

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA - CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NA TRAÇÃO DE
ROBÔS CORTADORES DE GRAMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE FORÇA

por

Stefan Lukas Moser

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, novembro de 2020

Moser, Stefan Lukas

Estudo da influência de diferentes parâmetros na tração de robôs cortadores de grama através da medição de força / Stefan Lukas Moser. -- 2020.
28 f.

Orientador: Juan Pablo Raggio Quintas.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Curso de Engenharia Mecânica, Porto Alegre, BR-RS, 2020.

1. Força. 2. Tração. 3. Roda. 4. Experimento. 5. Robô. I. Quintas, Juan Pablo Raggio, orient. II. Título.

Stefan Lukas Moser

ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NA TRAÇÃO DE
ROBÔS CORTADORES DE GRAMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE FORÇA

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Mário Roland Sobczyk Sobrinho
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Mecânica dos Sólidos

Orientador: Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Comissão de Avaliação:

Prof. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Herbert Martins Gomes

Prof. Walter Jesus Paucar Casas

Porto Alegre, novembro de 2020

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer a Deus.

Agradeço aos meus pais e esposa, que caminharam ao meu lado, sendo fonte de apoio em toda a trajetória de graduação.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul, que defende e provê um ensino de qualidade, gratuito e acessível.

À todos os professores do curso, por transmitirem seu conhecimento com empenho e dedicação.

Às empresas em que realizei estágio, que me ensinaram e auxiliaram financeiramente desde o terceiro ano de graduação até o final da graduação.

Moser, Stefan Lukas. ESTUDO DA INFLUÊNCIA DE DIFERENTES PARÂMETROS NA TRAÇÃO DE ROBÔS CORTADORES DE GRAMA ATRAVÉS DA MEDIÇÃO DE FORÇA. 2020. 15. Monografia de Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

RESUMO

Este trabalho objetiva estudar robôs cortadores de grama, especificamente a força de tração influenciada por três parâmetros: o perfil da roda, o tipo de superfície e a inclinação da superfície. O método de planejamento de experimentos define o experimento, incluindo a ordem e as combinações de parâmetros, além de auxiliar na análise dos resultados. Para cada parâmetro são definidos os níveis máximo e mínimo de acordo com a utilização comum do produto. Para realizar os experimentos é construída uma bancada, incluindo equipamentos de medição contendo uma célula de carga e um sistema de aquisição de dados. Após calibração do sistema, as medições de força de tração são realizadas fornecendo dados de força em função do tempo. Com esses dados são gerados os gráficos, dos quais são extraídas a força média e máxima de cada experimento. Assim, é obtida a análise de efeitos padronizados que mostra o nível da influência de cada parâmetro: a inclinação com a maior influência, seguida do tipo de superfície e do perfil da roda. Além disso, os dados permitem definir o pior caso, para o qual os perfis de roda devem ser projetados: inclinação alta e baixa rugosidade de superfície.

PALAVRAS-CHAVE: solo, inclinação, roda, perfil

Moser, Stefan Lukas. STUDY OF THE DIFFERENT PARAMENTERS ON THE TRACTION FORCE OF AUTOMATIC LAWN MOWERS THROUGH FORCE MEASUREMENT. 2020. 15. Mechanical Engineering End of Course Monography – Mechanical Engineering degree, The Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

ABSTRACT

This monography aims to study lawn mower robots, specifically the influence of three traction force parameters: the tire profile, the surface type and the inclination of the surface. The design of experiments method defines the experiment, including the order and combinations of parameters, besides helping with the analysis of the results. For each parameter, the maximum and minimum levels are defined according to the regular usage of the product. To carry out the experiments, a bench is built, including measuring equipment containing a load cell and a data acquisition system. With the calibrated system, tensile force measurements are performed providing force data as a function of time. With the data the graphs are generated, from which the average and maximum force of each experiment are extracted. This results in the analysis of standardized effects that show the influence of each parameter: The inclination with the biggest influence, followed by the type of surface and the wheel profile. In addition, the data allows to define the worst case, for which the wheel profiles should be designed: high inclination and small surface roughness.

KEYWORDS: soil, inclination, wheel, profile

NOMENCLATURA

Símbolos

N	Força	[N]
kg	Massa	[kg]
x	Sinal de entrada	
y	Sinal de saída	
k	Quantidade de variáveis	
R	Quantidade de repetições	
$^{\circ}$	Graus	[$^{\circ}$]

Abreviaturas e acrônimos

cm	centímetros	[cm]
----	-------------	------

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. METODOLOGIA.....	2
2.1. Planejamento de experimentos	2
2.2. Definição dos Parâmetros	3
2.3 Bancada de Experimentos.....	5
2.4 Sensoriamento e Calibração.....	6
2.5 Incerteza de medição.....	8
3. RESULTADOS	9
4. CONCLUSÃO.....	14
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	16
APÊNDICE A	17

1. INTRODUÇÃO

A agricultura e interação com a natureza, como a jardinagem, estão presentes na vida do ser humano desde os seus primórdios. Até hoje, o cultivo da agricultura é a principal forma de subsistência do ser humano, e sem os avanços tecnológicos nesta área, não seria possível produzir alimento para as mais de sete bilhões de pessoas que vivem na terra. A invenção do trator faz parte essencial dessa história e continua sendo um equipamento de grande importância até os dias de hoje. Existem diversos estudos sobre qual perfil de pneu garante uma melhor tração.

Com o avanço da tecnologia, os dispositivos autônomos que realizam tarefas do dia-a-dia das pessoas crescem em número e em variedade. Os robôs, que inicialmente eram utilizados para jogar xadrez, ou manter pequenos diálogos, vêm sendo empregados em tarefas básicas do cotidiano da população. Hoje, o emprego de robôs para aspirar a casa, ou passar um pano é amplamente difundido mesmo nos países com menor desenvolvimento. O preço destes equipamentos também vem caindo anualmente e a variedade de marcas está em crescimento.

Uma tarefa árdua, que faz parte do cotidiano de diversas famílias, e também gera custos em empreendimentos e áreas comerciais, é o corte de grama. Dessa forma, estão surgindo cada vez mais robôs capazes de executar a tarefa em questão. Apesar do valor alto e da escassez de soluções no mercado brasileiro, é somente uma questão de tempo para que essa tecnologia se difunda e popularize. Como objeto desta monografia, foi escolhido um robô que está presente na grande maioria dos países desenvolvidos. Tais produtos estão sendo testados no Brasil, e, por essa razão, a tecnologia está disponível para a realização dos testes. Existem alguns pontos negativos no uso desta tecnologia que contribuem para uma certa resistência dos consumidores. O principal deles, é o fato de os robôs ficarem facilmente presos em buracos da pista. Como seu tamanho é relativamente pequeno, em comparação com os tratores utilizados para o corte de grama, os robôs cortadores de grama têm maior facilidade de atolar em depressões no relevo. O intuito deste estudo é gerar conhecimento a respeito de quais parâmetros influenciam a força, e também qual o tamanho dessa influência.

Atualmente existem poucos artigos publicados sobre ensaios em robôs cortadores de grama, porém foram encontrados diversos trabalhos sobre máquinas agrícolas, que são amplamente estudadas devido à sua importância para o setor agropecuário, uma das bases da economia mundial. Essas máquinas possuem um funcionamento e aplicação similares ao estudado neste experimento. De acordo com Ferreira et al. (1999), foram estudados alguns parâmetros, entre eles a pressão interna do pneu e a condição da superfície. O teste consiste em medir a força de tração de um trator agrícola com tração em duas rodas, em diferentes cenários. Foi instalado um sistema de medição entre o trator e a carga a ser aplicada, sendo realizadas medições para diferentes superfícies, pressões internas e cargas, analisando a influência da pressão interna dos pneus em relação à força de tração.

Outro estudo relevante para o assunto foi desenvolvido por Filho et al. (2009), no qual foram realizados experimentos utilizando diferentes alturas nas garras dos pneus, mantendo o formato das garras. Foi utilizado um carro dinamométrico instrumentado, com o qual é possível definir uma força de tração aplicada ao trator. Entre os parâmetros que foram variados para cada experimento estão a velocidade e o tipo de solo. Para todos os parâmetros, a força de tração aplicada pelo carro dinamométrico foi mantida constante, sendo controlada através da pressão aplicada no sistema de frenagem, e monitorado pelo indicador eletrônico de força instantânea.

O presente trabalho tem a motivação de estudar a força de tração gerada por um robô cortador de grama e a influência de três parâmetros: o perfil da roda, a superfície e a inclinação. Além disso, o experimento objetiva definir qual perfil de roda existente no mercado produz a

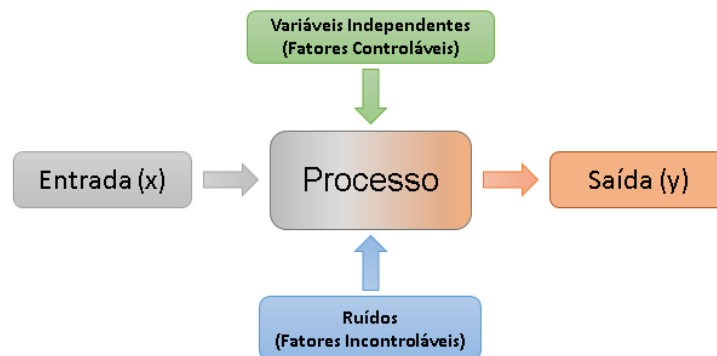
maior força de tração. Foram analisados somente aqueles perfis que são compatíveis com o modelo testado.

2. METODOLOGIA

2.1. Planejamento de experimentos

Antes de iniciar o experimento, foi necessário escolher um método para a realização do ensaio. As técnicas experimentais servem para estudar o planejamento, a execução e a análise de um ensaio ou experimento. A técnica escolhida foi o método de planejamento de experimentos. Tradicionalmente chamado de DOE (*Design of Experiments*), foi introduzido a partir de 1935 e é um método estatístico para o planejamento, execução e análise de experimentos. A metodologia difundiu-se rapidamente em todas as áreas de pesquisa devido a possibilidade de maximizar o desempenho, minimizar custos e reduzir a sensibilidade do sistema a ruídos. Ao final do experimento, é possível analisar a variância dos resultados, a influência dos fatores, suas interações e ainda o erro experimental através da replicação. Esta metodologia parte da comparação do experimento com um sistema, conforme a Figura 1, a qual demonstra que uma entrada denominada “x”, submetida a um processo com fatores controláveis e incontroláveis produz uma determinada saída “y”.

Figura 1 – Modelo de um processo genérico contendo um sinal de entrada (x), variáveis independentes, ruídos e uma saída (y). Fonte: do autor.



O planejamento de experimentos é um método que define a entrada e saída do processo, distinguindo os fatores controláveis dos incontroláveis, e determinando o método de análise de resultados. A saída é relacionada às características de qualidade de um produto, as quais, em geral, não são mensuráveis. Para a aplicação em questão, a saída do processo poderia ser o número de vezes que o robô fica preso, necessitando de atenção do usuário, interrompendo o corte automático do gramado. Nestes casos, é essencial determinar parâmetros quantitativos que influenciem as características de qualidade percebidas pelo usuário final do determinado produto, para que seja possível obter uma saída mensurável, ou seja, um resultado quantitativo da característica de qualidade. A força de tração foi escolhida para ser o resultado quantitativo dessa característica.

As variáveis independentes são aquelas sobre as quais se tem controle. Para cada uma é necessário definir os valores que elas devem possuir. É essencial que todos os fatores importantes sejam considerados como variáveis independentes. Caso haja um fator importante que não seja possível de influenciar, este deve ser mantido constante.

Já os fatores incontroláveis não são levados em consideração, pois não se podem controlar e fazem parte da incerteza do experimento. Estes parâmetros poderiam ser a temperatura, umidade do ar, umidade do solo ou o desgaste de ferramentas. Sendo assim, não é controlada ou sequer analisada a influência destes parâmetros na saída do teste. Ademais, quanto menores forem esses fatores de um sistema, menor será a incerteza do experimento.

Com o intuito de reduzir custos e melhorar o desempenho, é comum utilizar o planejamento de experimentos fatorial. Este consiste em determinar apenas dois níveis para cada variável, um deles sendo o maior valor e o outro o menor valor. Estes valores devem ser definidos com base nas exigências técnicas do produto, e também, preferencialmente, seguir a diretriz de utilização do fabricante.

O número de variáveis é chamado de k , e será o expoente do número de níveis, que para esta metodologia é definida como sendo dois. Por exemplo, para um experimento com três variáveis ($k = 3$), será necessária a realização de oito medições, conforme a Equação 1.

$$\text{Quantidade de medições} = 2^k \quad (1)$$

Com o intuito de reduzir o erro experimental, cada medição pode ser realizada mais de uma vez. Neste caso, para duas repetições ($R = 2$) e três variáveis ($k = 3$) seria necessário realizar dezesseis medições conforme a Equação 2.

$$\text{Quantidade de Medições} = R \times (2^k) \quad (2)$$

2.2. Definição dos Parâmetros

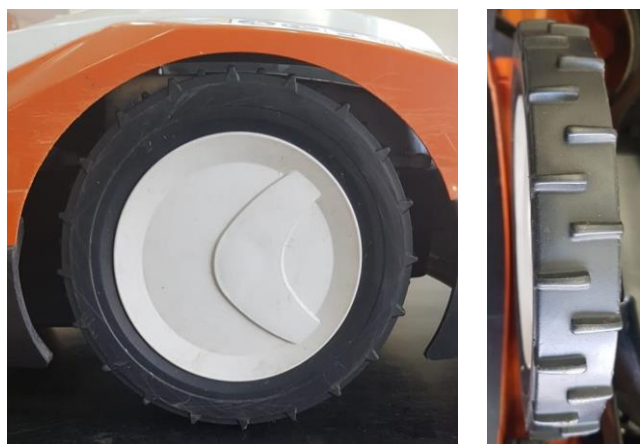
Com o intuito de determinar o número de variáveis, e, conseqüentemente, a quantidade de medições, foram definidos os parâmetros estudados. As variáveis independentes foram escolhidas a partir do estudo das referências bibliográficas e são: perfil da roda, tipo de superfície e inclinação. Como o robô não possui pneus, mas um par de rodas sólidas de material plástico, o perfil da roda foi escolhido como parâmetro principal. Atualmente, há dois perfis no mercado: um alto e outro baixo. O perfil alto, possui ressaltos de 9mm de altura em formato de “V”, está retratado na Figura 2.

Figura 2 – Imagens da roda de perfil alto. À esquerda uma vista lateral e à direita a vista superior. Fonte: do autor



Já o perfil baixo possui ressaltos de 3mm, na mesma direção do eixo das rodas sobre a superfície que entra em contato com o solo, de acordo com a Figura 3.

Figura 3 – Imagens da roda de perfil baixo. À esquerda uma vista lateral e à direita a vista superior. Fonte: do autor



As diferentes superfícies escolhidas foram uma superfície de madeira, considerada lisa em relação à superfície de grama sintética, com elevada rugosidade.

Previamente ao experimento, o robô foi instalado em um terreno com obstáculos rígidos, como árvores, pedras e um relevo acidentado com diferentes inclinações, com o intuito de verificar a falha do equipamento. Durante o teste em campo, foi observada uma maior incidência da falha de derrapagem em terrenos com inclinação. Dessa forma, foi adicionada a inclinação como o terceiro e último parâmetro do experimento. Os ângulos de 0° e 15° foram escolhidos, uma vez que se deseja os valores extremos e, segundo o manual do usuário, só são permitidas inclinações até 18°, aproximadamente.

Definidas as variáveis independentes que seriam usadas no sistema, foi possível utilizar a fórmula fatorial do método de Planejamento de Experimentos para definir a matriz de experimentos.

Além da metodologia para definir o número absoluto de testes, deve ser realizada a matriz de experimentos, que consiste em organizar e enumerar as diferentes combinações entre as variáveis. Os níveis máximo e mínimo de cada parâmetro são escolhidos com base nas possibilidades e restrições do equipamento e também da bancada de experimento. Na Tabela 1 é possível visualizar a situação correspondente para cada parâmetro, que é chamada de matriz de experimentos.

Tabela 1 – Matriz de Experimentos

Tipo de Experimento	Perfil	Solo	Inclinação
A	Baixo	Madeira	0°
B	Alto	Madeira	0°
C	Baixo	Grama	0°
D	Alto	Grama	0°
E	Baixo	Madeira	15°
F	Alto	Madeira	15°
G	Baixo	Grama	15°
H	Alto	Grama	15°

Foi definido que cada experimento seria realizado duas vezes de forma a garantir uma maior confiabilidade ao experimento. Para reduzir os ruídos do sistema, os experimentos são realizados em ordem aleatória. Para gerar uma ordem verdadeiramente aleatória, foi utilizado o *software* de estatística chamado Minitab, cuja licença foi disponibilizada pela empresa, na qual foram realizados os testes. A partir do software foi definida a seguinte sequência de testes: “D”, “G”, “A”, “C”, “H”, “B”, “F”, “E”, “E”, “C”, “F”, “B”, “D”, “H”, “A”, “G”.

2.3 Bancada de Experimentos

Com isso definido, foi projetada uma bancada para realizar o ensaio conforme a imagem da Figura 4.

Figura 4 – Bancada de experimentos. Fonte: do autor



A bancada contém uma base de madeira de compensado naval, com um contorno de perfis de alumínio, uma célula de carga, e uma corda. Os perfis de alumínio servem tanto para evitar que o robô caia da bancada caso mude de trajetória, e também para a fixação do tapete de grama sintética. Além disso, a célula de carga foi presa em um perfil através de uma corda. No outro lado também foi utilizada uma corda para prender a célula ao robô.

2.4 Sensoriamento e Calibração

Para a realizar as medições, foi utilizado um sistema de aquisição de dados, modelo DEWE-2600, o qual processa o sinal de entrada da célula de carga e realiza a aquisição de dados conforme a Figura 5.

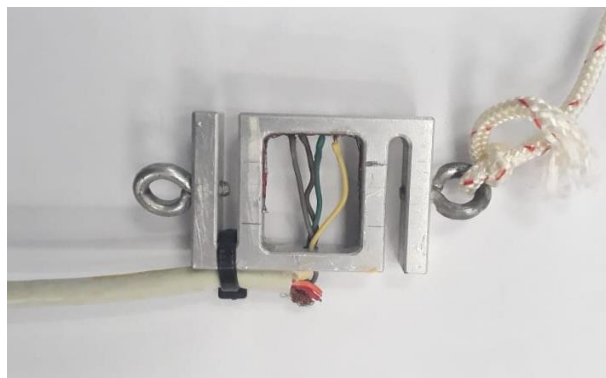
Figura 5 – Sistema de aquisição de dados, monitoramento e medição de sinais. Fonte: <https://www.dewetron.com/products/data-acquisition-hardware-chassis/all-in-one-chassis/dewe-2600/>



O sistema de aquisição de dados DEWE-2600 é extremamente preciso, o que reduz significativamente as incertezas sistemáticas de medição. Na página da web do fabricante é possível visualizar as características dos módulos de entrada de sinal contidos no equipamento, inclusive o processador de leitura dos dados.

Para a medição da força de tração, foi utilizada uma célula de carga que estava disponível no laboratório da empresa conforme a Figura 6.

Figura 6 – Célula de carga utilizada para medição de força. Fonte: do autor



Antes de calibrar a célula de carga, foi realizado um ensaio prévio, para se obter uma estimativa da ordem de grandeza da força de tração. Este experimento foi realizado com um dinamômetro linear digital, tendo sido medido um pico de 52,4 N. Com isso, decidiu-se por calibrar a célula de carga entre 0 N e 132,4 N utilizando pesos padrão calibrados. Iniciou-se a

calibração pendurando a célula de carga por uma extremidade sem aplicar força alguma. Depois adicionou-se somente a corda, que possui uma massa de 0,005 kg. O procedimento seguiu com diferentes pesos até o valor máximo de 13,5 kg, conforme pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 – Calibração da célula de carga. Fonte: do autor



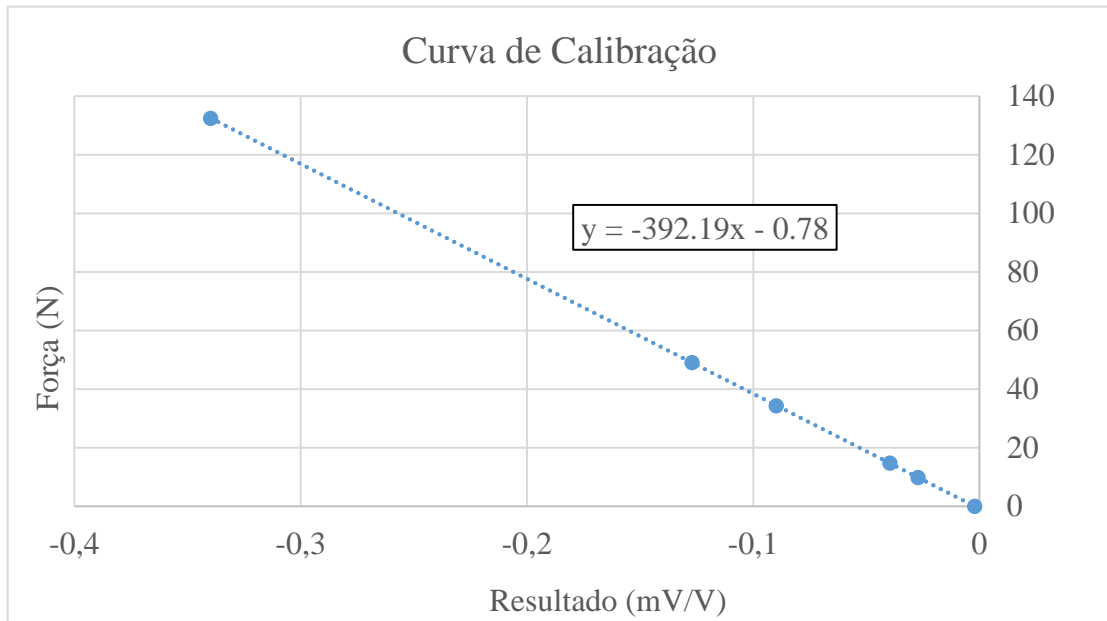
Para cada massa adicionada, foi medido o valor de resposta do sistema da célula de carga formando a Tabela 2.

Tabela 2 – Tabela de Peso aplicado na célula de carga, em comparação com a resposta

Peso (N)	Resposta (mV/V)
0,05	-0,0020
9,81	-0,0271
14,72	-0,0396
34,34	-0,0897
49,05	-0,1269
132,44	-0,3397

Com os dados da tabela, foi criado um gráfico para ser obtida a curva de calibração. Esta curva está representada no gráfico da Figura 8.

Figura 8 – Curva de Calibração da Célula de Carga. Fonte: do autor



A curva de calibração gerou a equação $y = -392,19 \cdot X - 0,78$, a qual foi inserida diretamente no sistema de aquisição de dados, de forma que a medição foi registrada em Newtons, sem necessidade de conversão de unidades após o ensaio. Além da curva de calibração da célula de carga, foi definida em 10.000 Hz a taxa de aquisição do sistema.

A célula de carga foi presa através de duas cordas, com uma extremidade presa na bancada, e outra extremidade no sistema de corte do robô, que possui altura regulável. Sua altura foi ajustada para 5 cm, o que garante que a corda esteja na horizontal durante o experimento. Com a bancada preparada, realizaram-se os testes em ambiente fechado, com temperatura controlada entre 22°C e 24°C.

2.5 Incerteza de medição

Para realizar o cálculo de incertezas envolvido, foi utilizado o método de Kline e McClintock, os quais demonstram a maneira de calcular conforme a Equação 3.

$$U_r = \sqrt{\left(\frac{\partial V}{\partial x_1} \times u_1\right)^2 + \dots + \left(\frac{\partial V}{\partial x_n} \times u_n\right)^2} \quad (3)$$

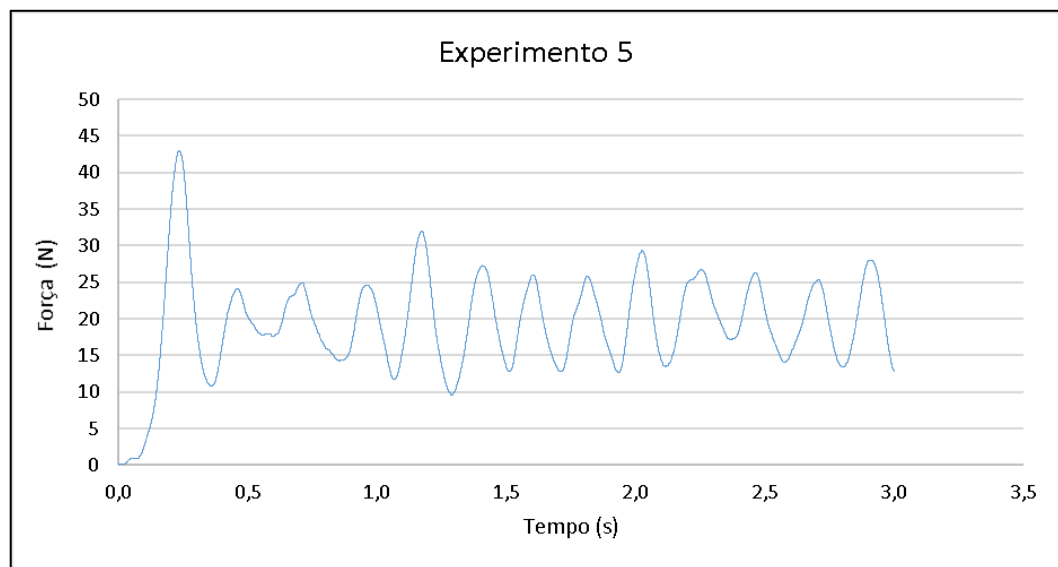
O “V” representa a função da variável para a qual se deseja medir a incerteza, “x” é a variável exclusiva para a qual se está calculando a incerteza, e “u” é a incerteza daquela. Para o experimento foi levado em consideração a incerteza do peso-padrão e também do sistema de aquisição de dados. Realizando o cálculo através da equação de Kline e McClintock foi obtido um erro de 10^{-4} N. Devido à ordem de grandeza, a incerteza foi considerada desprezível em relação ao experimento.

3. RESULTADOS

Para cada um dos dezesseis experimentos realizados, foi gerada uma curva de força de tração captada pela célula de carga, em função do tempo. Foram registrados os dados durante os 3 segundos após o início de aplicação da força. Não foram realizadas medições de maior duração, pois após este período, o robô tende a mudar de direção, colidindo com a lateral da bancada.

Para cada medição, foi gerado um gráfico, o qual possui a força de tração no eixo das ordenadas, e o tempo no eixo das abscissas. Um dos dezesseis gráficos obtidos está contido no gráfico da Figura 9, enquanto o Apêndice A contém todos os gráficos referentes às medições realizadas.

Figura 9 – Força de tração (N) em relação ao tempo (s) do experimento com roda de perfil alto, na superfície de grama, e com inclinação. Fonte: do autor



Em quase todos os gráficos é possível observar um pico de força dentro do primeiro segundo, e uma estabilização da flutuação no restante do tempo. Este comportamento é esperado, uma vez que a corda estica e a roda inicia a derrapagem. Como a roda não é totalmente lisa, é possível observar oscilações na força de tração, devido ao impacto entre os ressaltos e o solo. Há algumas exceções no formato, gerando outros picos, algumas vezes maiores do que o inicial. Isso se deve ao fato de a corda ser inelástica e, ao esticar da corda, o solavanco ter deslocado o robô para trás, causando com que houvessem novos impactos bruscos na corda, atingindo picos de força. Para fins de padronização dos resultados, foi considerado o primeiro pico para a definição da força máxima.

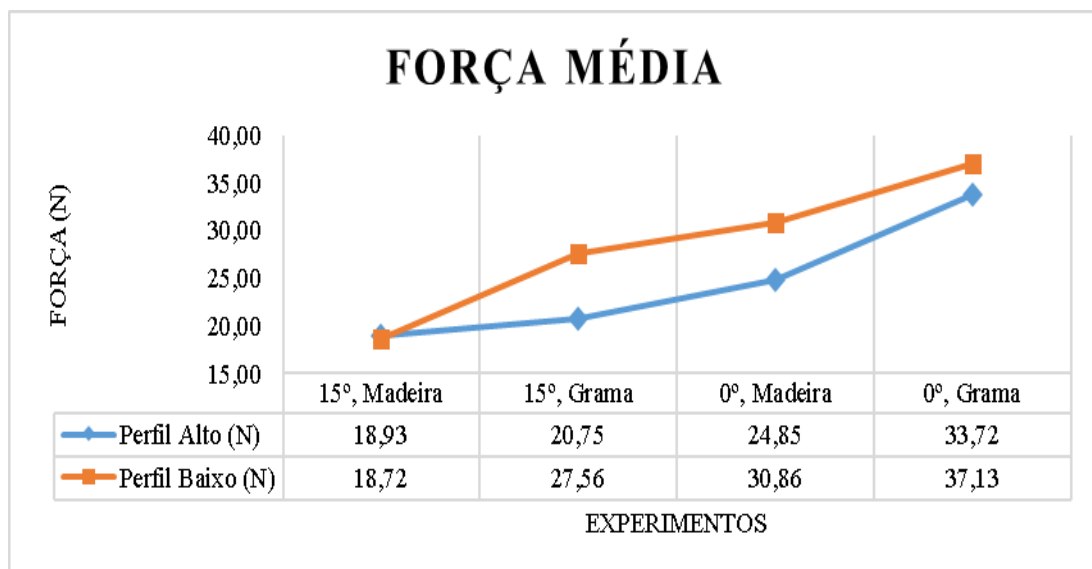
A partir dos dados registrados, foram levantados os valores máximos da força, e também a média da força de cada experimento. Com estes dados, foi gerada a Tabela 3, abaixo.

Tabela 3 – Experimentos com descrição das variáveis e resultado das forças em Newton

Ordem dos experimentos	Tipo de Experimento	Roda	Superfície	Inclinação	Média (N)	Máxima (N)
1	D	Perfil Alto	Grama	0°	34,89	50,90
2	G	Perfil Baixo	Grama	15°	26,54	49,92
3	A	Perfil Baixo	Madeira	0°	30,54	47,66
4	C	Perfil Baixo	Grama	0°	39,64	55,80
5	H	Perfil Alto	Grama	15°	19,33	42,95
6	B	Perfil Alto	Madeira	0°	29,34	62,96
7	F	Perfil Alto	Madeira	15°	18,12	43,44
8	E	Perfil Baixo	Madeira	15°	17,72	42,86
9	E	Perfil Baixo	Madeira	15°	19,73	44,62
10	C	Perfil Baixo	Grama	0°	34,62	53,25
11	F	Perfil Alto	Madeira	15°	19,78	42,17
12	B	Perfil Alto	Madeira	0°	20,36	37,46
13	D	Perfil Alto	Grama	0°	32,54	52,27
14	H	Perfil Alto	Grama	15°	22,18	43,05
15	A	Perfil Baixo	Madeira	0°	31,18	51,78
16	G	Perfil Baixo	Grama	15°	28,58	48,05

A Tabela acima foi utilizada para gerar uma série de gráficos e informações. Foi possível demonstrar graficamente a variação da média de tração no gráfico da Figura 10.

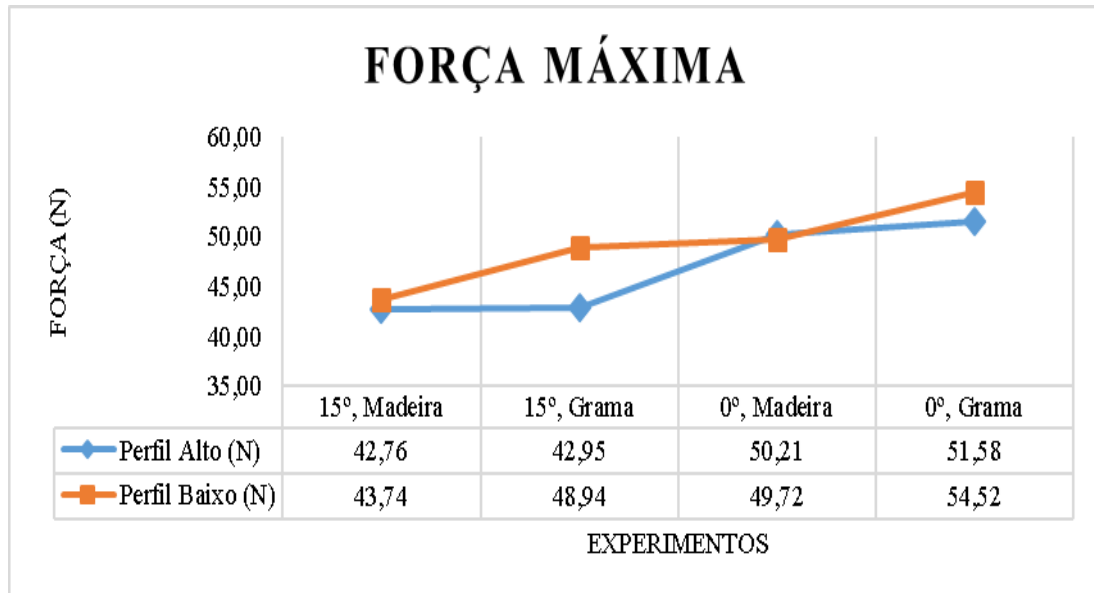
Figura 10 – Valores médios de força dos diferentes perfis de roda, em relação ao tempo.
Fonte: do autor



A partir do gráfico é possível interpretar que o perfil baixo garante uma melhor performance do que o perfil alto. Também é possível verificar que conforme o esperado, a força de tração é mais alta para ensaios sem inclinação. Por fim, para ambos perfis, se observa uma força mais alta na superfície de grama sintética, em relação a madeira. Além disso, foi gerado

também o gráfico para a força máxima, ou seja, o pico de força captado pelo sensor, conforme o gráfico da Figura 11.

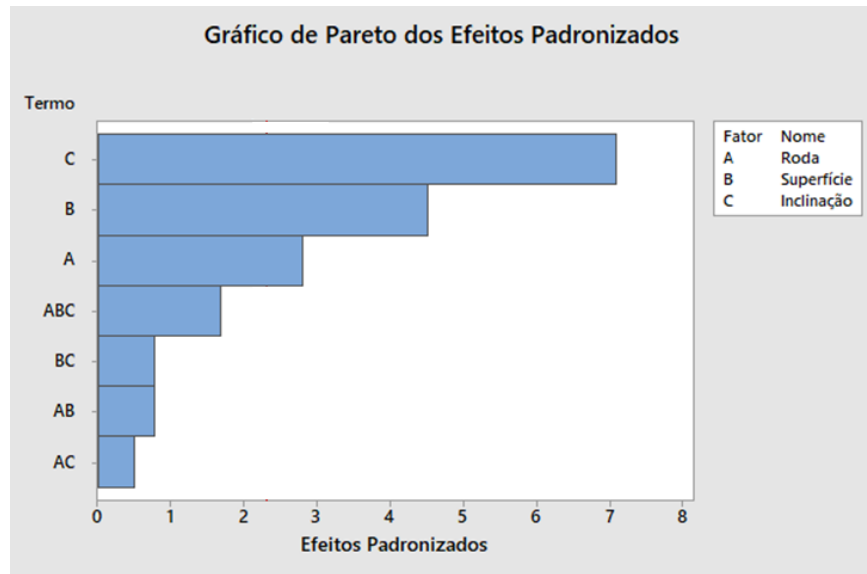
Figura 11 – Valores máximos de força dos diferentes perfis de roda, em relação ao tempo. Fonte: do autor



A força máxima segue as mesmas tendências da força média. É interessante observar que existe pouca diferença nas forças máximas sobre a superfície de madeira. Isso indica que ambos perfis possuem uma velocidade similar nestas condições, e não conseguem manter a tração acima do ponto máximo, derrapando bruscamente. No regime de derrapagem, é possível verificar no gráfico da Figura 10, que existem diferenças na tração média. Nos experimentos sob madeira é possível inferir que o robô se desloca a uma velocidade parecida com ambos perfis, causando um pico de força similar, porém ao entrar em derrapagem, as forças de tração se distanciam, causando uma maior força de tração média na roda de perfil baixo. Utilizando ambos os gráficos, é possível afirmar que o perfil baixo garante uma maior força de tração ao cortador de grama.

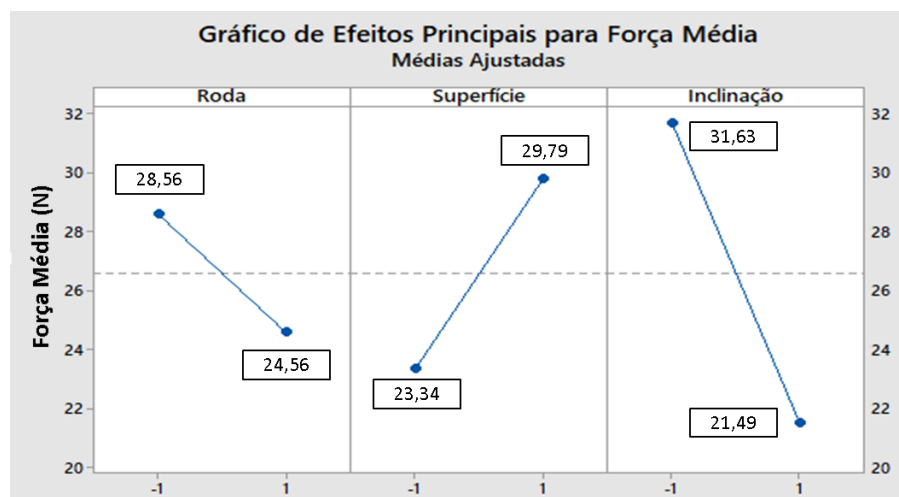
Além disso, interessa analisar a influência de cada parâmetro sobre o processo, isto é, quanto cada variável influencia o resultado final da medição. Para tal, foi utilizado o programa computacional Minitab, para gerar o gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Este tipo de gráfico diz respeito à influência das variáveis na força de tração. Para cada resposta é necessário gerar um gráfico distinto. Por isso, foi gerado um gráfico para a força média, e um para a força máxima. Na Figura 12 é possível visualizar o gráfico de Pareto para a força média.

Figura 12 – Gráfico de Pareto dos Efeitos Padronizados. Fonte: do autor



Para interpretar a Figura 12, é necessário entender que quanto maior a barra, maior a influência daquele parâmetro. Com base nisso, observa-se que os parâmetros que mais influenciam são: a inclinação, a superfície e o perfil da roda, nesta ordem. Com base somente nesse gráfico, não é possível saber em qual nível de cada parâmetro se atinge o melhor resultado. Para isso foi utilizado o gráfico de efeitos dos principais parâmetros do sistema, conforme Figura 13.

Figura 13 – Gráfico de Efeitos de cada variável do sistema em relação à Força Média. Fonte: do autor



Os índices “-1” e “1” são utilizados para representar os valores mínimos e máximos para cada parâmetro. A Tabela 4 descreve o significado de cada índice.

Tabela 4 – Níveis máximo e mínimo para cada variável

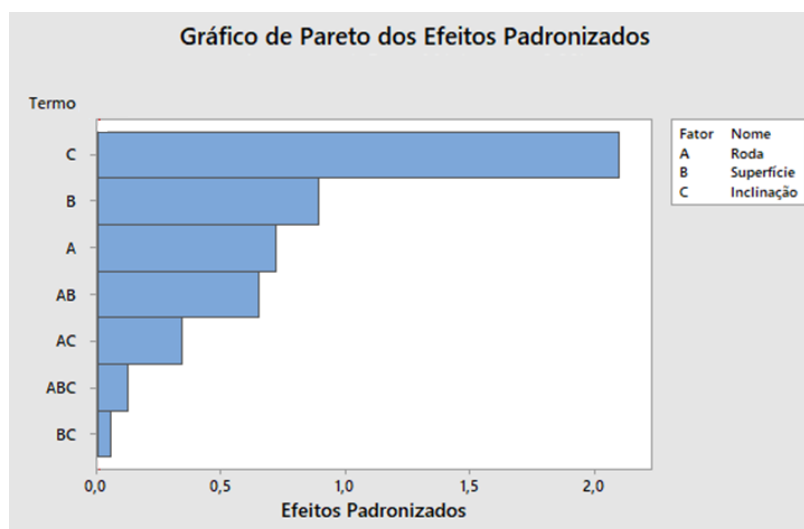
Variável	Nível Mín. (-1)	Nível Max. (1)
Inclinação	0°	15°
Perfil	Perfil Baixo	Perfil Alto
Superfície	Madeira	Grama

Ou seja, a superfície de madeira é referente à superfície “-1” e a grama sintética é “1”. A bancada na posição horizontal se refere a “-1” enquanto a posição de 15° de inclinação se refere a “1”. Por fim, o perfil baixo se refere a “-1” e o alto a “1”.

Na parte esquerda do gráfico verifica-se uma redução de aproximadamente 4 N na força de tração média ao alterar o perfil da roda de baixo para alto. Ou seja, o perfil de roda alto tem uma influência negativa na força de tração do robô. Ao centro, verificou-se um aumento de aproximadamente 6 N na força de tração média ao alterar da superfície de madeira para a de grama sintética. À direita, observou-se uma redução de em torno de 10 N ao alterar a inclinação de 0° para 15°. Ou seja, a situação ideal em termos de tração seria uma superfície de grama, sem inclinação, com perfil de roda baixo. A linha tracejada representa a média de todas as medições. Esta linha é particularmente útil para demonstrar que, realmente, foram utilizados valores próximos do máximo e mínimo, de acordo com a metodologia de planejamento de experimentos. Caso em algum dos parâmetros, ambos parâmetros estivessem abaixo ou acima da linha tracejada, seria um indicativo de que possivelmente os parâmetros escolhidos não foram realmente os mais extremos possíveis.

Falando-se em termos de força máxima, foram gerados os mesmos dois tipos de gráfico para realizar a análise. Na Figura 14 é possível visualizar o gráfico de Pareto para a força máxima.

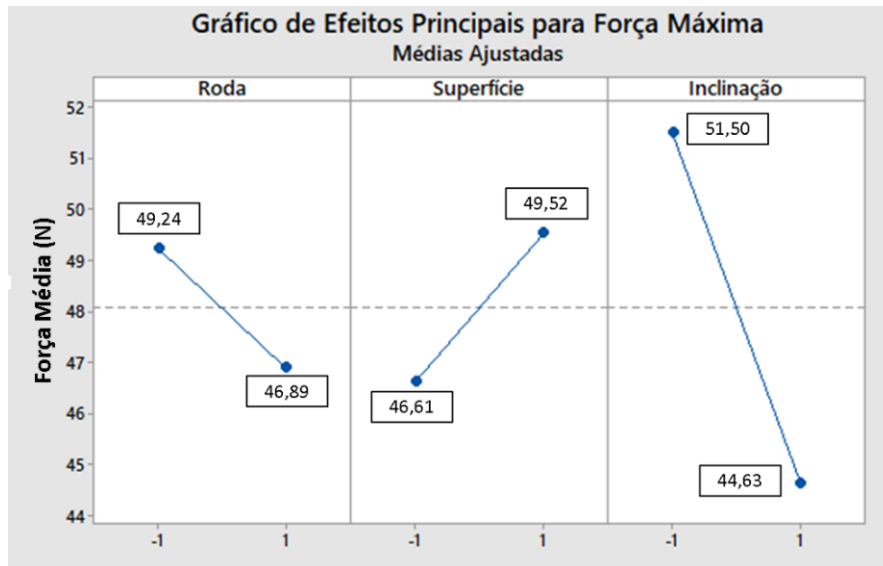
Figura 14 – Pareto de Efeitos Padronizados. Fonte: do autor



A inclinação é o parâmetro que mais influencia o sistema, uma vez que é possível observar uma grande diferença entre o valor de “C” em relação aos demais valores. Assim,

podemos afirmar que tanto a força média, quanto a máxima são influenciadas respectivamente pela inclinação, superfície e pelo perfil da roda. Para finalizar a análise da força máxima, foi utilizado o gráfico da Figura 15.

Figura 15 – Efeitos principais para a Força Máxima. Fonte: do autor



O gráfico acima representa os valores médios das medições para cada parâmetro. Verifica-se que o perfil da roda pequeno gera uma força máxima de 2,35 N a mais do que o perfil alto. Além disso, sobre a superfície de madeira a força máxima é 2,91 N menor do que sobre a grama sintética. Ainda, a inclinação nula produz 6,87 N a mais de força do que com 15°. Este gráfico não só comprova que a inclinação é o principal fator de influência do sistema, mas também demonstra a situação ideal para uma maior força de tração do robô. Ou seja, a configuração com maior chance de sucesso e menor probabilidade de falhar é a roda com perfil baixo, sobre grama, com inclinação nula.

Com base nos gráficos é possível inferir inclusive sobre valores fora do intervalo que foi utilizado para cada parâmetro. Tomando a inclinação como exemplo, se formos extrapolar para 20°, existe uma forte tendência de que a força de tração diminua ainda mais. Isso explica a limitação do manual do usuário, de não instalar o robô em locais com inclinação maior do que 18°. A superfície também poderia ser extrapolada, de forma que se houvesse uma superfície mais rugosa, possivelmente seria gerada uma força de tração mais alta.

4. CONCLUSÃO

A resposta de sistema das medições foi dividida em duas partes: a força máxima e a força média. Comparando os gráficos de força para cada experimento, é possível concluir que o perfil baixo realmente possui uma performance melhor que o perfil alto. Em termos da força média, em três experimentos o perfil baixo gerou uma força de tração maior, e no quarto ponto os resultados são muito parecidos, de forma que não é possível confirmar um perfil ou o outro. Para a força máxima, há dois pontos em que o perfil baixo gerou forças maiores, e dois experimentos em que os valores são praticamente iguais. Sendo assim, confirma-se que o perfil

baixo possui uma maior força de tração do que o perfil alto nas condições de superfície e inclinação testadas.

Em relação aos parâmetros que mais influenciam a força de tração, tanto máxima quanto média, está a inclinação. Ambos os gráficos de Pareto utilizados demonstram os parâmetros mais influentes como sendo do maior para o menor: inclinação, superfície e perfil da roda. Além disso, com base nos gráficos de efeitos principais para as forças máxima e média pode ser concluído que a força de tração aumenta com o aumento da rugosidade da superfície, e diminui com o aumento da inclinação. Portanto, é possível ainda entender qual é o melhor e pior cenário no sentido de locomoção do robô, deixando claro os desafios para o produto.

É importante ressaltar, que a grama sintética não garante uma penetração dos ressaltos no perfil da roda na terra, o que poderia alterar os resultados. O conceito da roda de perfil alto é enganchar os ressaltos na terra e assim obter forças maiores, reduzindo o número de vezes em que o robô cortador de grama fica preso no relevo. Para estudos mais avançados, seria importante testar em superfícies reais em que a penetração é possível.

Os resultados obtidos são de fundamental importância para o melhor entendimento do funcionamento da geração de força, trazendo uma fundamentação teórica para o projetista otimizar o sistema. Entendendo melhor os parâmetros de influência, é possível projetar uma roda específica para enfrentar as dificuldades na situação de um terreno inclinado. Com base no uso comum do produto, sabe-se que na maior parte do tempo o robô opera sobre o gramado e poucos são os momentos em que ele anda sobre superfícies lisas. Tendo em vista essas considerações, poderia ser projetada uma roda para uma superfície de grama com inclinação, reduzindo as interrupções no corte por falhas de atolamento.

Por fim, entendendo as influências das variáveis principais, o consumidor final também pode decidir se o seu jardim apresentará um desafio para o robô, ou se o corte de grama irá ocorrer de forma automática, sem interrupções. Um usuário que possui um terreno plano, bem cuidado, pode se tranquilizar ao comprar o produto, sabendo que a falha de atolamento ocorrerá em ocasiões raras, em comparação com a utilização do equipamento em terreno com alta inclinação, onde a falha é esperada. Para o segundo terreno, é aconselhado aguardar mais um período, para que os fabricantes possam otimizar o produto para relevos mais desafiadores.

Com os conhecimentos gerados a partir do presente trabalho, se abriram mais caminhos para explorar. Os três principais parâmetros sugeridos para realizar novos ensaios seria a umidade da superfície, o peso do robô e outras superfícies. Por exemplo, poderia ser usada uma superfície mais próxima ao ambiente real, onde o perfil da roda irá interagir de forma diferente. Há muitos outros parâmetros que poderiam ser considerados, inclusive outros perfis. É esperado que nos próximos anos os robôs cortadores de grama tomem um maior espaço no mercado e nas casas dos consumidores. Para isso será necessário o desenvolvimento contínuo desse produto, incluindo outros testes e experimentos em relação à esse tipo de máquinas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

DEWETRON. **Catálogo de placa conversora de sinais analógicos para digitais DEWE-ORION-0816-10Mx**, novembro , 2020. Disponível em:

<<https://www.dewetron.com/products/data-acquisition-hardware-chassis/all-in-one-chassis/dewe-2600/>>

FILHO, A. G. et al. Influência da altura das garras dos pneus de um trator em área de plantio direto. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 10, p.1123–1128, outubro 2010. Disponível em:

<https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662010001000015>

FERREIRA, M. F. et al. Influência da Pressão Interna em Pneus Diagonais Na Força De Tração de um Trator 4x2 em duas Condições de Superfície. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 6, n. 1, p. 66-70, janeiro 2000. ISSN 1. Disponível em:

<<https://periodicos.ufpel.edu.br/ojs2/index.php/CAST/article/viewFile/308/303>>

KLINE, S.; MCCLINTOCK, F. Describing Uncertainties in Single-Sample Experiments, **Mechanical Engineering**, v. 75, n. 1, p. 3-8, 1953.

INMETRO. **Regulamento Técnico Metrológico a que se refere a Portaria INMETRO nº 233**, 1998. Disponível em:

<<http://www.inmetro.gov.br/legislacao/rtac/pdf/RTAC000178.pdf>>

RIBEIRO, J.; SCHWENGBER, C., “**Projeto de Experimentos**”, 2000. Disponível em:

<http://www.producao.ufrgs.br/arquivos/disciplinas/117_apostila_pe_2011.pdf>

SOUZA, A. M. et al. **Introdução a projetos de experimentos**, Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Naturais e Exatas, Departamento de Estatística, p. 119-127, 2002. Disponível em:

<<http://w3.ufsm.br/adriano/livro/Livro%20de%20Projetos%20de%20Experimentos.pdf>>

VIEIRA, M. O.; ZARPELLON, S. L. Desenvolvimento, construção e calibração de uma célula de carga extensométrica, utilizando o Método de Elementos Finitos. **Revista Ciência e Tecnologia**, [S.l.], v. 19, n. 35, dez. 2016. ISSN 2236-6733. Disponível em:

<<http://www.revista.unisal.br/sj/index.php/123/article/view/499>>.

APÊNDICE A – Gráficos da Medição de Força

Gráficos de força em relação ao tempo para cada medição realizada, conforme os experimentos descritos na Tabela 3.

Figura A-1 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de grama e inclinação de 0°.

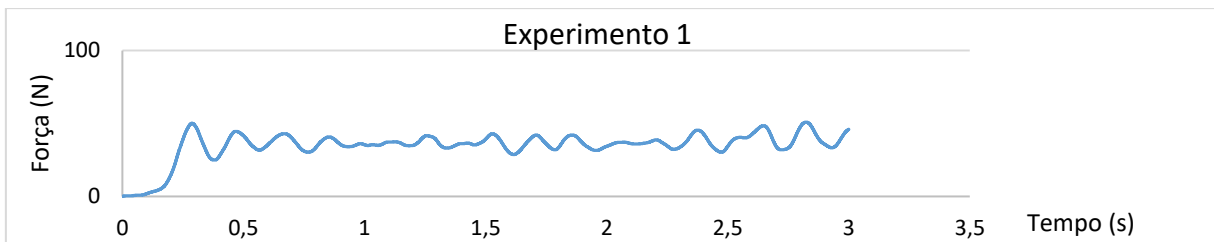


Figura A-2 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de grama e inclinação de 15°.

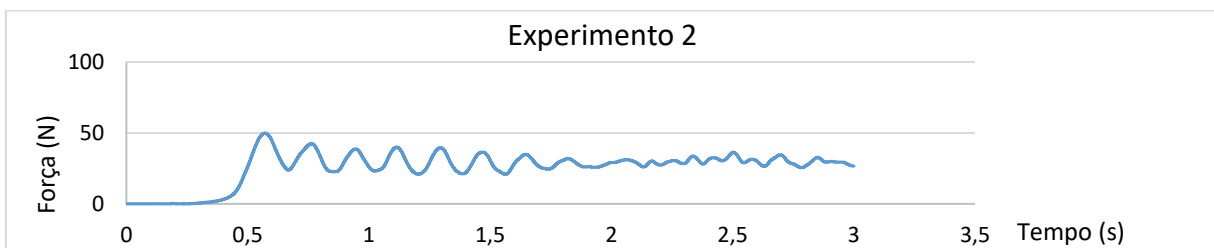


Figura A-3 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de madeira e inclinação de 0°.

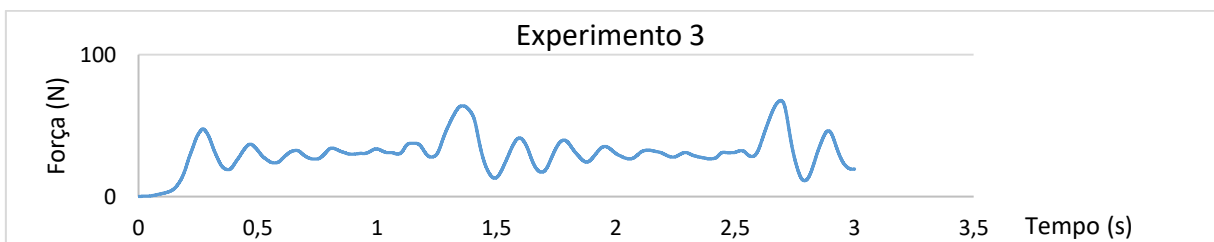


Figura A-4 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de grama e inclinação de 0°.

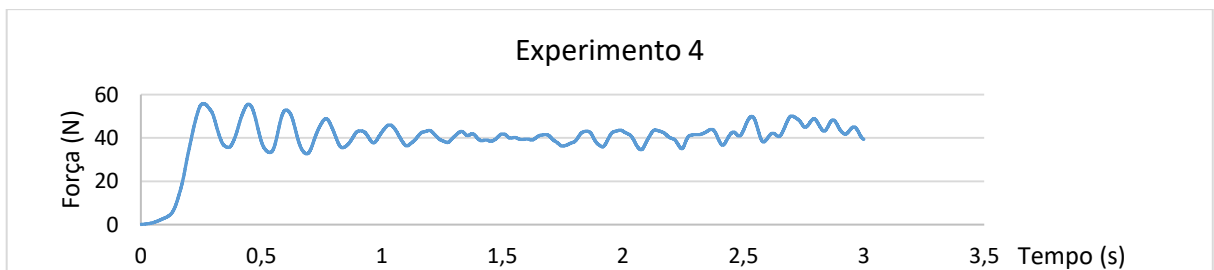


Figura A-5 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de grama e inclinação de 15°.

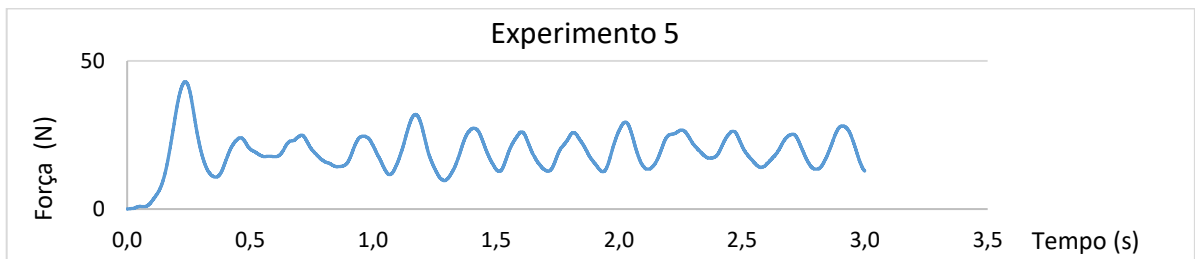


Figura A-6 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de madeira e inclinação de 0°.

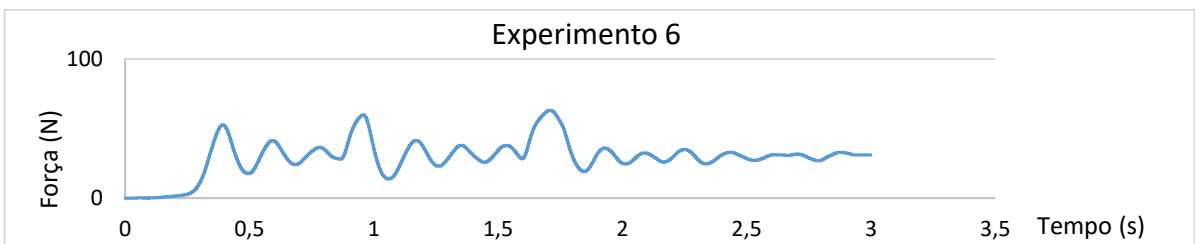


Figura A-7 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de madeira e inclinação de 15°.



Figura A-8 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de madeira e inclinação de 15°.

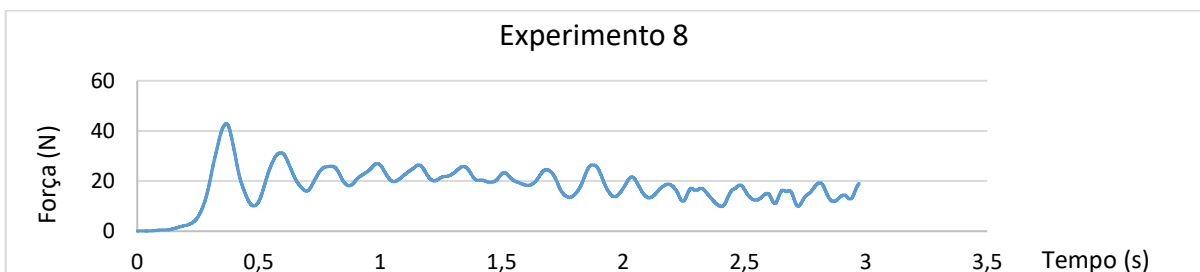


Figura A-9 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de madeira e inclinação de 15°.

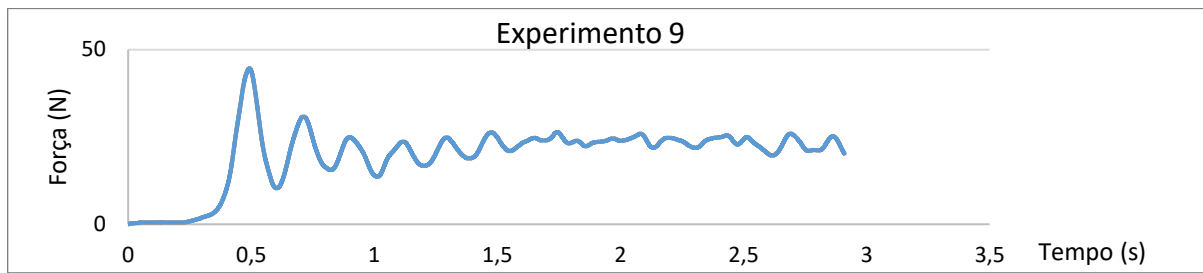


Figura A-10 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de grama e inclinação de 0°.

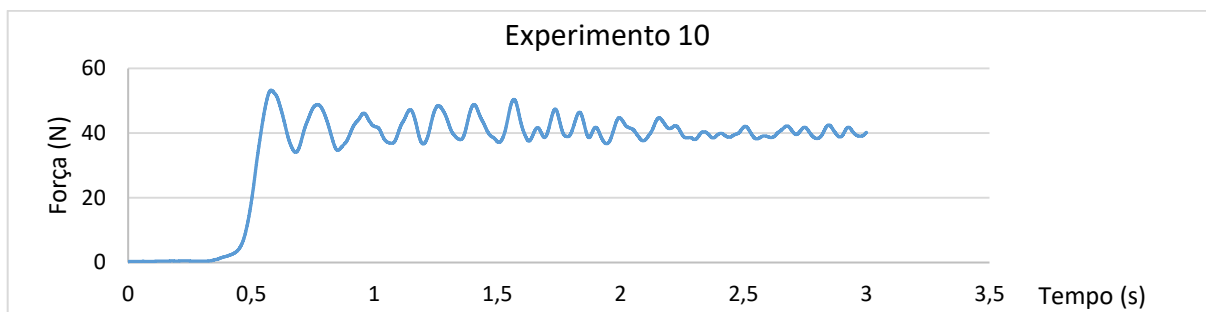


Figura A-11 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de madeira e inclinação de 15°.

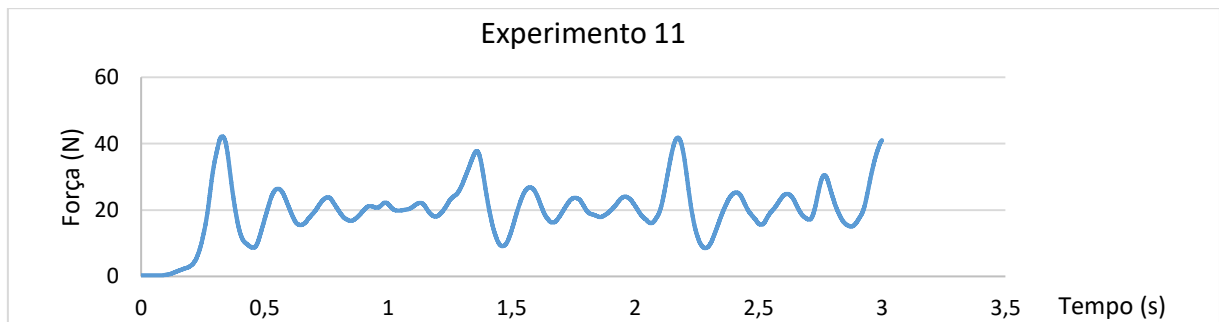


Figura A-12 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de madeira e inclinação de 0°.



Figura A-13 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de grama e inclinação de 0°.



Figura A-14 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda alto, superfície de madeira e inclinação de 15°.

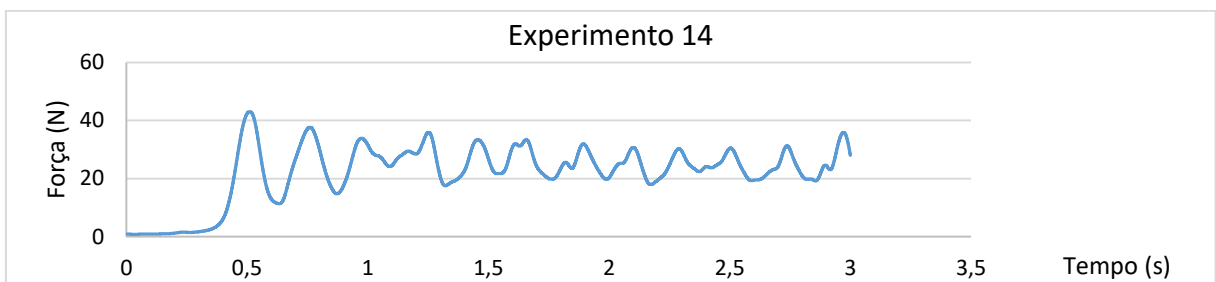


Figura A-15 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de madeira e inclinação de 0°.

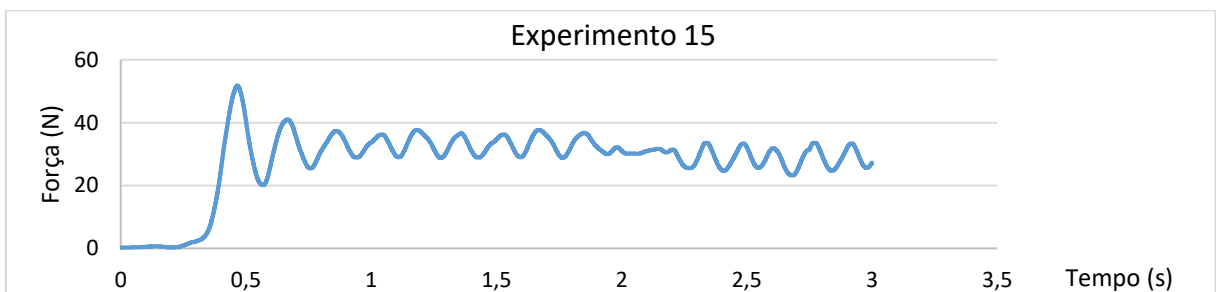


Figura A-16 – Gráfico de força de tração em relação ao tempo para o experimento contendo o perfil de roda baixo, superfície de grama e inclinação de 15°.

