

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA POLITÉCNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

ÂNGELO SHIGUEKI RAGASSI INOUE

**Aplicação de Delineamento de Experimentos Complexos
em um Sistema Robótico de Combate Voltado para Competição**

São Paulo
2023

ÂNGELO SHIGUEKI RAGASSI INOUE

**Aplicação de Delineamento de Experimentos Complexos
em um Sistema Robótico de Combate Voltado para Competição**

Versão original

Trabalho de Formatura apresentado à Escola Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo para obtenção do Diploma de En-
genheiro de Produção

Área de concentração: Engenharia de Produção.

Orientadora: Profa. Dra. Linda Lee Ho

São Paulo
2023

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo-na-publicação

Inoue, Ângelo Shigueki Ragassi

Aplicação de Delineamento de Experimentos Complexos Em um Sistema Robótico de Combate Voltado para Competição / Â. S. R. Inoue – São Paulo, 2023.
74p.

Trabalho de Formatura - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Produção.

1.Delineamento experimental 2.Minimum aberration 3.Minimum setup design 4.Split-plot 5.Split-split-split-plot 6.Fatores de quatro níveis 7.Robótica I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Produção II.t

AGRADECIMENTOS

Aos meus amigos Enzo, Fernando, Gabriel, Gustavo e Renato por terem tornado nosso sonho uma realidade.

A Prof.^a Dr.^a Linda Lee Ho, por ter me acompanhado nesta jornada.

Ao meu avô, meu eterno companheiro.

RESUMO

INOUE, Ângelo Shigueki Ragassi. Aplicação de Delineamento de Experimentos Complexos em um Sistema Robótico de Combate Voltado para Competição. 2023. Trabalho de formatura (Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

O delineamento de experimentos com fatores de dois níveis é uma poderosa ferramenta amplamente utilizada e explorada em contextos industriais e acadêmicos. Construídos sob sua base, existem diversos meios de se estender suas aplicações a fim de se cobrir uma maior gama de cenários, como é o caso dos delineamentos com diferentes níveis de dificuldade de troca (*split plot* e suas variações) e o uso do método da substituição para fatores com número de níveis múltiplo de dois. O foco deste Trabalho de Formatura é apresentar o processo de planejamento, experimentação e análise realizados com objetivo de reduzir o tempo de aceleração de um sistema pertencente a um projeto de robótica voltado para competições de combate. Dentre os aspectos abordados no processo estão: o delineamento de experimentos fatoriais completos e fracionados; o delineamento de experimentos com fatores de diferentes dificuldades de troca; a elaboração de um experimento com número mínimo de trocas; a utilização de um fator de quatro níveis e os critérios para a escolha de um plano experimental adequado. O plano experimental resultante consistiu em um delineamento de experimentos fatorial fracionado 2^{9-4} *split*³*plot* com um fator de quatro níveis, e por meio de sua análise foi possível identificar quais fatores influenciam no tempo de aceleração e obter uma configuração a ser utilizada, resultando em uma significativa redução no tempo de aceleração do sistema que foi crucial para o bom desempenho do projeto em uma competição internacional.

Palavras chave: Delineamento experimental; Minimum aberration; Minimum setup design; Split-plot; Split-split-split-plot; Fatores de quatro níveis, Robótica.

ABSTRACT

INOUE, Ângelo Shigueki Ragassi. Application of Complex Experimental Design in a Competition-Oriented Combat Robotics System. 2023. Trabalho de formatura (Engenharia de Produção) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The design of experiments with two-level factors is a powerful tool widely used and explored in industrial and academic contexts. Built upon its foundation, there are various means to extend its applications in order to cover a wider range of scenarios, such as designs with hard to change factors (split plots and its variations) and the use of the replacement method for factors with four levels. The focus of this Graduation Project is to present the planning, experimentation, and analysis process carried out with the objective of reducing the acceleration time of a system belonging to a robotics project aimed at combat competitions. Among the aspects addressed in the process are: the design of complete and fractional factorial experiments; the design of experiments with hard to change factors; the development of an experiment with the minimum number of setups; the utilization of a four-level factor, and the criteria for choosing an appropriate experimental design. The resulting experimental plan consisted of a fractional factorial 2^{9-4} *split³plot* design with a four-level factor, and through its analysis, it was possible to identify which factors influence the acceleration time and obtain a configuration to be used, resulting in a significant reduction in the acceleration time of the system, which was crucial for the project's performance in an international competition.

Keywords: Experiment planning; Minimum aberration; Minimum setup design; Splitplot; Split-split-split-plot; Four-level factors; Robotics.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Arena de combate de Robôs	18
2	Visualização do projeto do robô	20
3	Motor S28-D4-400X	21
4	Robô Samurai	22
5	Arena <i>Battlebox</i>	23
6	Projeto do sistema em estudo	26
7	Motor NeuMotors 8025	26
8	Eletrônicas controladoras de velocidade utilizadas	27
9	Projeto do sistema em estudo	27
10	Posicionamento do sistema dentro do robô	28
11	Modelo geral de um processo	30
12	Exemplo de Gráfico de Probabilidade Normal	36
13	Representação do <i>Starting Power</i>	50
14	Correias dos tipos Micro-V e WR	51
15	Vista em corte do mancal frontal	53
16	Fatores e níveis levantados	54
17	Plano de experimentos 1	58
18	Plano de experimentos 2	59
19	Plano de experimentos 3	59
20	Plano de experimentos 4	59
21	Plano experimental executado	61
22	Exemplo de gráfico exportado pela controladora	62
23	Exemplo de planilha exportada pela controladora	63
24	Exemplo do funcionamento do algoritmo em <i>Python</i>	64
25	Gráfico de probabilidade normal do segundo estrato	70
26	Gráfico de probabilidade normal do terceiro estrato	71
27	Gráfico de probabilidade normal do quarto estrato	72
28	Gráfico de Interação entre fatores B e H	73
29	Gráfico de resíduos do segundo estrato	74
30	Gráfico de resíduos do terceiro estrato	74
31	Gráfico de resíduos do quarto estrato	75

LISTA DE TABELAS

1	Categorias de Combate de Robôs	18
2	Tabela de um experimento 2^3	35
3	Confundimentos de um experimento 2^{4-1} com gerador $I = ABCD$	38
4	Tabela de um experimento 2^{4-1} com gerador $D = ABC$	38
5	Tabela de contrastes de um experimento 2^3	42
6	Tabela de um experimento 2^3 <i>split plot</i>	42
7	Método da Substituição	46
8	Representação dos Fatores	55
9	Atribuição dos níveis	55
10	Método da substituição aplicado ao fator <i>Timing</i>	56
11	Divisão dos fatores em estratos	57
12	Número mínimo de troca por estrato	58
13	Valores da variável resposta	67
14	Estimadores dos efeitos do primeiro estrato	68
15	Estimadores dos efeitos do segundo estrato	68
16	Estimadores dos efeitos do terceiro estrato	68
17	Estimadores dos efeitos do quarto estrato	69

Sumário

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	Apresentação	16
1.2	Motivação	16
1.3	O combate de robôs e sua relevância técnica	17
1.4	O Projeto	20
1.5	A Battlebots	22
1.5.1	História	22
1.5.2	Formato da competição	23
1.5.3	Relevância	24
1.6	Detalhamento do Sistema	25
1.7	Descrição do Problema e Objetivos	28
1.8	Estrutura	29
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	30
2.1	Delineamento de experimentos	30
2.2	Delineamento de experimentos: definições e procedimentos	31
2.3	O delineamento de experimentos: experimentos fatoriais	33
2.4	Delineamento de experimentos: delineamentos 2^k	34
2.5	Delineamento de experimentos: experimentos fatoriais fracionados	37
2.6	Delineamento de experimentos: fatores com diferentes dificuldades de troca, experimentos <i>split plot</i> e suas variações	40
2.6.1	Análise de delineamentos <i>split plot</i> e suas variações	43
2.7	Número mínimo de trocas e o critério MSMA	44
2.8	Delineamento de experimentos: método da substituição	45
2.8.1	Critério <i>Minimum Aberration</i> em delineamentos com um fator de quatro níveis	46
3	DETALHAMENTO DO PLANO EXPERIMENTAL UTILIZADO	48
3.1	Reconhecimento e relato do problema e seleção da variável resposta	48
3.2	Escolha dos fatores e dos níveis	48
3.2.1	<i>Timing</i>	49
3.2.2	<i>Starting Power</i>	49

3.2.3	Zona neutra	50
3.2.4	Curva de Aceleração	51
3.2.5	Polia e Correia	51
3.2.6	Taxa de Redução	52
3.2.7	Aperto do Sistema	52
3.2.8	Barra	53
3.3	Planejamento experimental	54
3.4	Metodologia de coleta de dados	61
3.5	Realização do experimento	64
4	RESULTADOS DO PLANO EXPERIMENTAL SELECIONADO . . .	66
4.1	Resultados obtidos no plano selecionado	66
4.2	Análise dos resultados do plano selecionado	67
4.2.1	Análise dos Resíduos	73
4.2.2	Configuração recomendada do sistema	75
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	76
	REFERÊNCIAS	78

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

O presente trabalho possui como objetivo a realização de um estudo a respeito da redução do tempo de aceleração de um sistema composto por dois motores elétricos e a análise da influência de diversos fatores nesse tempo por meio da aplicação de delineamento de experimentos complexos.

O sistema a ser analisado faz parte de um projeto de um robô de 113,4 quilogramas desenvolvido com o intuito de participar de uma competição de combate de robôs. O detalhamento do sistema, do projeto e da competição, bem como a apresentação da motivação para a realização desse trabalho serão apresentados nas Seções 1.2 a 1.6.

1.2 Motivação

O ambiente universitário brasileiro de engenharia, especialmente o público, é repleto de oportunidades para o desenvolvimento de projetos extracurriculares em grupos de extensão, onde os estudantes podem aplicar na prática os conhecimentos adquiridos ao longo dos cursos de graduação e pós-graduação em projetos multidisciplinares.

Além de propiciarem ambientes sociais e de descontração, esses grupos fornecem um excelente espaço para o desenvolvimento pleno de um futuro profissional de engenharia, tanto por meio das atividades desenvolvidas dentro das equipes, sejam elas técnicas ou sociais, quanto por meio da geração de oportunidades futuras.

O sistema específico em questão integra um projeto de robótica de combate da categoria de 113,4 kg de uma empresa de engenharia, cuja viabilização está intimamente ligada a experiências passadas em grupos de extensão, uma vez que todos os membros envolvidos no projeto fizeram parte do grupo de robótica de competição da Poli-USP, a Thunderatz.

Todavia, a realização de projetos complexos de engenharia no contexto acadêmico, que envolvem múltiplas variáveis, não é característica única do grupo citado, se estendendo por grupos de diversas áreas como automobilística, aeronáutica, naval e aeroespacial. Ainda, é comum que a maioria das equipes realize seus projetos voltados à competições nacionais e internacionais, o que introduz o tempo como limitação crucial no já difícil desenvolvimento dos projetos.

As dificuldades de se tratar de sistemas multidisciplinares e multivariáveis em intervalos de tempo restritos se faz um fator comum entre os grupos, sendo que, de maneira geral, a busca pelo melhor conjunto de fatores é feita com base na tentativa e erro [1], o que pode ocasionar não só no uso de uma configuração não ideal como também no desperdício de recursos financeiros ou de tempo.

Devido à origem comum dos integrantes do grupo responsável pela execução do projeto analisado, os primeiros testes do sistema foram realizados da mesma forma. No entanto, a complexidade do problema e o elevado número de fatores envolvidos resultou na obtenção de resultados inconclusivos.

À medida em que o número de fatores aumenta, o número de testes necessários sobe rapidamente [2], e em decorrência, ocorre um aumento do tempo exigido e dos custos. Sendo assim, nesses casos é recomendada a utilização de experimentos fatoriais fracionados visto que, segundo Montgomery [2], frações menores do que o experimento completo frequentemente darão quase a mesma quantidade de informação útil a um custo menor.

Assim, a partir da necessidade de se adotar uma metodologia de teste mais eficaz em termos de resultado e mais eficiente em termos de tempo, adotou-se o uso do delineamento de experimentos fracionado para a análise do sistema.

1.3 O combate de robôs e sua relevância técnica

O combate de robôs é uma modalidade competitiva, dividida entre categorias de peso que geralmente variam entre 150 gramas até 113,4 quilogramas, onde duas equipes se enfrentam por meio do embate entre seus projetos robóticos para a decisão de um vencedor. A Tabela 1 apresenta as categorias de peso mais comumente adotadas.

Em geral, as competições de combate de robótica seguem regras e critérios parecidos para a decisão do vencedor. Nas partidas, robôs da mesma categoria de peso, controlados por controle remoto, são colocados em uma arena para a realização dos combates com duração e regras pré-determinadas pela organização e por um corpo de juízes.

Nesses eventos, a segurança dos participantes é de crucial importância, sendo que existem requisitos mínimos de constituição da arena para cada categoria. Usualmente, as arenas possuem estruturas de aço e painéis de policarbonato, que garantem a sua integridade durante os combates e possibilitam um alto grau de visibilidade e proteção.

Tabela 1: Categorias de Combate de Robôs

Categoria	Peso Limite
Fairyweight	150g
Antweight	454g
Beetleweight	1,36kg
Hobbyweight	5,44kg
Featherweight	13,6kg
Lightweight	27,2kg
Middleweight	54,4kg
Heavyweight	113,4kg

Fonte: Regras do Combate - Liga Brasileira de Robótica [3]

A Figura 1 ilustra um exemplo de arena utilizada em eventos no Brasil.

Figura 1: Arena de combate de Robôs



Fonte: Elaboração própria

Na maioria das competições, os combates possuem a duração de três minutos, sendo que o vencedor é decidido por nocaute, caracterizado pela falta de movimentação controlada de um dos robôs por dez segundos seguidos, ou por decisão dos jurados.

Em um primeiro momento o combate de robôs pode parecer apenas uma atividade de diversão e entretenimento, porém, a modalidade possui grandes potenciais, principalmente quando associada à ambientes de ensino e pesquisa.

Visto que os projetos passam por, durante uma competição, diversos combates, a busca por materiais e estruturas mais leves e resistentes é feita de maneira constante por meio de pesquisas e utilização de programas de simulação de elementos finitos, por exemplo.

Assim, os resultados encontrados para serem aplicados em um robô de combate podem ser o ponto inicial para o desenvolvimento de estruturas comerciais mais resistentes, aplicáveis em indústrias como a automotiva, a aeronáutica e a militar.

Ainda, a existência de restrições de peso na forma da divisão em categorias faz com que a grande maioria dos projetos seja construído utilizando motores elétricos de alta densidade de potência, o que fornece oportunidades de pesquisa e experimentação a respeito do desempenho e do comportamento desses dispositivos. Em anos recentes, devido ao aumento da consciência quanto à redução da emissão de gases do efeito estufa, houve um aumento do interesse de governos, organismos internacionais e consumidores em veículos elétricos [4] e por consequência, em motores elétricos de alta densidade de potência. De acordo com o Conselho Europeu de Energia Renovável, a ampliação no uso de veículos totalmente elétricos ou híbridos representa uma parcela importante nas propostas dos governos da região quanto à redução das emissões de GEEs [5].

Esse contexto tem impulsionado a relevância dos motores elétricos na mobilidade, visto que eles oferecem uma alternativa mais limpa e sustentável em comparação aos motores a combustão interna, pois não emitem gases poluentes durante seu funcionamento.

Quanto aos aspectos de desempenho e movimentação de veículos elétricos, ainda não existe um consenso em relação ao qual é o melhor tipo de motor elétrico, nem quanto aos seus mecanismos de atuação, sendo que existem diversos candidatos como motores síncronos de ímãs permanentes, motores de relutância e motores de indução [6].

Logo, tendo em vista o crescimento do interesse no desenvolvimento de soluções de transporte movidas por motores elétricos como carros, caminhonetes, caminhões, patinetes e bicicletas, o estudo do comportamento de motores elétricos nas situações de combate pode fornecer insumos para o desenvolvimento de motores e sistemas controladores mais sólidos, eficientes e resistentes à situações de alto estresse.

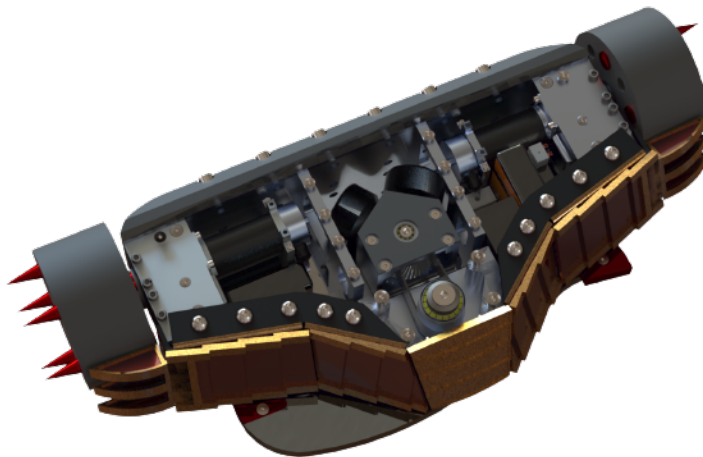
1.4 O Projeto

O projeto em estudo surgiu a partir de um grupo de seis colegas que se conheceram na equipe de robótica de competição da Poli-USP. Após terem passado por diversos eventos e competições e obtido experiências e vitórias levando o nome da Universidade de São Paulo, o grupo se reuniu no começo de 2021 a fim de dar início a um projeto independente.

Com o intuito de competir internacionalmente, o grupo decidiu por projetar um robô da categoria *Heavyweight*, a qual conta com robôs de até 113,4kg e que, devido a fatores de segurança, não possui competições no Brasil, principalmente dados os elevados custos associados à infraestrutura de segurança necessária para comportar a maior categoria de robôs de combate.

Definida a categoria do robô, decidiu-se que seu mecanismo ofensivo principal seria uma barra horizontal de impacto que gira rente ao chão. Assim, ao longo do ano de 2021, o projeto de todos os sistemas foi finalizado e seus componentes passaram a ser fabricados. A Figura 2 mostra a representação do projeto em um programa de CAD.

Figura 2: Visualização do projeto do robô



Fonte: Elaboração própria

O resultado final conta com uma estrutura composta de diversos materiais como aço, alumínio e polímeros.

A estrutura frontal e a base inferior do robô, responsáveis por resistir grande parte dos impactos durante uma rodada de combate são compostas de uma liga proprietária de

aço de alta resistência mecânica e à abrasão denominada Hardox 500. Os componentes estruturais internos como caixas de redução e mancais são compostos de alumínio aeronáutico da liga 7075-T6. As proteções traseiras do robô são feitas de um conjunto do mesmo alumínio aeronáutico e polietileno de alta densidade, que visa servir como material de sacrifício, dado seu custo reduzido em comparação com os outros materiais utilizados. Por fim, as rodas são compostas de borracha vulcanizada e a barra horizontal de impacto é composta de Hardox 450, com pontas de Hardox 600.

Quanto aos componentes não estruturais, o sistema de locomoção do projeto conta com dois motores escovados de corrente contínua, um de cada lado, do modelo S28-D4-400X da marca MagMotor, os quais fornecem uma potência aproximada de 3200 Watts cada, acoplados à caixas de redução de elaboração própria. A Figura 3 mostra o modelo de motor utilizado.

Figura 3: Motor S28-D4-400X



Fonte: Magmotor Store [7]

Já o sistema responsável por movimentar a barra de impacto, que é o alvo da análise deste trabalho, é composto de dois motores sem escovas de corrente contínua, que combinados fornecem uma potência de aproximadamente 14000 Watts, acoplados a uma caixa de redução de desenvolvimento próprio. Sendo o principal fator de interesse dentre os componentes do robô, esse sistema será descrito detalhadamente na Seção 1.6.

Por fim, devido à fins comerciais da competição da qual o grupo pretendia participar, foi escolhido um nome e uma identidade visual para o projeto: Samurai. A Figura 4 ilustra os adereços decorativos adicionados ao robô.

Figura 4: Robô Samurai



Fonte: Elaboração própria

Os detalhes relacionados à competição pretendida pelo grupo do projeto serão descritos na Seção 1.5.

1.5 A Battlebots

1.5.1 História

A Battlebots é uma competição de combate de robôs da categoria *Heavyweight* de 113,4 kg que ocorre nos Estados Unidos, da qual o grupo buscava participar desde a concepção inicial do projeto em questão.

O evento, que ocorre no formato de um programa de televisão, se originou no final da década de 1990, passando por um hiato de 2002 até o ano de 2015, quando retornou e segue acontecendo anualmente [8].

Os episódios do programa são gravados durante um período de aproximadamente um mês, nos quais robôs de todo o mundo se enfrentam em busca do título de campeão da categoria dos pesos pesados. A transmissão dos episódios ocorre ao longo de alguns meses em diversas emissoras em mais de 150 países ao redor do mundo [9].

Em média, em seu país de origem, os episódios do programa alcançam em sua estreia uma audiência de 580 mil espectadores, sendo que esse número é ampliado em reprises e nas transmissões fora do solo estadunidense [10].

1.5.2 Formato da competição

Devido ao aspecto televisivo da competição, as equipes participantes são escolhidas por um rigoroso comitê de seleção, que leva em consideração não só aspectos de funcionamento técnico dos projetos como também de aparência e apelo aos espectadores.

Os critérios utilizados não são disponibilizados, no entanto, o guia de inscrição da competição afirma que para ser aprovado, um robô deve ser destrutivo, original, resistente e visualmente deslumbrante [9]. Atualmente, dentre todos os aplicantes, são selecionados cinquenta robôs de equipes de diversas nacionalidades, a maioria proveniente dos Estados Unidos, para participar da Battlebots.

No início da competição, cada equipe passa por quatro confrontos, que irão definir a sua classificação geral. A partir disso são selecionados os trinta e dois robôs com melhor classificação para adentrar a fase eliminatória, que se dá em confrontos diretos de eliminação simples até a grande final. Durante o decorrer da competição, todos os combates ocorrem dentro da mesma arena e são sujeitos às mesmas regras.

A *Battlebox*, como é denominada a arena utilizada, possui dimensões aproximadas de 14,6 metros de comprimento, 14,6 metros de largura e 5 metros de altura, com uma estrutura externa de aço e chapas de policarbonato. Em seu interior, o piso é composto de chapas de aço de aproximadamente um centímetro de espessura. Ainda, são posicionados diversos equipamentos de gravação e iluminação, geralmente próximos ao teto, que também é constituído de uma estrutura de aço e policarbonato. A Figura 5 apresenta a arena utilizada.

Figura 5: Arena *Battlebox*



Fonte: Battlebots[11]

As rodadas de combate da Battlebots possuem uma duração predefinida de três minutos, sendo que, como explicado na Seção 1.3 o vencedor é definido por nocaute ou pela decisão de um corpo de três juízes. Os critérios utilizados para a decisão de uma rodada são apresentados no guia de juízes disponibilizado pela organização da competição, mas em resumo, são considerados três aspectos com pontuações diferentes. O dano causado contabiliza cinco pontos, a agressividade durante a partida vale três pontos e o controle geral do combate vale três pontos [12].

Adicionalmente, no ano de 2022, foi acrescida a possibilidade de se contestar a decisão dos juízes. Nesse recurso, no início da competição, cada equipe recebe uma possibilidade de contestação. Após feito o pedido, um representante de cada equipe envolvida no combate em questão se reúne com o corpo de juízes e apresenta argumentos para manter ou alterar a decisão apresentada. Caso a equipe que requisitou o recurso obtenha sucesso em reverter a decisão anterior, seus integrantes podem requisitá-lo novamente em outra partida, no entanto, caso o resultado não seja alterado, a equipe não pode mais utilizar o recurso.

Finalmente, em decorrência da diferença temporal entre a gravação dos combates e a exibição dos episódios, todos os envolvidos assinam termos de confidencialidade quanto aos resultados das partidas, desde as equipes envolvidas até os espectadores presentes nas gravações.

1.5.3 Relevância

O estudo de robótica fora, no passado, uma exclusividade de empresas e institutos de pesquisa de elite. No entanto, desde o início dos anos 2000, esse cenário tem mudado com o crescimento não só de plataformas de robótica mais acessíveis como também de ligas e grupos amadores de robótica e de combate de robôs [13].

Segundo Sullins [13], pode ser fácil descartar o fenômeno da luta de robôs como juvenil, porém o seu amplo apelo é capaz de atravessar diversas barreiras sociais. Ainda segundo o autor, a crescente diversidade étnica e de gênero dentre os participantes e membros da audiência reforça a impossibilidade de descartar essa atividade como meramente escapista.

Sendo um programa que possui um alcance mundial, a Battlebots pode prestar um papel introdutório não só ao combate de robôs como um todo, como também a tópicos

relacionados a ciência e a tecnologia.

Do ponto de vista educacional, o despertar do interesse e a realização de atividades relacionadas à ciência, tecnologia e engenharia, auxiliam os estudantes na formação de conexões com suas possíveis futuras carreiras, motivam o aprendizado e facilitam o interesse e a busca por assuntos do gênero [14].

Já em um contexto de ensino superior, a ligação entre as práticas de engenharia que os alunos já possuem e suas experiências educacionais é de extrema importância [15]. Segundo as teorias construtivistas do conhecimento, os indivíduos constroem uma nova compreensão baseando-a em seus conhecimentos prévios [16]. Logo, quando um novo conteúdo tem poucas conexões com o conhecimento prévio dos alunos, a motivação será reduzida, tornando menos provável que ocorra uma aprendizagem eficaz [17].

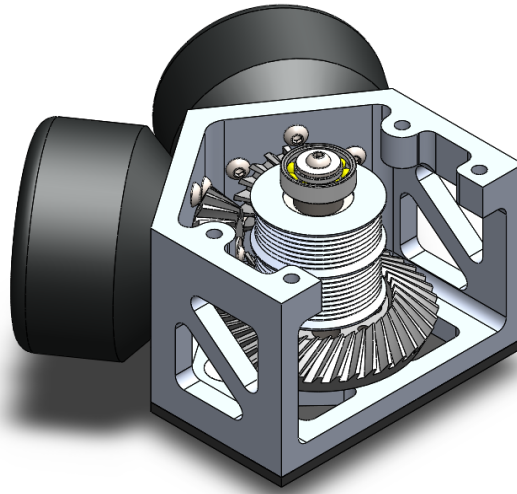
Assim, apesar do aspecto televisivo da Battlebots, é inegável que seu apelo e grande alcance vão além do entretenimento. A apresentação de temas de ciência, tecnologia e engenharia em um ambiente diverso e mais acessível facilita a difusão e o interesse pela área, além de fornecer para os já integrados a esse ambiente aplicações que reforçam e motivam o aprendizado de maneiras descoladas dos meios tradicionais.

1.6 Detalhamento do Sistema

Como descrito anteriormente, o objeto de estudo do presente trabalho é o sistema de motores responsável por movimentar o sistema primário de ataque do robô, que será detalhado ao longo desta Seção.

O conjunto estudado é composto por dois motores sem escova e não sensoreados de corrente contínua da marca NeuMotors, modelo 8025, acoplados à um sistema de redução de engrenagens cônicas helicoidais. Esse é composto por um bloco usinado de alumínio, onde são fixados os motores, dois pinhões fixados nos eixos de cada motor por meio de chavetas, um eixo de aço vertical bi apoiado por rolamentos de esfera, uma coroa acoplada ao eixo de aço por meio de chaveta e uma polia de alumínio também acoplada ao mesmo eixo por meio de uma chaveta. A Figura 6 apresenta uma vista isométrica do projeto de CAD do sistema sem a parte superior para uma melhor visualização, e a Figura 7 apresenta o motor modelo 8025.

Figura 6: Projeto do sistema em estudo



Fonte: Elaboração própria

Figura 7: Motor NeuMotors 8025

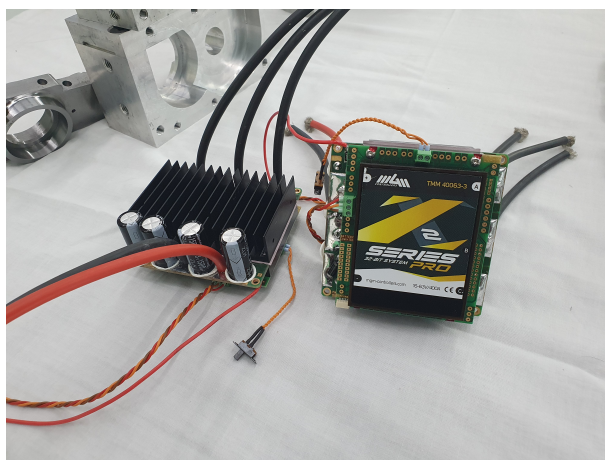


Fonte: NeuMotors [18]

Os motores em questão são alimentados por duas baterias compostas de polímero de lítio ligadas em série que fornecem uma tensão aproximada de 44,4 Volts, e conectados cada um a uma placa eletrônica controladora de velocidade (*ESC*) da marca MGM Controllers, (modelo TMM 40063-3), as quais são ligadas cada uma a um receptor dos sinais enviados pelo controle remoto de rádio-frequência do robô. As placas eletrônicas controladoras de velocidade (*ESC*) utilizadas possuem um sistema que permite gravar e armazenar diversos dados de uso para análise posterior. Esse recurso será detalhado e

utilizado nas Seções 3.4 e 3.5. A Figura 8 ilustra as eletrônicas controladoras utilizadas.

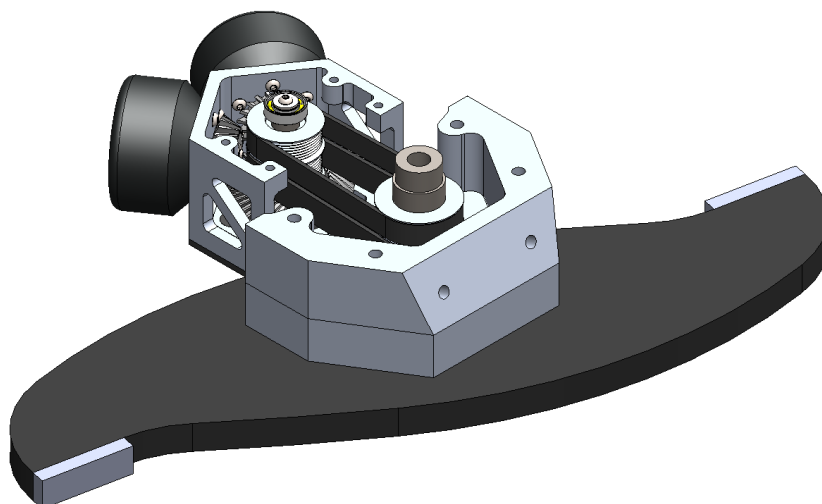
Figura 8: Eletrônicas controladoras de velocidade utilizadas



Fonte: Elaboração própria

O movimento dos motores é transmitido às engrenagens e à polia motora, que por sua vez transmite, por meio de duas correias, o movimento para outra polia acoplada ao eixo onde é fixada a barra de impacto. A Figura 9 ilustra uma vista isométrica do sistema completo, dos motores até a barra de impacto, novamente sem as partes superiores para uma melhor visualização.

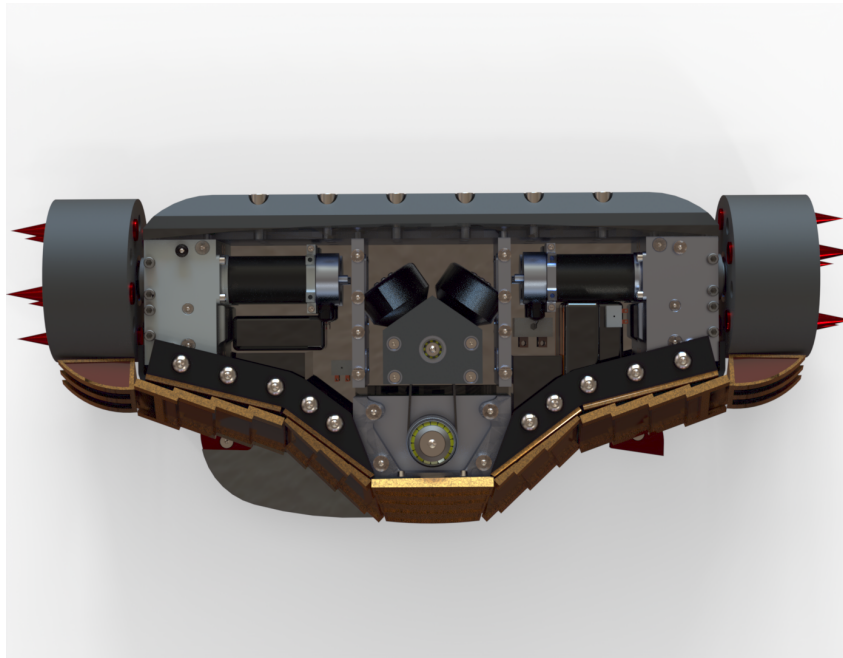
Figura 9: Projeto do sistema em estudo



Fonte: Elaboração própria

Internamente ao robô, o sistema em estudo fica localizado na parte central, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 10: Posicionamento do sistema dentro do robô



Fonte: Elaboração própria

Vale ressaltar que os motores utilizados funcionam de maneira independente apesar de estarem montados num mesmo sistema, tanto devido às limitações das placas eletrônicas utilizadas, como por escolha dos membros do projeto pela adição de redundância à movimentação da barra de ataque do robô.

1.7 Descrição do Problema e Objetivos

Tendo em vista que uma rodada de combate possui um tempo delimitado, três minutos no caso da Battlebots, é crucial que, dentro da arena, o tempo seja utilizado de maneira eficiente.

Logo, para que um projeto seja competitivo dentro desse contexto, é necessário que seus sistemas funcionem não só de maneira confiável, mas também que apresentem uma rápida disponibilidade. Em outras palavras, é fundamental que o robô consiga se locomover rapidamente e acelerar seu sistema de ataque em poucos segundos.

Assim, visando analisar e melhorar a competitividade, após o término da fabricação de todos os componentes do projeto, foram realizados os primeiros testes do sistema de impacto.

Devido à origem comum de todos os membros envolvidos, os primeiros testes

foram realizados com base na tentativa e erro visando encontrar a melhor configuração. No entanto, após passar por diversas tentativas, falhas e dificuldades de análise devido à falta de planejamento, o melhor tempo conseguido foi de aproximadamente dezoito segundos.

O controle de velocidade de motores sem escova e não sensoreados é uma atividade que envolve diversas variáveis de construção mecânica e elétrica dos motores, bem como os parâmetros de controle utilizados pelas ESCs e as variáveis que dizem respeito ao sistema no qual um motor está inserido [19]. Ainda, o fato do sistema em estudo apresentar dois motores independentes adiciona ainda mais fatores ao sistema a ser analisado, visto que, para um funcionamento ótimo, os motores devem ser controlados de maneira quase idêntica porém independente.

Assim, o resultado obtido não foi considerado satisfatório e percebeu-se que, devido à alta complexidade dos fatores envolvidos no tempo de aceleração, seria necessário realizar um planejamento dos experimentos a serem executados buscando uma configuração que melhor atendesse às expectativas de competitividade do grupo. Ainda, tendo em vista o cronograma estabelecido para o projeto, optou-se por utilizar um delineamento de experimentos fracionado.

Sendo assim, o objetivo do presente trabalho é apresentar o processo de planejamento desses experimentos, que passa pela decisão de fatores e níveis, escolha de um plano experimental, a execução dos experimentos e análise dos dados voltados para a redução do tempo de aceleração do sistema de ataque do robô Samurai.

1.8 Estrutura

Este trabalho apresenta a seguinte estruturação em capítulos:

- O Capítulo 2 apresenta uma revisão bibliográfica dos conceitos de delineamento de experimentos utilizados na construção do planejamento utilizado;
- O capítulo 3 apresenta o detalhamento do planejamento dos experimentos com o sistema analisado e a metodologia adotada;
- O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos;
- O capítulo 5 apresenta as conclusões e recomendações obtidas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para o desenvolvimento do presente trabalho com os objetivos apresentados anteriormente na Seção 1.7, se faz necessária uma revisão dos conceitos utilizados tanto no planejamento dos experimentos como na análise dos resultados.

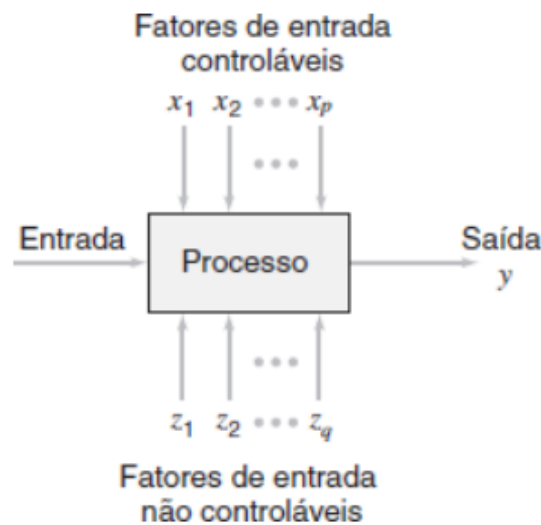
As Seções 2.1 a 2.8 apresentam essa revisão, passando pelos conceitos e definições básicos e complexos do delineamento de experimentos utilizados para a elaboração do experimento alvo do trabalho.

2.1 Delineamento de experimentos

Segundo Montgomery [2], um experimento planejado consiste em um teste ou série de testes onde são variadas as entradas de um processo a fim de identificar mudanças na resposta de saída.

Para o referido autor, um processo pode ser tido como uma combinação de máquinas, métodos e pessoas em uma atividade de transformação de uma entrada em produtos de saída. Ainda dentro dessa definição, algumas variáveis são controláveis, enquanto outras são não controláveis, as quais também podem ser classificadas como ruído. A Figura 11 ilustra uma representação gráfica de tal definição.

Figura 11: Modelo geral de um processo



Fonte: MONTGOMERY (2000)

Os objetivos de um experimento planejado incluem a determinação das variáveis mais influentes na resposta ou saída, a determinação dos valores ótimos das variáveis de

entrada para a obtenção de um determinado efeito desejável na resposta e a determinação de valores a serem atribuídos aos fatores de entrada controláveis (x 's) influentes de modo a minimizar o efeitos dos fatores de entrada não controláveis (z 's).

Assim, de maneira geral, o objetivo principal do delineamento de experimentos é identificar quais variáveis têm um efeito significativo na resposta ou variável de saída e como essas variáveis devem ser configuradas para otimizar o desempenho ou alcançar outros objetivos desejados. O delineamento de experimentos também permite a análise de múltiplos fatores controláveis simultaneamente, levando em consideração a interação entre eles.

Portanto, os métodos de planejamento experimental, desempenham um papel importante nas atividades do planejamento de engenharia, em que novos produtos são desenvolvidos e os existentes, melhorados, sendo amplamente usados em atividades do projeto para Seis Sigma em aplicações como avaliação e comparação de configurações de planejamento básica, avaliação de materiais alternativos e determinação dos parâmetros chave do planejamento do produto que têm impacto sobre o desempenho [2].

Porém, o uso do delineamento ou planejamento de experimentos não se limita a atividades industriais, também sendo utilizado no ramo de serviços em anos recentes, em aplicações como planejamento de páginas de internet, teste de preferência de consumidores e melhorias em sistemas de serviços que também tem sido beneficiadas pela redução de custos e tempo advindos do uso de experimentos planejados.

2.2 Delineamento de experimentos: definições e procedimentos

A partir da introdução a respeito do tema apresentada, é possível se aprofundar nos procedimentos utilizados para a realização de um delineamento de experimentos, passando antes pelas definições chave dos termos utilizados.

Define-se como variável resposta uma variável do processo que pode ser mensurada e que possui conexão com o estudo a fim de trazer informações úteis a respeito do sistema no qual ela está inserida. Essa, deve ser escolhida cuidadosamente pelo experimentador, considerando as características supracitadas.

Conforme explicitado o objetivo de um delineamento de experimentos, na busca por um melhor entendimento quanto ao comportamento da variável resposta, denominam-se como fatores as variáveis escolhidas que são controláveis, sendo possível implementar

variações controladas e previstas em seus valores.

Os fatores são representados em um planejamento por letras maiúsculas do alfabeto latino, excluindo-se a letra "I", visto que seu uso está reservado para denotar a relação definidora que será apresentada na Seção 2.5.

Os valores que cada fator pode assumir dentro de um experimento são denominados níveis.

Denomina-se o alvo ou objeto no qual será aplicado um determinado experimento como unidade experimental.

Os experimentos mais comumente utilizados, bem como o experimento alvo desse trabalho, são aqueles em que os fatores variam dentro de dois níveis. Assim, um planejamento onde existem k fatores variando entre dois níveis diferentes é denominado um experimento fatorial 2^k . Nesses, os níveis são representados pelos numerais -1, denominado nível baixo e +1, denominado nível alto.

Cada combinação distinta de níveis para os fatores incluídos no experimento é denominada tratamento. Em um planejamento de k fatores e k_i níveis, o número total de tratamentos (T) é dado por:

$$T = \prod_{i=1}^k k_i \quad (1)$$

Em termos do número total de experimentos realizados, caso o planejamento seja realizado sem réplicas, esse número será igual ao total de tratamentos.

Define-se como réplica, a realização de um mesmo tratamento em unidades experimentais distintas, o que possibilita uma análise melhor da influencia dos fatores na variável resposta, reduzindo o efeito da unidade experimental.

Por outro lado, denomina-se repetição como a aplicação de um mesmo tratamento na mesma unidade experimental, a fim de se aferir as influências dos instrumentos de medição.

Por fim, define-se efeito como a mudança na resposta produzida por uma mudança no nível do fator.

Concluindo-se as principais definições a respeito do delineamento de experimentos é possível tratar a respeito dos procedimentos envolvidos nesse processo.

Para Montgomery [2], o procedimento recomendado para a realização de um delineamento de experimentos bem-sucedido consiste nos seguintes passos:

1. Reconhecimento e relato do problema;
2. Escolha dos fatores e dos níveis;
3. Seleção da variável resposta;
4. Escolha do planejamento experimental;
5. Realização do experimento;
6. Análise dos dados;
7. Conclusões e recomendações.

Os passos 1, 2 e 3 são considerados como planejamento pré-experimental, sendo que a escolha dos fatores e dos níveis e a seleção da variável resposta podem ser feitos simultaneamente ou em ordem inversa.

Visto que as diretrizes apontadas serão utilizadas no planejamento dos experimentos desse trabalho, o detalhamento das mesmas será feito em conjunto com a apresentação do planejamento utilizado, na Seção 3.3.

2.3 O delineamento de experimentos: experimentos fatoriais

Os experimentos denominados fatoriais consistem em experimentos nos quais em cada tentativa de realização completa são investigadas todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores. Assim, se existem dois fatores A e B com a níveis no primeiro e b níveis no segundo, uma replicação contém todas as ab combinações possíveis [2].

Uma vantagem que se tem com os experimentos fatoriais em relação à mudança de fatores um de cada vez é que, devido à variação simultânea dos fatores, é possível identificar a existência e a relevância da interação entre os diversos fatores na variável resposta. A variação um a um dos fatores pode resultar em conclusões equivocadas quanto ao comportamento da variável resposta, reduzindo assim a efetividade dos experimentos realizados.

Adicionalmente, algumas das principais vantagens citadas por Box e Hunter [20] para esse tipo de experimento incluem: menor número de testes por fator estudado, a possibilidade de se aumentar o delineamento, por um processo chamado desdobramento, quando necessário e a possibilidade de se realizar parte das combinações do delineamento

fatorial e ainda assim obter informações sobre o sistema. O último tópico citado pelos autores trata-se dos experimentos denominados fatoriais fracionados, que serão detalhados na Seção 2.5.

2.4 Delineamento de experimentos: delineamentos 2^k

Dentre a ampla gama de experimentos que podem ser planejados seguindo as diretrizes de um delineamento de experimento, o delineamento fatorial 2^k possui grande relevância e utilização, devido à possibilidade de obtenção de informações relevantes com uma análise relativamente simples [2].

Como dito anteriormente, denomina-se como um delineamento 2^k um planejamento onde k fatores variam, cada um, entre dois níveis. Especificamente para esse caso, o número total de tratamentos é de 2^k .

Para o caso em que um experimento possui dois ou mais fatores, ou seja, $k \geq 2$, se faz necessário verificar os efeitos dos fatores principais e também de suas interações. Essas são representadas pela junção das letras dos fatores e podem ser duplas, triplas ou de maior ordem. Por exemplo, no caso de um experimento que possua três fatores denominados por A, B e C, as interações duplas serão representadas por AB, AC e BC e a interação tripla por ABC.

Vale ressaltar que para fins de análise, se uma interação se mostra relevante na variável resposta, todos os fatores que a compõe devem ser considerados como ativos, mesmo que seus efeitos individuais não demonstrem.

Para a construção da tabela dos efeitos de um experimento com k fatores, o procedimento a ser adotado segue os seguintes passos [1]:

1. Construir uma tabela com $2^k - 1$ colunas e 2^k linhas;
2. Alocar as k primeiras colunas para os fatores, empregando letras maiúsculas do alfabeto latino, seguidas pelas interações duplas, triplas até a k -túpla;
3. Definir um índice $\gamma = 0, 1, \dots, k - 1$ para cada coluna;
4. Preencher a coluna de cada fator, alternando entre o nível baixo e alto com frequência igual a 2^γ ; $\gamma = 0, 1, \dots, k - 1$

5. Preencher a coluna das interações entre os fatores i e j a partir da multiplicação dos valores de suas colunas.

A Tabela 2 apresenta um exemplo do procedimento aplicado a um experimento 2^3 .

Tabela 2: Tabela de um experimento 2^3

Tratamento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Resultado (Y)
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	a_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	a_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	a_3
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	a_4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	a_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	a_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	a_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	a_8

Fonte: Elaboração Própria

A partir da Tabela criada, todos os tratamentos estão definidos e a ordem dos experimentos pode ser aleatorizada para a coleta dos valores da variável resposta. Os motivos para a aleatorização da ordem de execução, bem como a realização de experimentos com aleatorização restrita serão apresentados na Seção 2.6.

A fim de se estimar o efeito dos fatores e suas interações, deve-se realizar a diferença das médias entre os resultados no nível baixo e alto de cada fator. Assim a estimativa calculada para o efeito do fator A da Tabela 3 é dada por:

$$\text{Efeito A} = \frac{(a_1 + a_3 + a_5 + a_7)}{4} - \frac{(a_2 + a_4 + a_6 + a_8)}{4} \quad (2)$$

As estimativas para os demais efeitos podem ser calculadas de maneira análoga.

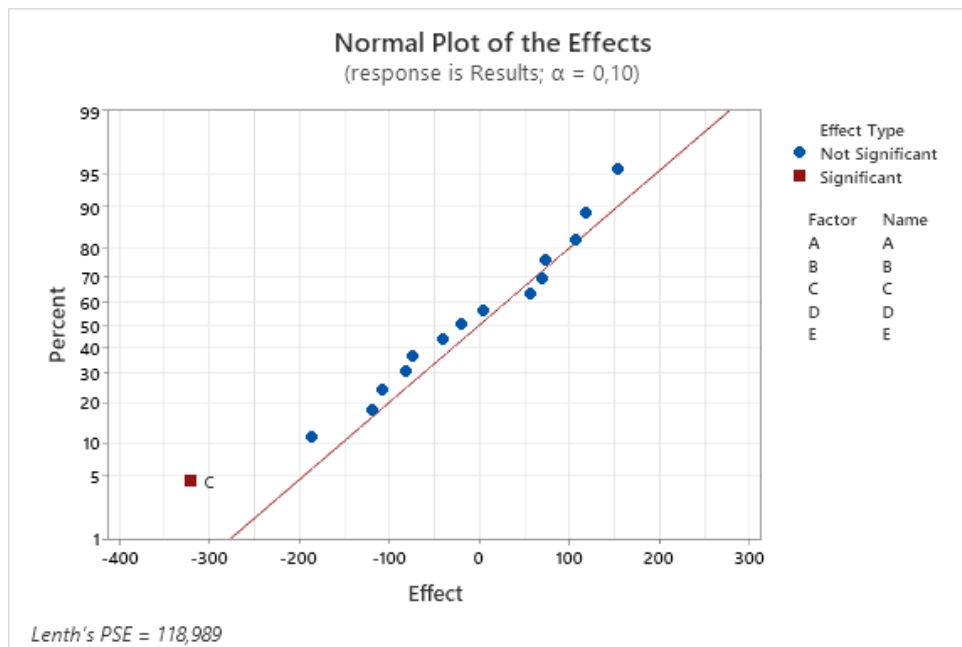
De maneira geral, para experimentos de maior ordem, ou seja, com mais fatores, a estimativa do efeito de um fator genérico G pode ser calculada conforme a Equação 3, onde $\mathbf{G}$ denota o vetor dos níveis e $\mathbf{Y}$, o vetor de resultados.

$$\text{Efeito do G} = 2^{1-k} \mathbf{G}^t \mathbf{Y} \quad (3)$$

A partir dos efeitos calculados é possível realizar análises estatísticas a respeito do sistema por meio de métodos estatísticos relativamente simples [2]. Para isso, pode-se fazer uso de ferramentas gráficas como o Diagrama de Pareto, o Gráfico de Probabilidade Normal, que será apresentada devido à similaridade com o experimento alvo do trabalho, ou a Análise de Variância dos efeitos, para o caso em que ocorrem replicações.

Para realizar a análise por meio de gráfico de probabilidade normal, após calcular as estimativas dos efeitos de cada fator e das interações, os mesmos pode ser representados graficamente, conforme ilustrado na Figura 12.

Figura 12: Exemplo de Gráfico de Probabilidade Normal



Fonte: Minitab (Adaptado)

No gráfico da Figura 12, a reta destacada em vermelho representa a distribuição para o caso em que nenhum efeito é relevante. Assim, os efeitos no gráfico que se encontram mais próximos da reta são considerados como não significativos no valor da variável resposta do experimento, e os que mais se afastam são considerados como significativos.

Conforme ilustrado na Tabela 2, o número total de tratamentos, e de experimentos para o caso de execução sem réplicas, é de $2^3 = 8$. Conforme o número de fatores aumenta, o número de tratamentos sobe rapidamente, seriam dezesseis para $k = 4$ e trinta e dois para $k = 5$, por exemplo.

Para os casos em que se deseja realizar um delineamento de experimentos para um sistema com diversos fatores, o número de experimentos passa a ser um fator limi-

tante dadas restrições orçamentárias e temporais. Um experimento 2^k com $k = 10$, por exemplo, exigiria a realização de mil e vinte e quatro experimentos caso fosse realizado o delineamento completo.

Sendo assim, visando permitir a investigação de mais fatores pode-se adotar o uso de uma fração do delineamento completo, sendo esse tipo denominado experimentos fatoriais fracionados, que serão explorados na Seção 2.5.

2.5 Delineamento de experimentos: experimentos fatoriais fracionados

Conforme apresentado, o número elevado de experimentos necessários pode ser um entrave para a realização de um experimento fatorial completo. Assim, uma alternativa é a realização de uma fração desse delineamento, denominada delineamento 2^{k-p} .

Nesse tipo de planejamento, executa-se uma fração de ordem 2^n do experimento completo ($2^n = 2^{k-p}$), ou seja, para $p = 1$ executa-se metade do fatorial completo, para $p = 2$ executa-se um quarto e assim por diante.

Segundo Montgomery [2], se for possível supor que as interações de maior ordem não possuem efeito na variável resposta, pode-se fazer uso do planejamento fatorial fracionado, ainda obtendo-se informações sobre os fatores principais e as interações de menor grau. Essa suposição é denominada princípio da escassez de efeitos.

Para que seja possível realizar um número menor de experimentos, é necessário associar ou confundir um fator principal do sistema a interações de maior grau, assumindo que, caso a análise da variável resposta sugira significância, ela será atrelada ao fator principal. Assim são criados os geradores de um experimento fracionado.

Exemplificando, para o caso de um experimento fatorial 2^4 , com quatro fatores (A,B,C e D) seriam necessários dezesseis experimentos. No entanto, caso seja possível ou desejável a realização de apenas oito rodadas de teste, deve-se realizar o confundimento de um fator principal com uma interação, sendo assim possível associá-lo a um dos elementos do conjunto $\{AB, AC, AD, BC, BD, CD, ABC\}$.

Supondo que seja feita o confundimento $D = ABC$, a partir disso é possível obter utilizando-se da operação de módulo 2, a relação definidora do experimento, dada por $I = ABCD$. A Tabela 3 apresenta todos os confundimentos gerados em um experimento 2^{4-1} com a relação definidora $I = ABCD$.

Tabela 3: Confundimentos de um experimento 2^{4-1} com gerador $I = ABCD$

I =	ABCD
A =	BCD
B =	ACD
C =	ABD
D =	ABC
AB =	CD
AC =	BD
BC =	AD
ABC =	D

Fonte: Elaboração Própria

A construção da tabela de contrastes para um experimento fracionado deve ser feita seguindo o mesmo procedimento de um experimento 2^n , com $n = k - p$ e com número de colunas igual à $2^n - 1$. Os níveis dos fatores escolhidos para serem confundidos serão definidos a partir da interação com a qual se realiza o confundimento. A Tabela 4 apresenta a construção para o exemplo do experimento 2^{4-1} com o gerador $D = ABC$.

Tabela 4: Tabela de um experimento 2^{4-1} com gerador $D = ABC$

Tratamento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC = D	Resultado (Y)
1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	a_1
2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	a_2
3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	a_3
4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	a_4
5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	a_5
6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	a_6
7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	a_7
8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	a_8

Fonte: Elaboração Própria

Da mesma forma, o cálculo dos estimadores dos efeitos e a análise dos fatores pode ser realizada seguindo os mesmos passos de um delineamento fatorial completo. Todavia,

dada a realização de confundimentos, caso um fator apresente significância estatística, não é possível isolá-lo da interação associada a ele, sendo que é recomendada a realização de experimentos confirmatórios para isso.

O plano ilustrado na tabela 4 representa apenas uma das possibilidades de confundimento para um experimento 2^{4-1} , sendo possível também realizar a associação às interações duplas AB, AC e BC. A escolha dos geradores de um plano experimental fracionado fica a cargo do experimentador, no entanto, existem critérios que são utilizados para garantir a qualidade das informações geradas.

Em um delineamento fracionado, fatores principais ou interações duplas que não são confundidos com fatores principais e interações duplas são denominados como fatores livres. Já fatores e interações duplas cujos confundimentos são realizados com interações de quarta ou maior ordem são denominados fortemente livres [21]. Dessa definição deriva-se o conceito de resolução de um experimento fatorial fracionado.

A resolução de um experimento fornece informações a respeito da qualidade dos estimadores dos efeitos principais e pode ser um dos critérios para a escolha de um determinado plano experimental. Representada por algarismos romanos, seu valor está ligado ao menor comprimento da(s) palavra(s) associada(s) à relação definidora [21]. Para o exemplo ilustrado na Tabela 5, onde $I = ABCD$, a resolução do experimento é IV, ou seja, os fatores principais estão confundidos com interações de terceiro grau, e as interações de segundo grau estão confundidas entre si.

Em geral, recomenda-se a utilização de planos experimentais com resolução maior ou igual III, visto que isso indicaria que os fatores principais são confundidos com interações de segunda ordem. Quanto maior a resolução de um determinado experimento, maior a ordem das interações com as quais os fatores principais estão confundidos. Isso implica que, durante a análise dos resultados, caso um fator principal apresente um efeito significativo na variável resposta, a probabilidade desse efeito ser realmente originado do fator principal é maior do que da interação com a qual ele está confundido.

De maneira geral, um experimento 2^{k-p} possui p geradores e o número de elementos da relação definidora é igual a $2^p - 1$. Por exemplo, na realização de um experimento 2^{5-2} , poderiam ser utilizados os geradores $D = AB$ e $E = AC$. Neste caso teremos três elementos na relação definidora, sendo o primeiro $I = ABD$, o segundo $I = ACE$ e o terceiro o resultado da operação MOD do produto destes $Mod(ABD \times ACE = A^2BCDE) =$

$BCDE$. Assim, a relação definidora deste exemplo é: $I = ABD, ACE, BCDE$.

A partir da relação definidora de um experimento é possível conceituar o *Word Length Pattern* (WLP), que pode ser empregado como um outro critério além da resolução principalmente em casos de comparação de vários experimentos de mesma resolução.

O WLP de um experimento é definido como um vetor $\mathbf{W} = \{A_3, A_4, A_5, \dots, A_k\}$, de dimensão igual a $k - 2$, no qual o elemento A_i representa o número de elementos da relação definidora que possua palavras, ou em inglês *strings*, de tamanho i , com $i > 2$. Assim temos que A_3 , o primeiro elemento, indica o número de palavras de tamanho três, A_4 indica o número de palavras de tamanho quatro e assim por diante. Ainda para o caso exemplo do experimento 2^{5-2} com relação definidora $I=ABD, ACE, BCDE$, o WLP do plano seria representado por $W = \{2, 1, 0\}$, isto é, as palavras ABD e ACE são de tamanho 3, $A_3 = 2$, BCDE é de tamanho 4, $A_4 = 1$ e não há palavras de tamanho 5, $A_5 = 0$.

O conceito do WLP é bastante útil na comparação e escolha de diferentes planos possíveis para um experimento, por meio do critério *minimum aberration* (mínima aberração) ou MA [21].

Esse critério é um dos mais amplamente utilizados na definição do plano experimental ótimo e define que o melhor plano é aquele que contém o menor número de palavras de menor comprimento. Essa afirmação implica que, dentre uma seleção de planos, aquele que deve ser escolhido como melhor é o que possui seus confundimentos com interações de maior ordem, ou seja, aquele que contém o maior número de fatores fortemente livres.

2.6 Delineamento de experimentos: fatores com diferentes dificuldades de troca, experimentos *split plot* e suas variações

Experimentos planejados sem restrição na aleatorização, ou seja, na qual a ordem de execução dos testes é completamente aleatória, são denominados delineamentos completamente aleatorizados. De forma geral, busca-se realizar os testes em ordem randômica a fim de se garantir uma melhor qualidade estatística dos dados, reduzindo o efeito de fatores externos e não identificados que podem prejudicar os dados obtidos [1].

No entanto, em um ambiente real de experimentação, muitas vezes, a troca entre os níveis de diferentes fatores apresenta diferentes graus de dificuldade. Assim, a aleatorização completa de um experimento pode implicar em uma maior necessidade de tempo

e recursos gastos caso um dos fatores apresente uma dificuldade maior de troca. Esses fatores são denominados difíceis de trocar ou *hard to change* (HTC) [21].

Custos altos e demora para obtenção de resultados podem inviabilizar a execução de um experimento, principalmente em um ambiente empresarial. Assim, visando aumentar a viabilidade da experimentação com fatores HTC, foram elaborados os delineamentos *split plot*, que são experimentos que contam com restrição na aleatorização. A origem desse tipo de delineamento se deu em um contexto de experimentação ligado à agricultura, onde devido a restrições práticas ou ambientais a aleatorização completa não era possível. Um exemplo disso é a testagem de diferentes fertilizantes, onde a aplicação de determinado tipo impossibilita o uso das mesmas plantas em outros tratamentos [22].

Um delineamento de experimentos *split plot* consiste em realizar os testes agrupando os tratamentos de acordo com o nível do fator HTC, a fim de se minimizar o número necessário de trocas e, por conseguinte, o tempo ou o custo do experimento. O conjunto dos tratamentos agrupados sob influência do mesmo nível do fator HTC é denominado *whole-plot*, e cada tratamento pertencente ao grupo é denominado um *sub-plot*.

Utilizando um experimento 2^3 como exemplo, a Tabela de contrastes, com ordem de execução aleatorizada está apresentada na Tabela 5.

Tabela 5: Tabela de contrastes de um experimento 2^3

Ordem	Tratamento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Resultado (Y)
1	5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	a_5
2	2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	a_2
3	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	a_7
4	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	a_8
5	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	a_1
6	4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	a_4
7	6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	a_6
8	3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	a_3

Fonte: Elaboração Própria

No entanto, caso o fator A fosse considerado como tendo um maior grau de dificuldade de troca, um experimento totalmente aleatorizado conforme o da Tabela 5, acarretaria em um elevado número de trocas, seis para um total de oito experimentos. Sendo assim, utilizando os métodos de aleatorização restrita dos experimentos *split plot* seria possível agrupar os experimentos em *whole-plots*, fazendo com que a ordem de execução fique conforme apresentado na Tabela 6, onde o número de trocas do fator A foi reduzido para apenas uma.

Tabela 6: Tabela de um experimento 2^3 *split plot*

Ordem	Tratamento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC	Resultado (Y)
1	5	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	a_5
2	7	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1	a_7
3	1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1	a_1
4	3	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	a_3
5	2	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	a_2
6	8	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	a_8
7	4	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1	a_4
8	6	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	a_6

Fonte: Elaboração Própria

A prática apresentada é de grande utilidade no caso de um experimento com apenas um fator HTC, no entanto, não é incomum que existam fatores com diversos graus de dificuldade de troca em um experimento. Nesses casos, os fatores são divididos em estratos, cada um representando um grau de dificuldade, e busca-se planejar o experimento de modo que o número de trocas exigidas seja inversamente proporcional à dificuldade de troca.

Esses tipos de experimento recebem a sua denominação de acordo com o número de estratos definidos. Caso sejam três níveis distintos de dificuldade o experimento é classificado como *split-split plot* ou *split² plot*, para quatro níveis distintos a classificação é *split-split-split plot* ou *split³ plot* e assim por diante [23].

2.6.1 Análise de delineamentos *split plot* e suas variações

As diferenças no planejamento utilizado nesses tipos de experimento implicam em diferenças na análise dos resultados. Como já apresentado, a análise dos efeitos obtidos após a coleta dos dados de um experimento pode ser feita utilizando-se diversas ferramentas estatísticas como diagrama de Pareto, gráfico de probabilidade normal ou a análise de variância (apenas em casos com replicação).

Por fins de relevância e proximidade com o experimento alvo do trabalho, bem como a busca por maior eficiência de recursos dos delineamentos *split plot* e suas variações, que geralmente envolvem um experimento sem replicações, apenas a análise por meio de gráfico de probabilidade normal será detalhada.

Em um experimento fatorial, completo ou fracionado, totalmente aleatorizado, a análise gráfica pode ser realizada por meio de um único gráfico de probabilidade normal, no qual são dispostos os estimadores dos efeitos dos fatores principais e das interações, assim como detalhado na Seção 2.4.

Por outro lado, para a análise de um experimento *split plot* e suas variações, devido à natureza do planejamento, deve ser feita a utilização de múltiplos gráficos, definidos pelo número de estratos de dificuldade de troca obtidos durante o planejamento.

Considerando o experimento *2³ split plot* apresentado na Seção 2.6, visto que são definidos dois estratos de dificuldade de troca, são necessários dois gráficos de probabilidade normal. O primeiro deles contando com o fator principal contido no estrato de maior dificuldade, e o segundo contendo os demais fatores e interações, incluindo as

interações com o fator A.

Caso o experimento fosse planejado de modo que os fatores A e B fossem posicionados no estrato de maior dificuldade, o primeiro gráfico conteria ambos os fatores e a sua interação AB, e o segundo contaria com os demais fatores, as interações entre eles e suas interações com os fatores A e B.

De modo geral, a análise de um experimento desse tipo deve contar com um número de gráficos igual ao número de estratos definidos, e começando a partir do de maior dificuldade, eles devem conter os fatores daquele estrato, as suas interações e as interações com os fatores dos estratos anteriores [24].

2.7 Número mínimo de trocas e o critério MSMA

Os delineamentos de experimentos com restrição de aleatorização, como os *split plot*, são de grande utilidade para a redução do tempo e recursos gastos na realização das rodadas de teste. Todavia, existe ainda a metodologia do *Minimum Setup design* (MS *Design*), que tem como objetivo determinar o número mínimo de trocas ou *setups* necessárias para estimar todos os efeitos principais e a média do experimento [1].

Dado um experimento fatorial fracionado 2^k , o número mínimo de experimentos necessários para atender aos requisitos supracitados é de 2^t , onde:

$$t = \lceil \log_2(k + 1) \rceil + I_Z(\log_2(k + 1)) \quad (4)$$

Tal que $\lceil \log_2(k + 1) \rceil$ representa o maior inteiro menor ou igual a $\log_2(k + 1)$. O segundo termo da expressão anterior, $I_Z(\log_2(k + 1))$, é uma função que retorna 1 caso $\log_2(k + 1)$ não seja inteiro e 0 caso contrário [25].

Assim, para um experimento com quatro fatores ($k = 4$), tem-se que $t = 3$ e assim, $2^3 = 8$ é o número mínimo de experimentos necessários para estimar todos os efeitos principais e a média do experimento.

Em experimentos *split plot* e suas variações também é possível utilizar o *Minimum Setup design* a fim de se encontrar o menor número possível de trocas ou *setups* para cada estrato. Para isso, considera-se o valor de k como sendo o número de fatores até aquele estrato, novamente a partir do de maior dificuldade [25].

Assim, considerando um experimento fatorial fracionado 2^{9-4} com fatores divi-

didos em quatro níveis de dificuldade de troca, um fator no primeiro estrato, quatro no segundo, três no terceiro e um no quarto, o número mínimo de trocas para cada estrato seria respectivamente, dois, oito, dezesseis e trinta e dois. Vale ressaltar que o número de *setups* reservado ao último estrato é determinado pelo número total de rodadas do experimento.

Critérios para a escolha de um plano experimental ótimo em um delineamento totalmente aleatorizado, como a resolução e o *minimum aberration* foram apresentados na Seção 2.5 e também são aplicáveis em experimentos com restrição de aleatorização. Todavia, existe também a possibilidade de se utilizar uma combinação entre o *Minimum Setup design* e o *minimum aberration*, denominada critério MSMA (Minimum Setup Minimum Aberration) [25].

De maneira geral, a sua utilização envolve a aplicação combinada de ambos os critérios, encontrando um conjunto de planejamentos que se adequem ao número mínimo de trocas do MS *design* e utilizando o critério MA para encontrar um plano experimental ótimo [23].

2.8 Delineamento de experimentos: método da substituição

Até agora foram tratados experimentos fatoriais de diversos tipos, porém, todos contendo fatores com apenas dois níveis, que apesar de serem amplamente adotados, não abrangem todos os casos práticos. Além dos experimentos 2^k e suas variações já citadas, existem delineamentos fatoriais 3^k , 4^k e s^k , onde costumeiramente adota-se s sendo primo [1].

No entanto, existem técnicas que permitem ampliar os horizontes do delineamento 2^k para casos com fatores com mais de dois níveis, sendo um deles o método da substituição, que consiste em substituir fatores com 2^α níveis por α pseudo-fatores de dois níveis e suas interações. Por exemplo, no caso de um fator de quatro níveis substituí-lo por dois pseudo-fatores de dois níveis e suas interações, conforme ilustrado na Tabela 7, onde 0, 1, 2 e 3 representam os quatro níveis do fator original.

Tabela 7: Método da Substituição

A	B	AB	Níveis do fator original
-	-	+	0
-	+	-	1
+	-	-	2
+	+	+	3

Fonte: Adaptado de [21]

A partir disso, é possível construir um delineamento de experimentos dentro dos moldes de um experimento 2^k , utilizando a relação demonstrada na Tabela 7 para definir qual dos quatro níveis do fator substituído deve ser utilizado para cada tratamento.

Em termos de análise, é possível fazer uso das mesmas ferramentas citadas na Seção 2.4, como por exemplo o gráfico de probabilidade normal [21]. No entanto, é necessário atentar-se que o cálculo dos efeitos do fator que emprega o método de substituição, devendo ser feito através de uma seleção adequada de um conjunto de $2^\alpha - 1$ contrastes ortogonais que melhor representam as comparações de interesse.

2.8.1 Critério *Minimum Aberration* em delineamentos com um fator de quatro níveis

Conforme discutido na Seção 2.5 a aplicação do critério *Minimum Aberration* é um dos métodos mais utilizados para definir um plano experimental ótimo em experimentos com fatores variando em dois níveis. A introdução de um fator de 2^α níveis, que deve ser tratado conforme o método da substituição apresentado, não inviabiliza a busca por um plano com aberração mínima, porém os procedimentos a serem seguidos diferem dos utilizados para experimentos 2^k e 2^{k-p} . Esta seção dedica-se à apresentação dos procedimentos aplicados a experimentos com fatores de dois níveis e um fator de quatro níveis ($2^k 4^1$), que serão utilizados no delineamento alvo do trabalho.

Visando aplicar o conceito de *Minimum Aberration* Wu e Hamada [21] definem que dentro do WLP de um experimento com fatores de dois e quatro níveis, uma palavra pode ser classificada como do tipo 0 caso envolva apenas fatores de dois níveis e do tipo 1 caso envolva fatores de dois níveis e de quatro níveis. Nesse sentido, para um mesmo valor

de palavras (*strings*) de comprimento i é mais importante que um experimento tenha um valor de A_{i0} menor do que um A_{i1} menor [21]. Assim, dados dois experimentos, d_1 e d_2 , sendo A_{i0} e A_{i1} o número de palavras de comprimento i do tipo 0 e 1 respectivamente e r o menor i de tal modo que $A_i(d_1) \neq A_i(d_2)$, se $A_{r0}(d_1) \leq A_{r0}(d_2)$, mas $A_{r1}(d_1) < A_{r1}(d_2)$, d_1 possui menos aberração que d_2 .

Assim, o uso do critério MA em um experimento desse tipo prioriza a escolha de um plano que possua menos efeitos confundidos apenas com fatores de dois níveis. Isso se dá visto que devido à natureza do método de substituição, é menos comum que todos os pseudo-fatores sejam significantes, ou seja, o experimentador pode, a partir de conhecimentos prévios sobre o sistema estudado, optar por um deles para ser utilizado nas relações definidoras do tipo 1.

3 DETALHAMENTO DO PLANO EXPERIMENTAL UTILIZADO

Assim, conforme apresentados os passos para o desenvolvimento de um delineamento de experimentos na Seção 2.2, este Capítulo se destina a detalhar as etapas do processo de experimentação com o projeto alvo do trabalho, visando a redução do tempo de aceleração da barra de impacto do robô Samurai.

3.1 Reconhecimento e relato do problema e seleção da variável resposta

Conforme ilustrado na Seção 1.7 de descrição do problema e objetivos, para obter um bom desempenho em rodadas de combate é crucial que um projeto seja capaz de utilizar amplamente seus sistemas de forma eficiente.

Assim, para o caso específico do robô denominado Samurai, é essencial que o projeto seja capaz de acelerar sua barra horizontal de impacto em poucos segundos, a fim de obter boas pontuações nos critérios de avaliação de competições.

Todavia, os primeiros testes realizados pelo grupo resultaram em um tempo de aceleração mínimo de 18,5 segundos, considerado como elevado pelos membros do grupo visando a competitividade do projeto. Sendo assim, ao partir para a abordagem do delineamento de experimentos, adotou-se o tempo de aceleração da barra de impacto como a variável resposta.

3.2 Escolha dos fatores e dos níveis

Tendo a variável resposta definida, passou-se a buscar por fatores que poderiam exercer influência sobre ela. Utilizando-se da ampla experiência de todos os membros da equipe no âmbito do combate de robôs, foram levantados oito fatores a serem incluídos no delineamento, quatro deles classificados como mecânicos (Polia e Correia, Taxa de Redução, Barra, Aperto do sistema) e quatro classificados como eletrônicos (*Timing*, Curva de aceleração, Zona neutra, *Starting Power*). Todos os fatores serão detalhados ao longo desta Seção.

3.2.1 *Timing*

Em geral, motores elétricos funcionam a partir do torque gerado pelo desalinhamento do campo magnético entre o rotor e o estator. Em motores com escovas, o acionamento ou comutação das fases para geração do campo magnético no rotor é feito por meio do contato das escovas com o comutador, que, fazendo uso da rotação do motor, alteram a fase energizada geram o campo magnético desalinhado [26]. Em motores denominados *brushless* ou sem escovas no entanto, a comutação das fases é realizada externamente pela eletrônica controladora de velocidade (ESC). Para que a energização das fases seja feita da maneira correta, diversos parâmetros são utilizados para estimar a posição exata do campo magnético advindo do rotor, variando entre marcas e protocolos de controle.

Nesse contexto, o parâmetro de entrada das ESCs denominado *Timing* é utilizado como um fator de correção, correspondendo ao valor em graus elétricos que a controladora deve se adiantar para realizar a comutação das fases, podendo assim corrigir eventuais discrepâncias entre valores estimados pela controladora e os dados reais do sistema.

Os valores estipulados para o fator, em graus elétricos, foram 8, 10, 12 e 14, constituindo o único fator de quatro níveis do experimento. A escolha pela utilização de mais de dois níveis no fator *Timing* foi feita pelo entendimento, com base em experiências prévias, que esse parâmetro seria um dos principais candidatos a apresentar significância na variável resposta. Assim, visando cobrir uma maior faixa de valores optou-se pela utilização de quatro níveis.

3.2.2 *Starting Power*

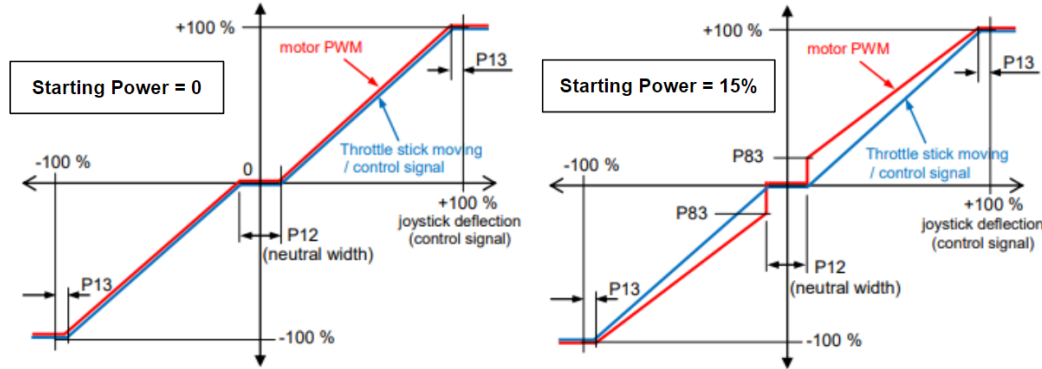
A maioria dos motores *brushless* e similares necessitam de uma potência mínima para iniciar o movimento, visando superar as forças de atrito, forças magnéticas que atuam sobre ele e a inércia. Dessa forma, o *Starting Power* é um parâmetro proprietário utilizado especificamente pelas eletrônicas controladoras da marca MGM que visa eliminar o intervalo no qual a potência fornecida ao motor é insuficiente para colocá-lo em movimento [27].

Assim, o valor desse parâmetro corresponde à porcentagem inicial da potência total que é fornecida para o motor em seu momento de partida.

A Figura 13 ilustra a influência desse parâmetro no controle de motores, sendo representado como P83. Nela, a linha vermelha indicada como "motor PWM" indica os

valores enviados ao motor pela ESC.

Figura 13: Representação do *Starting Power*



Fonte: [27] (Adaptado)

Usando como base a experiência com o controle de outros modelos de motor, os valores definidos para esse fator foram 5% e 10%.

3.2.3 Zona neutra

O fator denominado Zona neutra possui grande relação com o *Starting Power* no sentido em que ambos atuam no momento de partida do motor. Enquanto o fator da Seção 3.2.2 atua na regulação de potência inicial fornecida pela controladora ao motor, a zona neutra possui relação com o sinal recebido pela ESC a partir do controle de rádio-frequência.

Na Figura 13, a zona neutra é ilustrada por P12, atuando ao longo do eixo x do gráfico e restringindo uma porcentagem do intervalo em que os sinais enviados pelo controle são considerados para o acionamento do motor. Assim, quanto maior o valor definido para o parâmetro, maior é o ângulo formado entre a reta que representa os valores enviados ao motor e o eixo x, fazendo com que a aceleração seja feita de maneira mais abrupta.

A zona neutra também é definida como uma porcentagem e os valores escolhidos para o experimento foram 5% e 10%.

3.2.4 Curva de Aceleração

O parâmetro curva de aceleração trata-se uma alteração no mapeamento dos sinais recebidos pelo controle e os enviados pela ESC ao motor. Definido em segundos ele determina o tempo que a controladora demora para fornecer a potência máxima ao motor a partir do repouso. Os valores definidos para esse parâmetro foram de 5 e 7 segundos.

3.2.5 Polia e Correia

Como descrito na Seção 1.6 de detalhamento do sistema em estudo, a transmissão do movimento dos motores para a barra de impacto é feita por meio de um sistema composto por engrenagens, polias e correias.

Diferentes tipos de correia possuem diferentes características como aderência e elasticidade que podem influenciar em deslizamentos entre a polia e a correia [28] o que por sua vez impacta na carga distribuída aos elementos motores e na transmissão do movimento.

Inicialmente o projeto do robô foi feito visando utilizar correias do tipo Micro-V, devido à familiaridade dos membros do projeto adquirida com o uso em projetos anteriores. Todavia, visando viabilizar a análise do impacto de tipos diferentes de correia no funcionamento do sistema por meio dos experimentos decidiu-se utilizar um modelo adicional, e para isso foram usinadas novas polias.

Assim, optou-se pela utilização de dois tipos de correias, o modelo Optibelt PJ432 Micro-V com 8 frisos e o modelo Kraftband WR450 com 4 frisos. A Figura 14 ilustra exemplos de modelos similares e a diferença no número de frisos entre eles.

Figura 14: Correias dos tipos Micro-V e WR



Fonte: [29, 30]

3.2.6 Taxa de Redução

A diferença entre os tamanhos da polia motora e movida do sistema de transmissão do sistema em estudo implicam em uma diferença entre a velocidade angular dos motores ω_{motor} e a velocidade angular da barra de impacto ω_{barra} . A razão entre elas é denominada taxa de redução conforme:

$$\text{Taxa de redução} = \frac{\omega_{motor}}{\omega_{barra}} \quad (5)$$

Além de afetar a velocidade, essa proporção também tem efeito sobre o torque que é transmitido pelos motores, da forma que quanto maior a redução a partir dos motores, maior o torque transmitido e menor a velocidade da barra.

Tendo em vista a influência citada a taxa de redução foi escolhida como um fator, sendo seus níveis definidos como 2,7 e 2,2.

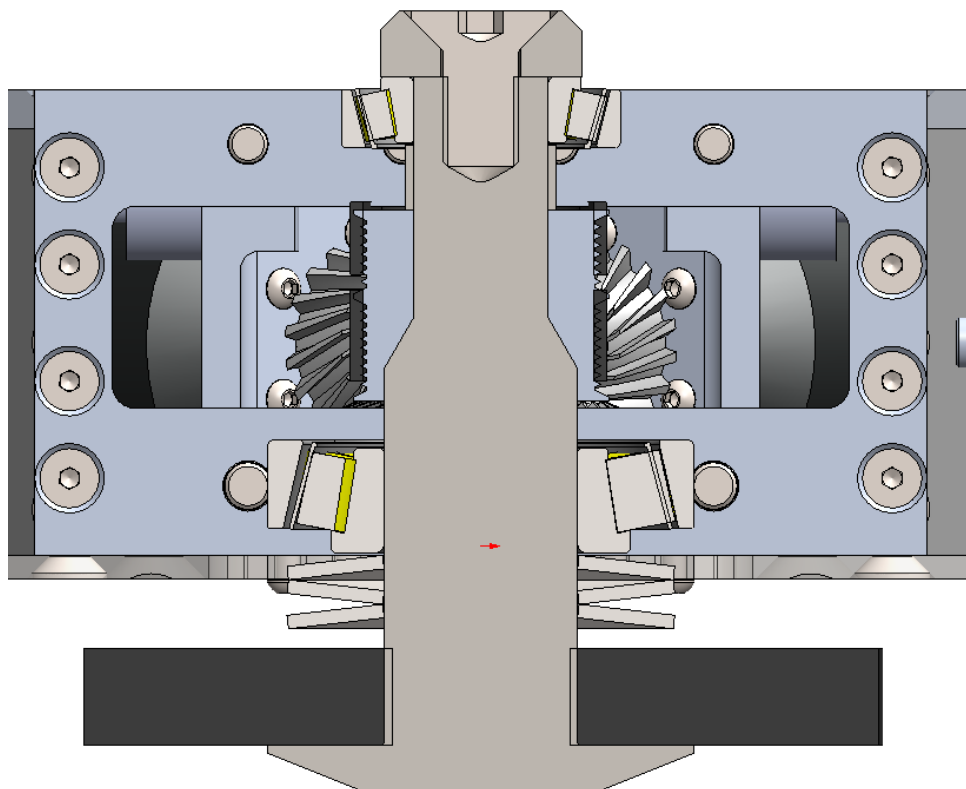
Assim como no caso das correias, o sistema havia sido projetado e fabricando inicialmente visando o uso de apenas uma taxa. Assim, para a análise do fator taxa de redução também foram usinadas novas polias para ambos os tipos de correia.

3.2.7 Aperto do Sistema

A barra de impacto do sistema ofensivo do robô Samurai é fixada radialmente em um eixo flangeado de aço bi-apoiado por dois rolamentos cônicos posicionados nos mancais frontais. O eixo por sua vez é fixado na parte superior do mancal por um parafuso escareado M20.

A fixação axial da barra é feita por um conjunto de molas prato posicionadas entre a barra e o rolamento inferior do mancal frontal. A Figura 15 apresenta a vista em corte da representação do sistema em um software de CAD.

Figura 15: Vista em corte do mancal frontal



Fonte: Elaboração própria

Além da fixação axial do eixo no mancal, o parafuso M20 é responsável por regular o aperto do conjunto barra-eixo, de modo que conforme ele é rosqueado as molas prato são comprimidas e aumentam a carga axial nos rolamentos e a compressão da barra contra a flange.

A fim de regular o aperto do sistema foi usinada uma rosca M6 no parafuso central, onde foi fixado um parafuso sem cabeça para limitar o curso máximo e assim limitar a compressão das molas prato. As medidas de aperto foram definidas como a distância em milímetros da face do parafuso M20 até o parafuso sem cabeça posicionado em seu interior. Os níveis definidos para esse fator foram 20,3 mm e 19,3 mm.

3.2.8 Barra

O último ponto de influência destacado para a análise do sistema foi a própria barra de impacto. Buscando observar a influência da massa e do momento de inércia do objeto a ser acelerado, foram projetadas duas versões, uma com 20,2 quilogramas

e momento de inércia igual a $0,62 \text{ kg m}^2$, a qual recebeu a denominação de pesada e outra com 18,4 quilogramas e momento de inércia igual a $0,4 \text{ kg m}^2$, a qual recebeu a denominação de leve.

3.3 Planejamento experimental

Tendo sido definidos a variável resposta como o tempo de aceleração do sistema e os fatores do experimento conforme apresentados na Figura 16, partiu-se para a etapa de elaboração e definição do planejamento experimental a ser utilizado.

Figura 16: Fatores e níveis levantados

Fator	Níveis
Timing	8
	10
	12
	14
Starting Power	5
	10
Zona Neutra	5
	10
Curva	7
	9
Aperto do Sistema	20.3
	19.3
Barras	Leve
	Pesado
Taxa de Redução	2,7
	2,2
Polia e Correia	Micro V
	WR

Fonte: Elaboração Própria

O primeiro ponto a ser tratado foi a presença de um fator de quatro níveis a ser analisado em conjunto com os demais de dois níveis. Sendo assim, para a elaboração de um plano experimental que pudesse ser analisado com as mesmas ferramentas estatísticas de um delineamento 2^{k-p} , o fator *Timing* foi associado a dois pseudo-fatores conforme o método da substituição apresentado na Seção 2.8. Seguindo isso foram atribuídas as letras que representam os fatores, conforme apresentado na Tabela 8, utilizando as letras A e B para denotar o fator de quatro níveis.

Tabela 8: Representação dos Fatores

Fator	Representação
<i>Timing</i>	A
<i>Timing</i>	B
Polia e Correia	C
Taxa de Redução	D
Barra	E
Aperto do Sistema	F
Curva	G
Zona neutra	H
<i>Starting power</i>	J

Fonte: Elaboração própria

Após a definição da representação dos fatores foi realizada a atribuição dos níveis +1 e -1 para os fatores de dois níveis, conforme a Tabela 9 e a aplicação do método da substituição para o *Timing*, conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 9: Atribuição dos níveis

Fator	-1	+1
Polia e Correia (C)	Micro-V	WR
Taxa de Redução (D)	2,7	2,2
Barra (E)	Leve	Pesada
Aperto do Sistema (F)	20,3 mm	19,3 mm
Curva (G)	5	7
Zona neutra (H)	5	10
<i>Starting power</i> (J)	5	10

Fonte: Elaboração própria

Tabela 10: Método da substituição aplicado ao fator *Timing*

<i>Timing</i> A	<i>Timing</i> B	AB	Níveis do fator original	Valor
-	-	+	0	8
-	+	-	1	10
+	-	-	2	12
+	+	+	3	14

Fonte: Elaboração própria

Considerando a decomposição do fator *Timing*, o experimento conta com um total de nove fatores. Sendo o número total de tratamentos para a realização de um experimento fatorial 2^9 igual a 512, a opção de se realizar o experimento completo foi descartada e partiu-se para utilização de um planejamento fatorial fracionado. Tendo em vista as restrições temporais do projeto decidiu-se pela execução de trinta e dois testes sem replicações, ou seja, um experimento fatorial fracionado 2^{9-4} .

A execução de um experimento desse tipo requer a presença de quatro fatores principais confundidos com interações, ou seja, quatro geradores. Com base na experiência do experimentador e na relevância teórica optou-se por não realizar confundimentos com os fatores taxa de redução (D), barra (E) e *Timing* (A e B), visto que esses possuíam maior potencial de influenciar na variável resposta.

Em seguida, passou-se para a análise do tempo necessário para realizar a troca entre os níveis para cada fator. Enquanto a mudança dos valores para os fatores categorizados como eletrônicos na Seção 3.2 requer apenas uma conexão da ESC com um computador, o que leva em torno de cinco minutos, os fatores mecânicos possuem uma variação mais acentuada, requerendo diferentes níveis de desmontagem do sistema para realização das trocas.

A alteração entre os valores selecionados para o fator aperto do sistema necessita apenas que o parafuso M20 seja desrosqueado para ajustar o parafuso sem cabeça utilizado como limitador. O tempo considerado para esse procedimento foi estimado em dez minutos devido à necessidade de se aguardar o tempo de cura do fixador anaeróbico utilizado nos elementos de fixação.

A alteração entre as duas barras diferentes necessita a desmontagem do mancal

frontal e dos componentes posicionados no eixo flangeado como a polia movida, as molas prato e a barra. Já a mudança da taxa de redução requer a desmontagem do bloco onde estão fixados os motores a fim de se realizar a substituição da polia motora. Para ambos os procedimentos de troca foi considerado um tempo de quarenta minutos.

Por fim, a troca do tipo de correia e polia sendo utilizados requer uma desmontagem completa do sistema, desde o mancal frontal até o bloco dos motores para substituição das correias e de ambas as polias, a movida e a motora. Considerado como o mais demorado, o tempo do procedimento adotado foi de setenta minutos.

Assim, os fatores foram agrupados em quatro estratos de dificuldade de troca a partir do tempo para realizar as alterações necessárias, conforme apresentado na Tabela 11.

Tabela 11: Divisão dos fatores em estratos

Mais difícil			Mais fácil
Estrato 1	Estrato 2	Estrato 3	Estrato 4
Polia e Correia	Taxa de redução	Aperto do sistema	<i>Timing</i>
	Barra		Zona neutra
			Curva
			<i>Starting power</i>

Fonte: Elaboração própria

Com isso o experimento a ser executado é classificado como fatorial fracionado 2^{9-4} *split-split-split plot* ou *split³ plot* com fatores de dois e quatro níveis.

Partindo disso foi possível definir o número mínimo de trocas para cada estrato de acordo com o critério do MS *design* apresentado na Seção 2.7. Utilizando a equação (4) e considerando que o número de trocas para o último estrato deve ser igual ao número total de experimentos realizados os resultados obtidos são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12: Número mínimo de troca por estrato

Estrato	Fatores	Trocas
1	C	2
2	D,E	4
3	F	8
4	A,B,G,H,J	32

Fonte: Elaboração própria

Tendo em vista todas as restrições definidas para o delineamento foi possível gerar as opções de planos a serem escolhidos para a realização dos experimentos. Para isso foi utilizada a função de delineamento de experimentos (DoE) do programa Minitab para a elaboração de um delineamento 2^{9-4} . Os planos 1, 2, 3 e 4 obtidos são apresentados nas Figuras 17 a 20

Figura 17: Plano de experimentos 1

Design Summary

Factors: 9 Base Design: 5; 32 Resolution: III
 Runs: 32 Replicates: 1 Fraction: 1/16
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

* NOTA * Some main effects are confounded with two-way interactions.

Design Generators: F = CDE; G = BCE; H = ABDE; J = ACD

Defining Relation: I = CDEF = BCEG = ABDEH = ACDJ = BDFG = ABCFH = AEFJ = ACDGH = ABDEGJ = BCEHJ = AEFHJ = ABCFGJ = BDFHJ = GHJ = CDEFGHJ

Fonte: Elaboração própria

Figura 18: Plano de experimentos 2

Design Summary

Factors: 9 Base Design: 5; 32 Resolution: IV
 Runs: 32 Replicates: 1 Fraction: 1/16
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: F = CDE; G = ABDE; H = ABCD; J = ABCE

Defining Relation: I = CDEF = ABDEG = ABCDH = ABCEJ = ABCFG = ABEFH = ABDFJ = CEGH = CDGJ = DEHJ = DFGH = EFGJ = CFHJ = ABGHJ = ABCDEFGHJ

Fonte: Elaboração própria

Figura 19: Plano de experimentos 3

Design Summary

Factors: 9 Base Design: 5; 32 Resolution: IV
 Runs: 32 Replicates: 1 Fraction: 1/16
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: F = CDE; G = ABCD; H = BCE; J = BDE

Defining Relation: I = CDEF = ABCDG = BCEH = BDEJ = ABEFG = BDFH = BCFJ = ADEGH = ACEGJ = CDHJ = ACFGH = ADFGJ = EFHJ = ABGHJ = ABCDEFGHJ

Fonte: Elaboração própria

Figura 20: Plano de experimentos 4

Design Summary

Factors: 9 Base Design: 5; 32 Resolution: IV
 Runs: 32 Replicates: 1 Fraction: 1/16
 Blocks: 1 Center pts (total): 0

Design Generators: F = CDE; G = ABCD; H = BDE; J = BCE

Defining Relation: I = CDEF = ABCDG = BDEH = BCEJ = ABEFG = BCFH = BDFJ = ACEGH = ADEGJ = CDHJ = ADFGH = ACFGJ = EFHJ = ABGHJ = ABCDEFGHJ

Fonte: Elaboração própria

Utilizando-se dos referenciais teóricos apresentados na Seção 2 as opções elaboradas foram analisadas para a escolha do melhor plano a ser executado. Partindo do conceito de resolução de um experimento, que diz respeito à ordem das interações com as

quais fatores principais estão confundidos, o plano de experimentos 1 foi descartado por ter resolução III, menor do que os demais candidatos.

Com a aplicação do conceito de *Word Length Pattern* apresentado na Seção 2.5 foi possível obter os vetores WLP dos experimentos: $W_2 = \{0, 13, 1, 0, 0, 1\}$, $W_3 = \{0, 10, 4, 0, 0, 1\}$ e $W_4 = \{0, 10, 4, 0, 0, 1\}$. Considerando que todos possuem resolução IV foi possível realizar a decomposição das palavras de tamanho 4 entre os dois tipos apresentados na Seção 2.8.1 para os planos 2, 3 e 4 representados por P_2 , P_3 e P_4 respectivamente, assim obtendo: $A_{40}(P_2) = 7$, $A_{41}(P_2) = 6$, $A_{40}(P_3) = A_{40}(P_4) = 3$ e $A_{41}(P_3) = A_{41}(P_4) = 7$.

Com base nisso o plano 2 foi considerado como tendo mais aberração do que os demais e foi descartado, enquanto os planos 3 e 4 se apresentaram como equivalentes entre si. Assim, o plano 4 foi escolhido para a realização dos experimentos, com os geradores $F = CDE$, $G = ABCD$, $H = BDE$ e $J = BCE$, com a relação definidora $I = CDEF = ABCDG = BDEH = BCEJ = ABEFG = BCFH = BDFJ = ACEGH = ADEGJ = CDHJ = ADFGH = ACFGJ = EFHJ = ABGHJ = ABCDEFGHJ$.

Com o plano experimental escolhido partiu-se para a elaboração da tabela de contrastes do experimento, seguindo o número mínimo de trocas obtido a partir do MS *design* apresentado na Tabela 12. Para isso, foi elaborada uma planilha em Excel contendo os níveis de cada fator coloridos para melhor destaque conforme apresentado na Figura 21.

Figura 21: Plano experimental executado

Tratamento	Polia e Correia (C)	Taxa de Redução (D)	Barras (E)	Aperto do Sistema (F = CDE)	Timing (A)	Timing (B)	Curva (G = ABCD)	Zona Neutra (H = BDE)	St Power (I = BCE)
1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1	-1
2	-1	1	1	-1	1	-1	1	-1	1
3	-1	1	1	-1	1	1	-1	1	-1
4	-1	1	1	-1	-1	-1	-1	-1	1
5	-1	1	-1	1	1	1	-1	-1	1
6	-1	1	-1	1	-1	-1	-1	1	-1
7	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1	1
8	-1	1	-1	1	1	-1	1	1	-1
9	-1	-1	1	1	1	1	1	-1	-1
10	-1	-1	1	1	1	-1	-1	1	1
11	-1	-1	1	1	-1	-1	1	1	1
12	-1	-1	1	1	-1	1	-1	-1	-1
13	-1	-1	-1	-1	1	1	1	1	1
14	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1
15	-1	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	-1
16	-1	-1	-1	-1	-1	1	-1	1	1
17	1	-1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1
18	1	-1	-1	1	-1	1	1	1	-1
19	1	-1	-1	1	1	-1	1	-1	1
20	1	-1	-1	1	1	1	-1	1	-1
21	1	-1	1	-1	-1	-1	-1	1	-1
22	1	-1	1	-1	1	-1	1	1	-1
23	1	-1	1	-1	-1	1	1	-1	1
24	1	-1	1	-1	1	1	-1	-1	1
25	1	1	-1	-1	1	1	1	-1	-1
26	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	1
27	1	1	-1	-1	1	-1	-1	1	1
28	1	1	-1	-1	-1	1	-1	-1	-1
29	1	1	1	1	-1	1	-1	1	1
30	1	1	1	1	1	-1	-1	-1	-1
31	1	1	1	1	-1	-1	1	-1	-1
32	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Fonte: Elaboração própria

Com os tratamentos e a ordem dos testes definidos o próximo passo foi a realização dos experimentos e a coleta dos dados de tempo de aceleração. O procedimento de medição empregado será descrito na Seção 3.4.

3.4 Metodologia de coleta de dados

Após ter definido o planejamento experimental e antes da realização dos experimentos foi necessário estabelecer uma metodologia para coletar os dados de maneira precisa e repetível.

Como a variável resposta do experimento é o tempo que o sistema leva para chegar em velocidade máxima a partir do repouso, em um primeiro momento considerou-se fazer o uso de dois dispositivos de medição distintos, um tacômetro fisicamente acoplado ao eixo da barra para medir a velocidade e um cronômetro para medir o tempo.

O cronômetro seria iniciado assim que o comando de operação fosse enviado a partir do controle de rádio-frequência e seria pausado após o tacômetro apontar a

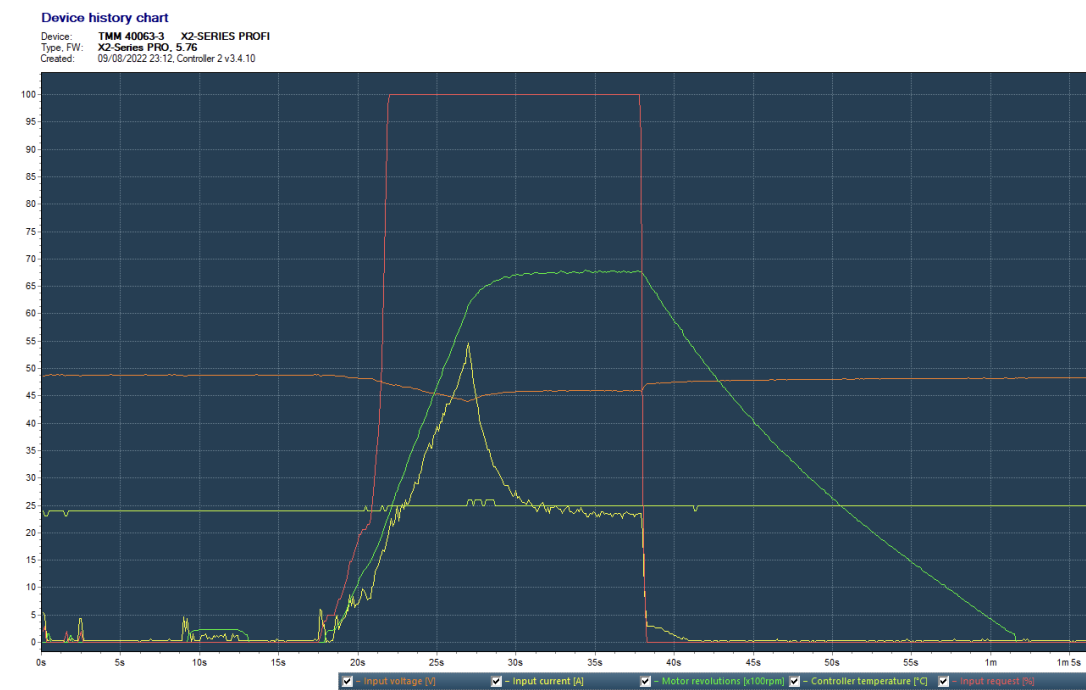
velocidade máxima teórica do sistema.

Essa alternativa no entanto foi descartada devido à complexidade e a susceptibilidade a erros de operação e dos próprios instrumentos de medida. Decidiu-se então fazer uso do sistema integrado de coleta e armazenamento de dados das eletrônicas controladoras.

O sistema denominado *MGM Controller History* entra em ação no momento em que a placa eletrônica é energizada, e coleta diversas informações a respeito do funcionamento como tensão, corrente, rotação do motor e temperatura em intervalos de cem milissegundos.

Após o uso e desligamento da placa eletrônica os dados podem ser coletados conectando-se a ESC em um computador equipado com o programa proprietário da marca fabricante e exportados em formato de gráficos ou planilhas, tais como apresentados nas Figura 22 e 23.

Figura 22: Exemplo de gráfico exportado pela controladora



Fonte: Elaboração própria

Figura 23: Exemplo de planilha exportada pela controladora

Device history data						
Device	TMM 40063-3 X2-SERIES PROFI					
Type	X2-Series PRO					
Firmware	5.76					
Serial number	33FF7106564B363931102343					
Created	21/07/2022, 22:02			Controller 2 v3.4.10		

Time	Input voltage [V]	Input current [A]	Motor revolutions [x100rpm]	Controller temperature [°C]	Peak current [A]	Battery internal voltage [V]
100ms	50.036	1.3	0	21	43	50.054
200ms	50.036	0	0	21	29	50.036
300ms	50.036	4.3	0	21	36	50.036
400ms	50.089	0	0	21	33	50.071
500ms	50.106	2.3	1.3	21	29	50.141
600ms	50.106	3	1.3	21	25	50.123
700ms	50.158	3.3	1.6	21	20	50.158
800ms	50.193	0	1.8	21	18	50.176
900ms	50.193	1.6	1.9	21	12	50.193
1s	50.21	0	2	21	8	50.21
1s 100ms	50.21	1.6	2.1	21	10	50.21
1s 200ms	50.21	1.6	2.1	21	5	50.228
1s 300ms	50.228	1.6	2.2	21	5	50.228
1s 400ms	50.228	0	2.2	21	4	50.228
1s 500ms	50.263	0.3	2.2	21	3	50.228
1s 600ms	50.245	0.3	2.3	21	5	50.228
1s 700ms	50.21	0	2.3	21	4	50.245
1s 800ms	50.21	2	2.3	21	6	50.193
1s 900ms	50.158	1.6	2.3	21	19	50.176
2s	50.106	0.6	2.4	21	26	50.106
2s 100ms	50.002	5.7	2.7	21	66	49.967
2s 200ms	49.914	6.4	3	21	80	49.862
2s 300ms	49.862	2.3	3.5	21	95	49.827

Fonte: Elaboração própria

A extração do valor obtido para a variável resposta em cada experimento foi realizada a partir dos dados em formato de planilha, utilizando um algoritmo desenvolvido na linguagem *Python* e a biblioteca *openpyxl* para fazer a leitura dos arquivos em formato *xlsx*. Decidiu-se realizar a medida de tempo até o sistema alcançar 90% da velocidade máxima com base na definição de tempo de subida adotada para controle de sistemas dinâmicos [31].

O funcionamento do algoritmo seguia, de maneira geral, os seguintes passos:

1. Varredura dos valores de rotação para definição do momento de início do movimento;
2. Varredura dos valores de rotação para definição da velocidade máxima alcançada;
3. Contagem da quantidade de valores entre o início do movimento e o alcance de 90% da velocidade máxima;
4. Cálculo do tempo a partir da multiplicação do número de valores pelo intervalo em milissegundos entre eles.
5. Conversão e disponibilização do valor calculado em segundos.

A Figura 24 apresenta um exemplo da resposta do algoritmo, aplicado à planilha exportada dos testes preliminares realizados antes do processo de planejamento de experimentos, tendo como resposta um tempo de aceleração de 18,5 segundos.

Figura 24: Exemplo do funcionamento do algoritmo em *Python*

```
In [2]: runfile('C:/Users/angel/Documents/POLI-USP/6 ano/Primeiro Semestre/
TCC/primeiros testes/extract_log2.py', wdir='C:/Users/angel/Documents/POLI-
USP/6 ano/Primeiro Semestre/TCC/primeiros testes')
A corrente de pico foi 72.8 A, no instante 2m 56s 800ms
A rotação máxima foi de 6170.0 RPM, no instante 3m 1s
O tempo de aceleração foi de 18.5 segundos
<Cell 'Page 1'.B14>
```

Fonte: Elaboração própria

A utilização do algoritmo em conjunto com os dados exportados pela controladora permitiu que os dados fossem obtidos de maneira sistemática e repetível, minimizando o efeito de erros de operação de instrumentos de medição manuais. Assim, após a elaboração do método de coleta partiu-se para a execução dos experimentos seguindo o planejamento apresentado na Seção 3.3.

3.5 Realização do experimento

Com todos os pré-requisitos concluídos, a realização dos experimentos foi iniciada, preparando o local de testes e os sistemas do robô. Devido a fatores de segurança e às dificuldades de manipulação do projeto, dado o peso superior a cem quilogramas, todos os testes foram realizados na presença de dois experimentadores, com uso de equipamentos de proteção individual e barreiras físicas de proteção do mesmo material utilizado na composição das arenas presentes em competições de combate de robô.

Para todas as rodadas de experimento o robô foi posicionado sobre uma chapa metálica de aço a fim de se aproximar das condições de atrito normalmente presentes nas arenas de combate. Com o sistema de locomoção totalmente desativado, o sistema de rotação da barra foi montado de acordo com os parâmetros do primeiro tratamento e as alterações foram sendo feitas no decorrer dos experimentos.

Para a execução de uma rodada de testes as placas controladoras eram conectadas às baterias de polímero de lítio, os experimentadores se posicionavam atrás das barreiras de segurança e realizam a ativação do sistema por meio do envio de um comando padronizado a partir do controle de rádio-frequência. Tendo em vista o resultado obtido nos testes

preliminares, após o envio do comando eram cronometrados vinte segundos para que o sistema alcançasse rotação máxima e o experimento era finalizado com o envio do comando de desativação.

Após isso as baterias eram desligadas das controladoras e as ESCs eram conectadas em um computador para a obtenção dos dados, que eram salvos para análise posterior. Vale ressaltar que a capacidade das baterias era suficiente para a realização de aproximadamente oito testes, sendo que o tempo de recarga de ambas girava em torno de duas horas.

4 RESULTADOS DO PLANO EXPERIMENTAL SELECIONADO

Este Capítulo apresenta os resultados obtidos e a análise da influência dos fatores na variável resposta. Como o experimento foi realizado sem replicações e com restrições de aleatorização a análise será feita por meio de gráficos de probabilidade normal para cada estrato de dificuldade de troca, conforme discutido na Seção 2.6.1.

4.1 Resultados obtidos no plano selecionado

Após todos os trinta e dois experimentos terem sido realizados e seus dados armazenados, foi possível realizar a extração do tempo de aceleração do sistema a partir do algoritmo elaborado. Os valores para o tempo de aceleração do sistema em segundos para cada tratamento, conforme a ordem do plano escolhido apresentada na Seção 3.3, estão representados na Tabela 13.

Tabela 13: Valores da variável resposta

Tratamento	Resposta [s]	Tratamento	Resposta [s]
1	10,7	17	7,9
2	11,6	18	9,6
3	10,4	19	10
4	12,1	20	8,6
5	9,7	21	9,1
6	8,9	22	9,9
7	10,2	23	10
8	10	24	8,8
9	10,7	25	11,1
10	9,3	26	10,3
11	10,3	27	8,6
12	10	28	8,9
13	9,9	29	12,1
14	8,6	30	11,7
15	10,1	31	12,7
16	8,6	32	14,2

Fonte: Elaboração própria

4.2 Análise dos resultados do plano selecionado

Com a obtenção dos tempos de aceleração registrados para cada tratamento foi possível dar início à análise da influência dos fatores na resposta, buscando qual seria a melhor configuração para atender aos níveis de competitividade buscados pela equipe.

Conforme tratado no Capítulo 2 de revisão bibliográfica, a primeira etapa de análise consistiu no cálculo dos estimadores dos efeitos de todos os fatores e interações de segundo grau para cada estrato de dificuldade de troca definido. Os valores calculados são apresentados nas Tabelas 14 a 17.

Tabela 14: Estimadores dos efeitos do primeiro estrato

Fator	Estimador calculado
C	0,15

Fonte: Elaboração própria

Tabela 15: Estimadores dos efeitos do segundo estrato

Fator ou Interação	Estimador calculado
D	1,36
E	1,41
DE	0,81
DC	0,60
EC	0,275

Fonte: Elaboração própria

Tabela 16: Estimadores dos efeitos do terceiro estrato

Fator ou Interação	Estimador calculado
F	0,45
CF	0,81
DF	0,28
EF	0,60

Fonte: Elaboração própria

Tabela 17: Estimadores dos efeitos do quarto estrato

Fator ou Interação	Estimador calculado	Fator ou Interação	Estimador calculado
A	0,10	BH	0,81
B	0,15	BJ	0,28
AB	0,31	CG	0,48
G	1,125	CH	0,39
H	-0,23	CJ	-0,13
J	0,16	DG	-0,08
AC	0,19	DH	-0,13
AD	0,08	DJ	0,39
AE	-0,15	EG	-0,30
AF	0,21	EH	0,02
AG	0,34	EJ	0,24
AH	0,06	FG	0,06
AJ	-0,025	FH	0,24
BD	0,02	FJ	0,02
BE	-0,13	GH	0,04
BC	0,24	GJ	0,05
BF	0,39	HJ	0,6
BG	0,04		

Fonte: Elaboração própria

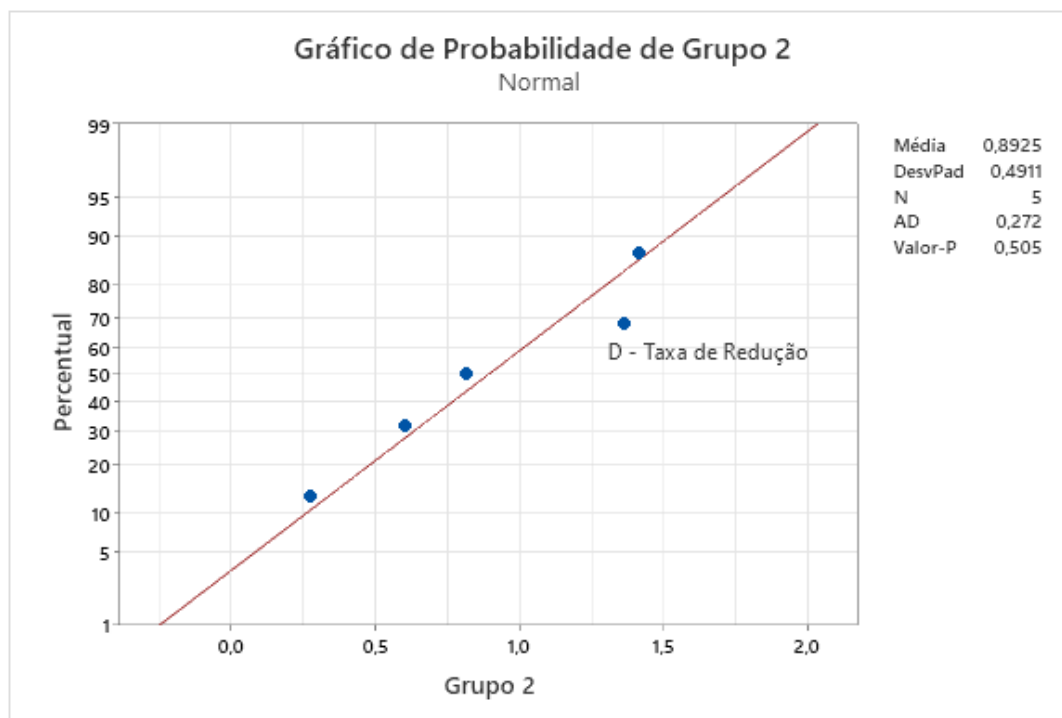
Em posse dos estimadores dos efeitos foram elaborados os gráficos de probabilidade normal para cada um dos estratos de dificuldade de troca. Tendo em vista que o fator C (Polia e Correia) é o único componente do primeiro estrato, o seu gráfico contaria apenas com um ponto, o que impossibilita a aferição de sua significância por esse meio. Assim, a sua análise deve ser feita por meio das interações do fator C com fatores presentes nos demais estratos. Apesar do fator F (Aperto do sistema) também figurar como o único do seu estrato, o seu gráfico ainda conta com suas interações com os fatores de estratos anteriores e assim é possível realizar a análise gráfica.

Os gráficos de probabilidade dos efeitos para cada estrato estão apresentados nas Figuras 25 a 27 e logo após cada uma delas será descrita a análise obtida, indicando os

fatores significativos encontrados e os níveis ótimos para alcançar os objetivos traçados no início do delineamento.

Começando pelo segundo estrato, que contava com os fatores taxa de redução (D) e barra (E), o gráfico obtido é apresentado na Figura 25.

Figura 25: Gráfico de probabilidade normal do segundo estrato

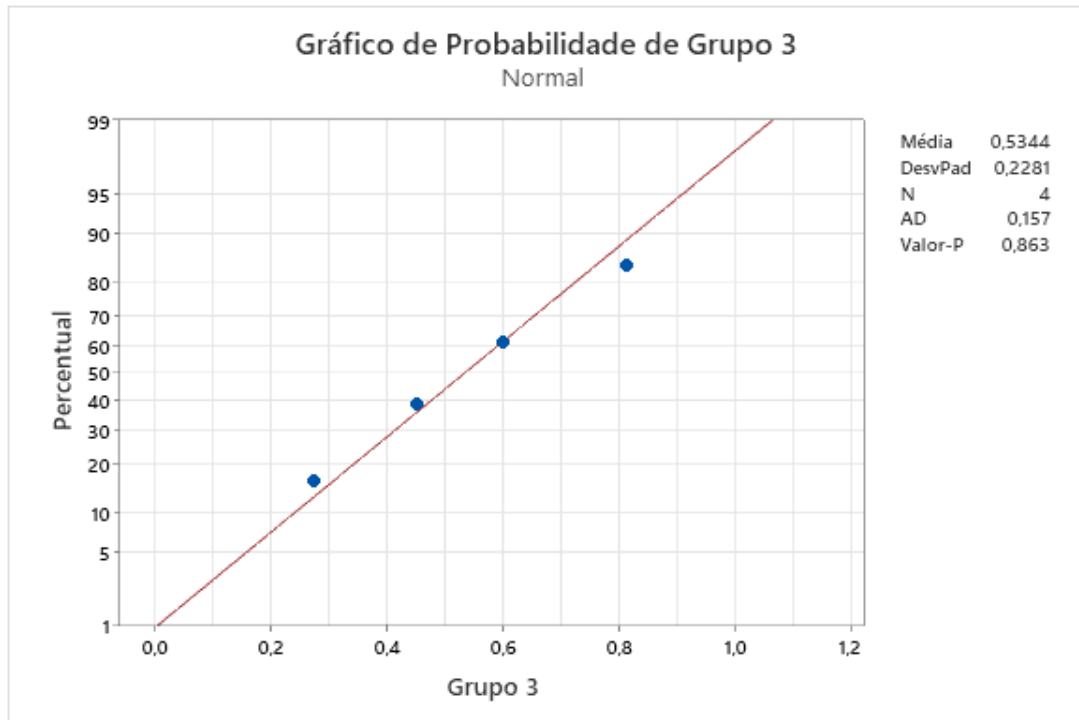


Fonte: Elaboração própria

Entre ambos os efeitos, sua interação (DE) e as interações com o efeito C (DC, EC), apenas o fator Taxa de redução mostrou significância quanto ao valor da variável resposta. Analisando-se a estimativa do efeito do fator é possível ver que o seu nível baixo (-1), que representa a taxa de redução de 2,7, constitui a configuração mais favorável para um menor tempo de aceleração da barra e sendo assim deve ser adotado na montagem ideal do sistema.

Passado para o terceiro estrato, onde são analisados o fator Aperto do sistema (F) e suas interações com os fatores C,D e E das divisões anteriores, o gráfico obtido é apresentado na Figura 26.

Figura 26: Gráfico de probabilidade normal do terceiro estrato

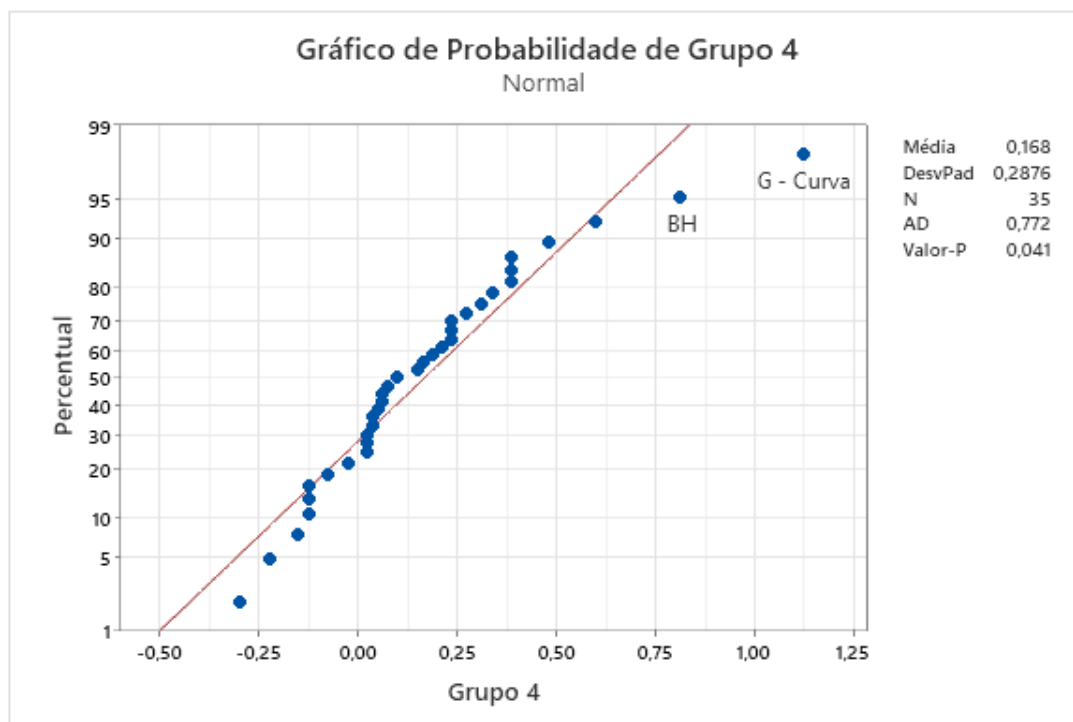


Fonte: Elaboração própria

Nesse caso, não foi possível observar nenhum ponto desviando significativamente da linha traçada para representação da distribuição normal teórica e portanto, nenhum dos fatores ou interações presentes nesse estrato foi considerado como significativo para o tempo de aceleração no sistema. Assim, a escolha do valor do fator F para a configuração ideal é livre e ambos os níveis podem ser utilizados.

O quarto e último estrato apresenta o fator de quatro níveis (*Timing*) dividido nos dois pseudo-fatores A e B e os demais fatores de dois níveis Curva (G), Zona neutra (H) e *Starting Power* (J), bem como todas as interações entre eles e com os fatores dos estratos anteriores. O gráfico obtido é apresentado na Figura 27.

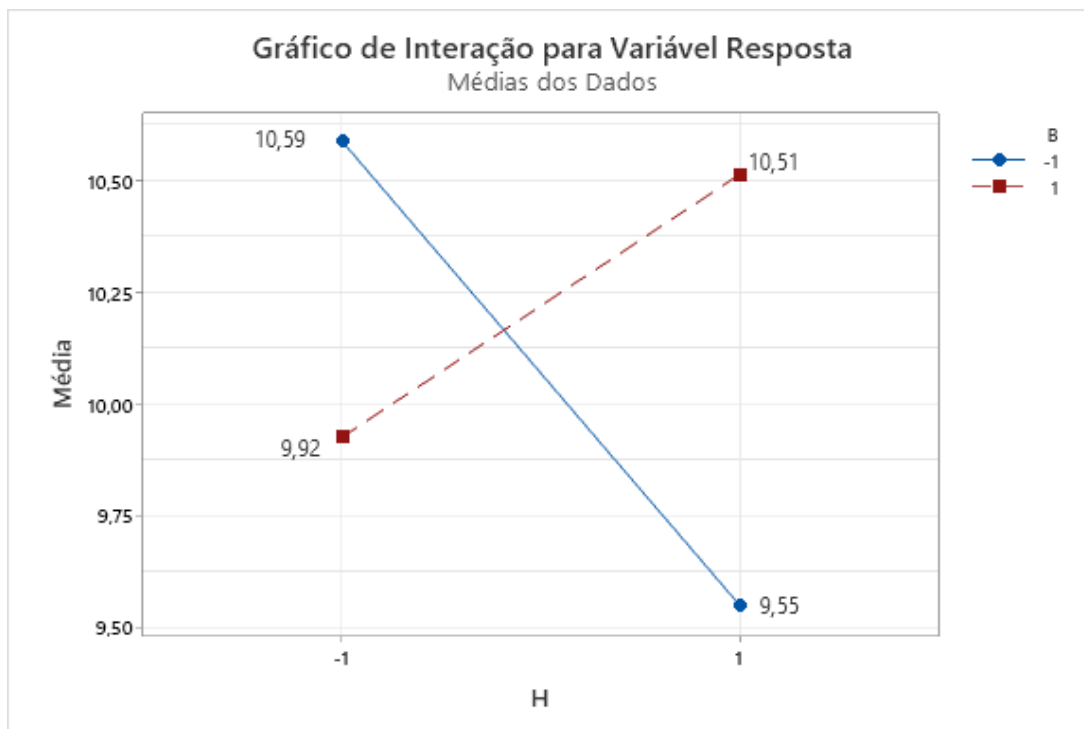
Figura 27: Gráfico de probabilidade normal do quarto estrato



Fonte: Elaboração própria

Os pontos destacados do gráfico indicam a significância da curva de aceleração e da interação entre o pseudo-fator B (*Timing*) e o fator H (*Zona neutra*). Para o caso da curva de aceleração é possível analisar a partir do gráfico e do efeito calculado que o nível baixo contribui para uma redução da variável resposta, assim, a configuração ideal do sistema deve fazer uso da curva de cinco segundos. Já para BH, é possível realizar uma análise gráfica da interação entre os fatores, conforme apresentado na Figura 28. A partir dela é possível observar que os menores tempos de aceleração são obtidos, em média, com o fator B em seu nível baixo e o fator H em seu nível alto, com o caso em que o fator B está no nível baixo e o fator H no nível alto também apresentando resultados melhores do que as demais combinações.

Figura 28: Gráfico de Interação entre fatores B e H



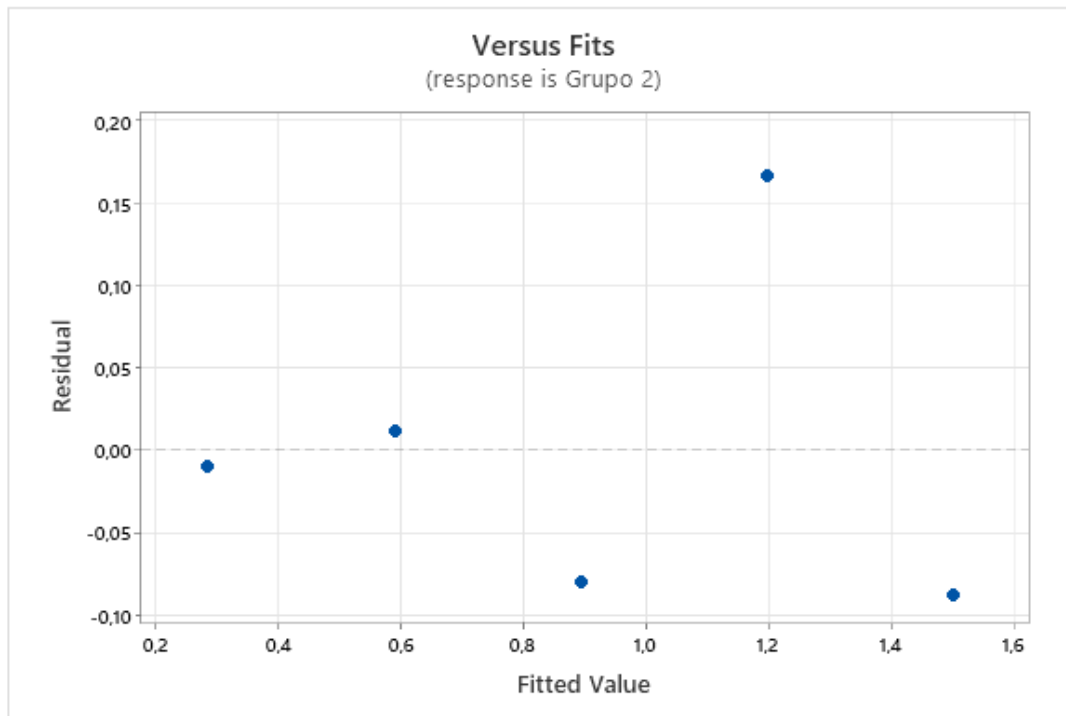
Fonte: Elaboração própria

Todavia, devido ao confundimento realizado com o fator H ($H = BDE$), a interação BH é confundida com a interação DE, sendo que não é possível estabelecer, apenas com a realização dos trinta e dois experimentos do plano, a confirmação de qual delas se apresenta ativa. Assim, é recomendado que sejam realizados experimentos confirmatórios, conforme tratado no Capítulo 5 de conclusões e recomendações.

4.2.1 Análise dos Resíduos

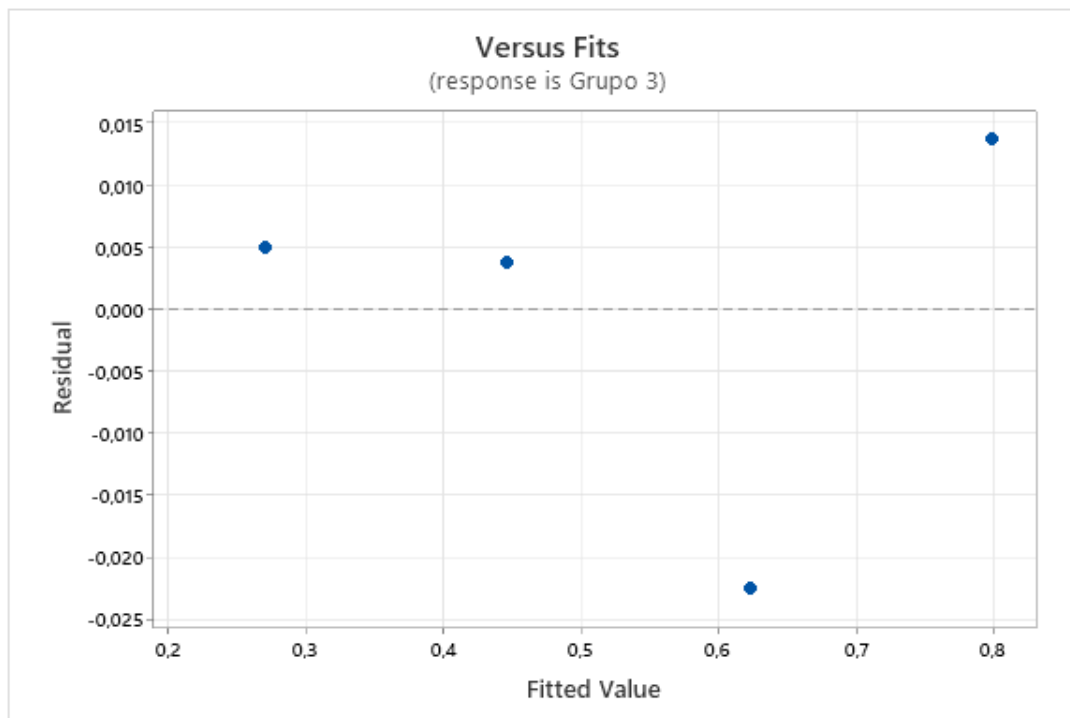
A fim de se analisar os resíduos dos experimentos também foram traçados, para cada estrato, o gráfico de resíduos por valor ajustado, nos quais não foram encontrados grandes desvios ou tendências. Os gráficos elaborados são apresentados nas Figuras 29, 30 e 31.

Figura 29: Gráfico de resíduos do segundo estrato



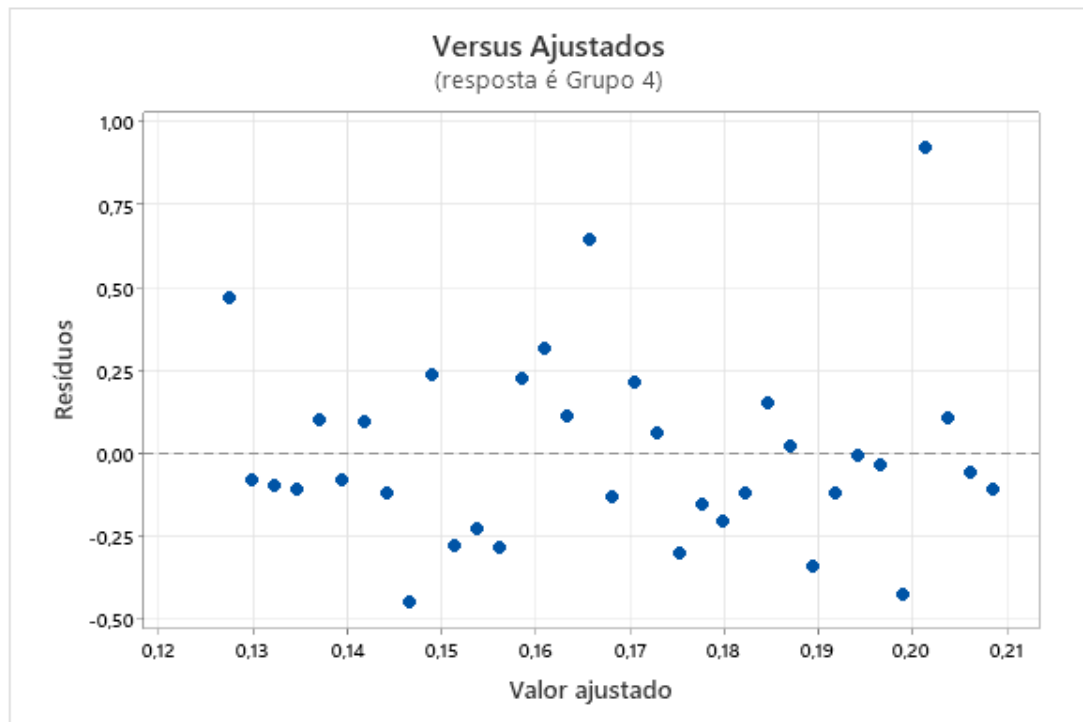
Fonte: Elaboração própria

Figura 30: Gráfico de resíduos do terceiro estrato



Fonte: Elaboração própria

Figura 31: Gráfico de resíduos do quarto estrato



Fonte: Elaboração própria

4.2.2 Configuração recomendada do sistema

Em função da análise realizada e a partir dos resultados obtidos é possível apontar os fatores D e G como significantes no tempo de aceleração da barra do robô, enquanto não há indicações de atividade dos fatores C (Polia e Correia), F (Aperto do sistema) e J (*Starting power*). Existem indícios também da significância da interação entre os fatores B e H, no entanto devido aos confundimentos realizados, se faz necessária a realização de experimentos confirmatórios para que se possa afirmar a relevância de ambos.

Com base nisso e nos melhores resultados de tempo obtidos ao longo da execução dos experimentos, foi possível também estipular uma configuração preliminar a ser utilizada no projeto antes da obtenção dos valores ótimos, seguindo os níveis definidos no experimento 17 apresentado na Figura 21, no qual foi obtido um tempo de aceleração de 7,9 segundos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O desenvolvimento do planejamento experimental tratado ao longo desse trabalho permitiu não só um melhor entendimento dos sistemas do projeto como também uma mudança de paradigma na busca da melhor configuração de um robô de combate. Enquanto em projetos anteriores, ligados a um grupo de extensão da Escola Politécnica da USP, a procura pelo arranjo ótimo de um determinado sistema era feita de maneira não planejada e com base na tentativa e erro, a elaboração de uma primeira série de experimentos planejados permitiu a abertura de uma nova visão, mais estruturada e eficiente a ser aplicada não só no robô Samurai como também em futuros projetos, sejam eles profissionais ou pessoais.

Comparando-se os resultados obtidos ao longo da execução desse trabalho com os testes preliminares é possível visualizar uma notável redução no tempo de aceleração, que passou de 18,5 segundos para 7,9 segundos, uma diminuição de aproximadamente 57% que contribui enormemente para a competitividade do projeto.

Ainda, além de alcançar um dos objetivos traçados, na forma da redução da variável resposta, também foi possível descartar fatores que anteriormente e de forma empírica eram considerados como relevantes para o sistema, simplificando a elaboração de planos futuros.

Os resultados apresentados na análise do quarto estrato, na Seção 4.2, indicam a necessidade de realização de um experimento confirmatório para se aferir a significância das interações confundidas, no entanto, as conclusões obtidas com esse primeiro delineamento foram suficientes para que o projeto apresentasse um ótimo desempenho, permitindo que os membros envolvidos se tornassem a terceira equipe a representar o Brasil na *Battlebots*.

O desenvolvimento desse trabalho de formatura também foi fundamental para a expansão dos conhecimentos do aluno a respeito de planejamentos de experimentos, com o uso de assuntos que não são abordados ao longo do curso de graduação como experimentos com diferentes níveis de dificuldade de troca, *word length pattern*, o uso de fatores de quatro níveis como pseudo-fatores e o critério do número mínimo de trocas, permitindo assim uma nova visão a respeito do uso prático do delineamento de experimentos.

A associação de um projeto físico para a aplicação prática dos novos assuntos também foi de suma importância na motivação e absorção dos conteúdos, de um modo

que a realização de apenas uma revisão teórica não teria permitido.

Como já abordado, a fim de dar continuidade ao trabalho, sugere-se a realização de experimentos confirmatórios para um entendimento pleno do sistema e a obtenção de uma configuração ótima. Essa recomendação será levada à equipe do projeto como próximo passo na busca constante por melhorias no robô a fim de se representar da melhor maneira a engenharia brasileira em competições prestigiadas como a *Battlebots*.

REFERÊNCIAS

- 1 FUKS, Y. Contribuições para delineamento de experimentos. São Paulo, 2013.
- 2 MONTGOMERY, D. C. Introdução Ao Controle Estatístico Da Qualidade . [S.l.]: Grupo Gen-LTC, 2000.
- 3 Liga Brasileira de Robótica. REGRAS PARA AS COMPETIÇÕES DE COMBATE DE ROBÔS DA LBR. Acessado em 01 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.ligabrasileiraderobotica.com.br/regras-e-regulamentos>.
- 4 RUEDA, O. A. S. Controle do motor de indução para veículos elétricos mediante o uso de duplo conversor. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro Agosto de, 2014.
- 5 TESKE, S. et al. Energy [r] evolution-a sustainable world energy outlook. [S.l.]: Gre-enpeace International, EREC and GWEC, 2012.
- 6 ZERAOUlia, M.; BENBOUZID, M. E. H.; DIALLO, D. Electric motor drive selection issues for hev propulsion systems: A comparative study. IEEE Transactions on Vehicular technology, IEEE, v. 55, n. 6, p. 1756–1764, 2006.
- 7 BRUSHED MOTOR - 12 TO 30 VDC - COMBAT - S28-D4-400X. Aces-sado 01 de maio de 2023. Disponível em: <https://magmotorstore.com/products/500280443-s28-d4-400xl>.
- 8 BATTLEBOTS. Acessado 02 de maio de 2023. Disponível em: <https://en.wikipedia.org/wiki/BattleBots>.
- 9 Battlebots. WHERE TO FIND BATTLEBOTS WORLDWIDE. 2023. Acessado 02 de maio de 2023. Disponível em: <https://battlebots.com/local/>.
- 10 BATTLEBOTS. Acessado 02 de maio de 2023. Disponível em: <https://ustvdb.com/networks/discovery/shows/battlebots/>.
- 11 BATTLEBOTS. 2023. Acessado 02 de maio de 2023. Disponível em: <https://battlebots.com>.
- 12 BATTLEBOTS. Judges' Guide - Rev. 2022.0. Acessado em 10 de maio de 2023. Dis-ponível em: <https://battlebots.com/wp-content/uploads/2022/09/Judges-Guide.2022.0.pdf>.
- 13 SULLINS, J. P. Fight! robot, fight! the amateur robotics movement in the united states. The International Journal of Technology, Knowledge, and Society, v. 1, n. 6, p. 75–84, 2006.
- 14 KWON, H. Effect of middle school students' motivation to learn technology on their attitudes toward engineering. Eurasia Journal of Mathematics, Science and Technology Education, Modestum LTD, v. 12, n. 9, p. 2281–2294, 2016.

- 15 WILSON-LOPEZ, A.; SMITH, E. R.; HOUSEHOLDER, D. L. High school students' cognitive activity while solving authentic problems through engineering design processes. In: 2013 ASEE Annual Conference & Exposition. Atlanta, Georgia, United States: ASEE Conferences, 2013. <https://peer.asee.org/19677>.
- 16 BROWN, A. L.; BRANSFORD, J.; COCKING, R. R. How people learn: Brain, mind, experience, and school. [S.l.]: National Academy Press, 1999.
- 17 EISENKRAFT, A. Millikan Lecture 2009: Physics for all: From special needs to Olympiads. American Journal of Physics, v. 78, n. 4, p. 328–337, 04 2010. ISSN 0002-9505. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.3293130>.
- 18 NEUMOTORS 8000 series bldc motors. Acessado 07 de maio de 2023. Disponível em: <https://neumotors.com/brushless-motor-manufacturing/neumotors-8000-series-bldc-motors-7500-30000-watts/>.
- 19 YEDAMALE, P. Brushless dc (bldc) motor fundamentals. Microchip Technology Inc, v. 20, n. 1, p. 3–15, 2003.
- 20 BOX, G. E.; HUNTER, J. S.; HUNTER, W. G. Statistics for experimenters. [S.l.]: Wiley Hoboken, NJ, 2005.
- 21 WU, C.; HAMADA, M. Experiments: Planning, Analysis, and Parameter Design Optimization. [S.l.]: Wiley India Pvt. Limited, 2009. ISBN 9788126524525.
- 22 MILLIKEN, G. A.; JOHNSON, D. E. Analysis of messy data volume 1: designed experiments. [S.l.]: CRC Press, 2009. v. 1.
- 23 VIVACQUA, C. A.; HO, L. L.; PINHO, A. L. Mixed two-and four-level experimental designs for interchangeable parts with different degrees of assembly difficulty. International Journal of Quality & Reliability Management, Emerald Publishing Limited, v. 34, n. 8, p. 1152–1166, 2017.
- 24 HO, L. L.; VIVACQUA, C. A.; PINHO, A. L. S. de. Extensions and variants of mixed-level split-plot designs for manufacturing planning and optimization. Quality and Reliability Engineering International, Wiley Online Library, v. 34, n. 8, p. 1544–1555, 2018.
- 25 HO, L. L.; VIVACQUA, C. A.; PINHO, A. L. Santos de. Minimum setup minimum aberration two-level split-plot type designs for physical prototype testing. Quality and Reliability Engineering International, Wiley Online Library, v. 32, n. 3, p. 1007–1020, 2016.
- 26 HARRINGTON, A. M.; KRONINGER, C. Characterization of small dc brushed and brushless motors. [S.l.], 2013.
- 27 X2-SERIES - 25063 / 40063 X2-SERIES PRO - 25063 / 40063. Acessado 10 de maio de 2023. Disponível em: https://www.mgm-controllers.com/materials/FileAdmin/x2-series-250-400-mz-b15_111113-f-eng1.pdf.
- 28 GERBERT, G. Belt Slip—A Unified Approach. Journal of Mechanical Design, v. 118, n. 3, p. 432–438, 09 1996. ISSN 1050-0472.

- 29 CORREIA Poly V: o que é, para que serve e quanto tempo dura. Acessado 25 de maio de 2023. Disponível em: <https://rexon.com.br/correia-poly-v-o-que-e-para-que-serve-e-quanto-tempo-dura/>.
- 30 CORREIA IND. OPTIBELT WR 3 CANAIS 3M515. Acessado 25 de maio de 2023. Disponível em: <https://www.correiaspolias.com.br/nc8z1yt3q-correia-ind-optibelt-wr-3-canais-3m500>.
- 31 CHERRY, E.; HOOPER, D. E. Amplifying devices and low-pass amplifier design. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1968.