pouca influência da Tensão - D na variável resposta principal do experimento, já que caso a Tensão fosse relevante, a mesma deveria influenciar diretamente no aumento da seção de cobre do estator, o que não foi observado. O menor valor observado foi no tratamento 6, o qual possuiu os três fatores citados em níveis opostos ao observados no maior registro.

Para o K_{rr} é possível ver que o único fator que foi relevante para esse parâmetro foi a Inércia da Carga - C. Assim, foi necessário utilizar uma maior seção de cobre nas barras do rotor para que se pudesse atender a condição de partida da carga.

6 CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista o objetivo desse trabalho como o estudo sobre a influência de cinco fatores - temperatura ambiente, corrente de partida, inércia da carga, tensão de alimentação e a elevação de temperatura admissível em operação no volume ativo de um motor de indução trifásico utilizando a metodologia DOE - Design of Experiments, trabalhou -se no estudo em 2 vertentes: o projeto de um motor trifásico e a aplicação da metodologia DOE.

Com base nessas vertentes, fez-se uma revisão acerca dos conceitos básicos de motores de indução trifásicos e suas aplicações e também uma revisão geral sobre a metodologia utilizado pelo DOE. Com esses conceitos e condições de contorno definidas as quais foram expostas no Capítulo 4, o estudo foi realizado perante duas rodadas do experimento e avaliado sob os critérios do DOE definidos no capítulo 3.

No primeiro DOE, foram utilizados níveis de Inércia da Carga distantes, porém como já discutido no Capítulo 5, essas causaram uma distorção no experimento, fazendo com que a Elevação(K) ficasse muito distante do que foi definido pela condição de contorno. Na Tabela 26 é possível ver a variação gerada por cada um dos cinco fatores escolhidos para o experimento quando esses passam do menor nível (-) para o maior nível(+) na variável resposta Y1 - Fator C ($kW \cdot s/m^3$). Logo conclui-se que o fator que foi mais relevante para a 1ª rodada do experimento foi a Inércia da Carga - C, a qual causou uma redução de $131,68 kW \cdot s/m^3$ na variável resposta quando se aumenta de $3 \times Inércia$ para $9 \times Inércia$. Já na Tabela 16, é possível ver que a diferença entre o maior valor para o menor valor do pacote de chapas utilizado foi de 640mm, o que significa que na pior condição possível, vista pelo tratamento 15. Assim, foi necessário a utilização de 196% a mais de chapas no projeto, ou seja, quase duas vezes mais do que a quantidade utilizada no tratamento 1, a qual teve a condição mais favorável.

Tabela 26 – Efeito de cada fator na variável resposta para a 1ª rodada.

Fator	Efeito em Y1
A	-80,38
B	-61,21
C	-131,86
D	-25,67
E	95,83

Fonte: Autoria Própria.

Para a segunda rodada, foram utilizados níveis de Inércia da Carga mais próximos, a fim de evitar uma distorção causada por esse fator. Como resultado, observou-se valores de Elevação(K) mais coerentes e próximos aos definidos na condição de contorno. Na Tabela 27 é possível ver a variação gerada por cada um dos cinco fato-

res escolhidos para o experimento quando esses passam do menor nível (-) para o maior nível(+) na variável resposta Y1 - Fator C ($kW \cdot s/m^3$). Logo, conclui-se que para esse experimento, o fator que teve mais influência na variável resposta foi a Classe de Elevação - E, a qual, quando é alterada do nível menor "B" para o maior "F", faz com que a variável resposta seja acrescida de 115.,1009 $kW \cdot s/m^3$. Já na Tabela 20, é possível ver que a diferença entre o maior valor para o menor valor do pacote de chapas utilizado nos projetos dos experimentos foi de 610mm o que representa um acréscimo de 188% de pacote de chapas no projeto, o que foi um valor menor do que o observado no 1º DOE, devido à influência dos valores da Inércia da Carga, os quais foram modificados.

Tabela 27 – Efeito de cada fator na variável resposta para a 2ª rodada.

Fator	Efeito em Y1
A	-93,0339
B	-46,5239
C	-59,5191
D	-20,2996
E	115,1009

Apesar desses resultados, é importante salientar que essa análise só será válida para essas condições de contorno. A variável resposta estudada nesse trabalho, depende do método de refrigeração utilizado, logo, motores que utilizam métodos de refrigerações diferentes possuirão outros comportamentos perante esses fatores.

Como sugestão para trabalhos futuros tem-se as seguintes:

- Utilizar o método DOE para avaliar os cinco fatores diante de condições de partidas com queda de tensão, visto que essa é uma condição recorrente para partida de motores em ambientes industriais;
- Ampliar o experimento para a inclusão de outros fatores tais como: diferentes tipos de cargas, diferentes máquinas base com outro tipo de sistema de refrigeração;
- Avaliar outros fatores como variável resposta que também fazem parte de um dimensionamento alvo de um motor, sejam eles: rendimento, fator de potência, torque de partida e torque máximo.

REFERÊNCIAS

AGRAWAL, KC. **Industrial power engineering handbook**. [S.l.]: Elsevier, 2001.

ANTONY, Jiju. **Design of experiments for engineers and scientists**. [S.l.]: Elsevier, 2014.

BONANNI, Carlos Gustavo. **USO COMBINADO DAS TÉCNICAS DOE E SIMULAÇÃO DE MONTE CARLO EM UM PROCESSO DE SOLDAGEM MIG/MAG PULSADO**. 2005. f. 90. Diss. (Mestrado) – UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ, Itajubá.

CHAPMAN, Stephen. **Electric machinery fundamentals**. [S.l.]: Tata McGraw-Hill Education, 2005.

CZITROM, Veronica. One-factor-at-a-time versus designed experiments. **The American Statistician**, Taylor & Francis, v. 53, n. 2, p. 126–131, 1999.

FITZGERALD, Arthur Eugene *et al.* **Electric machinery**. [S.l.]: McGraw-Hill New York, 2003. v. 5.

GALDÁMEZ, EDWOM VLADIMIR CARDOZA. **APLICAÇÃO DAS TÉCNICAS DE PLANEJAMENTO E ANÁLISE DE EXPERIMENTOS NA MELHORIA DA QUALIDADE DE UM PROCESSO DE FABRICAÇÃO DE PRODUTOS PLÁSTICOS**. 2002. f. 121. Diss. (Mestrado) – Unidesidade de São Paulo, São Carlos.

ION, Boldea; SYED, A Nasar. **The Induction Machine Handbook (Electric Power Engineering Series)**. [S.l.]: CRC press, 2001.

MALAGOLI, Almeida Juliana; LUZ, Mauricio; CAMACHO, Roberto Jose. Projeto de Rotor de Máquina de Indução Trifásica Usando o Algoritmo de Evolução Diferencial. *In*: CONGRESSO Brasileiro de Eletromagnetismo. [S.l.: s.n.], 2014.

MONTGOMERY, Douglas C. **Design and analysis of experiments**. [S.l.]: John Wiley & sons, 2017.

MONTGOMERY, Douglas C; RUNGER, George C. **Applied statistics and probability for engineers, (With CD)**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2007.

PIUCCO, Olimpio Robson; SGUISSARDI, Luchese Matheus; SCHURT, Cesar Leonardo. **Six Sigma Green Belt**. [S.l.]: WEG, 200-?

PIUCCO, Olimpio Robson; SGUISSARDI, Luchese Matheus; SCHURT, Cesar Leonardo; SILVA, Tiago Ghiggi Caetano da. **Six Sigma Black Belt**. [S.l.]: WEG, 200-?

QUININO, Roberto C; REIS, Edna A; BESSEGATO, Lupércio F. O Coeficiente de Determinação R² como Instrumento Didático para Avaliar a Utilidade de um Modelo de Regressão Linear Múltipla. **Belo Horizonte: UFMG**, 1991.

RAMM, Axel Júlio. **Procedimento de Calibração e Otimização Estrutural para um Gabinete de Refrigerador**. 2007. f. 197. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

RIBEIRO JÚNIOR, José Ivo. Métodos estatísticos aplicados à melhoria da qualidade. **da UFV**, 2012.

RUNCOS, Fredemar. **Projeto e Análise da Máquina Elétrica Trifásica**. [S.l.]: WEG, 2018.

SILVA, Lucas Dias da. **Aplicação do Fatorial Fracionado no Estudo de Fatores Relacionados ao Preparo de Bebida Não Alcoólica**. 2014. f. 52. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WEG. **DT-6 Motores Elétricos Assíncrono de Alta Tensão**. [S.l.]: WEG, 200-?

WERNKE, PRISCILA AMARAL. **MELHORIA DA QUALIDADE DE UM COMPONENTE ATRAVÉS DA APLICAÇÃO DE FERRAMENTAS DA METODOLOGIA SEIS SIGMA**. [S.l.: s.n.], 2011. Monografia (Bacharel em Engenharia de Produção e Sistemas), UDESC (Universidade do Estado de Santa Catarina), Joinville, Brazil.

YETGIN, Asım Gökhan *et al.* Squirrel Cage Induction Motor Design and the Effect of Specific Magnetic and Electrical Loading Coefficient. **International Journal of Applied Mathematics, Electronics and Computers**, v. 7, n. 1, p. 1–8.