

CENTRO UNIVERSITÁRIO FEI
JOÃO VICTOR LOURENÇO AGUIAR

**REFORMULAÇÃO DO SISTEMA DE DESLOCAMENTO DE ROBÔS
OMNIDIRECIONAIS**

São Bernardo do Campo

2024

JOÃO VICTOR LOURENÇO AGUIAR

**REFORMULAÇÃO DO SISTEMA DE DESLOCAMENTO DE ROBÔS
OMNIDIRECIONAIS**

Relatório Final de Iniciação Científica apresentado
ao Centro Universitário FEI, como parte dos requi-
sitos do Programa PIBIC-FEI. Orientado pelo Prof.
Dr. Flavio Tonidandel

São Bernardo do Campo

2024

RESUMO

Este projeto propõe o desenvolvimento de um novo conjunto de rodas para os robôs da categoria *Small-Size* da *RoboCup* de futebol de robôs, a fim de melhorar a movimentação deles, buscando sempre o melhor custo-benefício e facilidade na produção das peças. Serão estudados os melhores materiais para serem utilizados, o melhor tamanho para os protótipos, a estrutura mais adequada e a melhor disposição dos roletes e quantidade.

Palavras-chave: *RoboCup*. *Small Size League*. Rodas Omnidirecionais. RoboFEI. Impressão 3D. Engrenagem.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Graus de liberdade de uma roda omnidirecional.	8
Figura 2 – Vista explodida da roda.	9
Figura 3 – Vista superior do posicionamento das rodas.	9
Figura 4 – Montagem do robô da equipe Op-Amp.	10
Figura 5 – Demonstração do ângulo entre os roletes.	11
Figura 6 – Diferença entre X-ring e O-ring.	12
Figura 7 – Curva Tensão x Deformação do Alumínio.	14
Figura 8 – Curva Tensão x Deformação do ABS.	14
Figura 9 – Montagem do robô da equipe TIGERs.	15
Figura 10 – Comparação entre um engrenamento com folga e um sem folga.	16
Figura 11 – Faixa de operação do motor EC 45 Flat 50W <i>brushless</i>	19
Figura 12 – Vista 2D do robô com as forças e ângulos.	22
Figura 13 – Vista 2D do robô com as velocidades e ângulos.	23
Figura 14 – Influência do coeficiente de redução do engrenamento no cálculo dos raios ideais.	24
Figura 15 – Influência do ângulo das rodas em relação ao eixo do robô no cálculo dos raios ideais.	24
Figura 16 – Influência da velocidade desejada no cálculo dos raios ideais.	25
Figura 17 – Vista explodida do primeiro protótipo com 54mm e 20 roletes.	25
Figura 18 – Vista explodida do segundo protótipo com 54mm e 21 roletes.	27
Figura 19 – Vista explodida do terceiro protótipo com 44mm e 15 roletes.	29
Figura 20 – Vista explodida do quarto protótipo com 54mm e duas camadas de 20 roletes cada.	31
Figura 21 – Nova estrutura do rolete.	33
Figura 22 – Comparação entre os 4 modelos desenvolvidos e o modelo original.	34
Figura A.1 – Desenho técnico do rolete desenvolvido.	38
Figura B.1 – Desenho técnico do corpo do primeiro modelo desenvolvido.	40
Figura B.2 – Desenho técnico da tampa do primeiro modelo desenvolvido.	40
Figura C.1 – Desenho técnico do corpo do segundo modelo desenvolvido.	42
Figura C.2 – Desenho técnico da tampa do segundo modelo desenvolvido.	42
Figura D.1 – Desenho técnico do corpo do terceiro modelo desenvolvido.	44
Figura D.2 – Desenho técnico da tampa do terceiro modelo desenvolvido.	44
Figura E.1 – Desenho técnico da base do quarto modelo desenvolvido.	46
Figura E.2 – Desenho técnico da primeira parte do corpo do quarto modelo desenvolvido.	46
Figura E.3 – Desenho técnico da segunda parte do corpo do quarto modelo desenvolvido.	47
Figura E.4 – Desenho técnico da tampa do quarto modelo desenvolvido.	47

SUMÁRIO

1	Introdução	5
1.1	Objetivo	5
1.2	Justificativa	5
2	Revisão Bibliográfica	7
2.1	<i>RoboCup</i>	7
2.1.1	<i>Small Size League</i>	7
2.2	Rodas omnidirecionais	7
2.2.1	Definição	7
2.2.2	Influência dos roletes no desempenho do robô	9
2.2.3	Influência do tamanho das rodas	11
2.3	Estudo dos materiais	13
2.4	Transmissão de potência	15
2.5	Trabalhos relacionados	16
3	Metodologia	18
4	Resultados finais	21
4.1	Cálculo do diâmetro ideal	21
4.1.1	Estudo da dinâmica do robô	21
4.1.2	Estudo da cinemática do robô	22
4.2	Primeiro modelo desenvolvido	24
4.3	Segundo modelo desenvolvido	26
4.4	Terceiro modelo desenvolvido	28
4.5	Quarto modelo desenvolvido	30
4.6	Roleta desenvolvido	32
4.7	Transmissão de potência dos modelos	33
5	Conclusão	34
	REFERÊNCIAS	35
	APÊNDICE A – Desenho técnico do rolete	37
	APÊNDICE B – Desenhos técnicos do primeiro modelo desenvolvido	39
	APÊNDICE C – Desenhos técnicos do segundo modelo desenvolvido	41
	APÊNDICE D – Desenhos técnicos do terceiro modelo desenvolvido	43
	APÊNDICE E – Desenhos técnicos do quarto modelo desenvolvido	45

1 INTRODUÇÃO

A categoria *Small Size* de futebol de robôs da *RoboCup* tem uma característica muito dinâmica por conta da velocidade da bola utilizada, que pode chegar a até 6,5 m/s por conta de limitações impostas nas regras da categoria, fazendo com que os passes e chutes sejam muito rápidos (RULES, 2019). Sabendo disso, para a realização das jogadas que o software propõe e ser capaz de acompanhar esse dinamismo que os jogos impõem faz-se necessário um sistema de deslocamento adequado dos robôs.

O sistema de deslocamento atual pode ser considerado ineficiente e ultrapassado por conta de diversos fatores, tais como: o material que deixa as rodas pesadas, o passo grande entre os roletes, entre outros fatores que acabam interferindo negativamente no desempenho da equipe.

Atualmente, a equipe sofre bastante com um problema relatado há anos de os robôs derraparem em campo na hora de acelerar ou desacelerar por conta da estrutura atual das rodas. O motivo principal deste problema é a grande distância entre os roletes, que não dá aderência para o robô no gramado.

Por conta deste problema, a realização de jogadas durante os jogos nas competições fica comprometida e gera dificuldades no controle de posicionamento dos robôs. Isto faz com que a equipe não tenha bons resultados em campeonatos internacionais, além de que a equipe visa competir na Divisão A da *RoboCup*, onde as estão as equipes mais desenvolvidas.

1.1 OBJETIVO

Este estudo tem como objetivo desenvolver um novo sistema de rodas dos robôs da categoria *Small Size League (SSL)* da *RoboCup*, com as melhores características a fim de adquirir um conjunto de deslocamento mais leve, mais barato, que facilite a fabricação ou utilize componentes normalizados para facilitar a compra e que permita o robô se locomover de maneira ágil, rápida e sem derrapar em campo, para que assim a equipe consiga fazer táticas melhores e dinâmicas para os campeonatos.

1.2 JUSTIFICATIVA

Após a competição realizada em Rio Grande, no Rio Grande do Sul, em outubro de 2019, foi feita uma reunião de análise de causas e observou-se que um dos motivos de os robôs não conseguirem realizar jogadas com chutes de primeira e passes é a derrapagem das rodas na hora de desacelerar para chegar ao destino colocado pelo software.

Além disso, com o avanço da impressão 3D, decidiu-se começar a imprimir uma grande parte dos nossos robôs a fim de diminuir o peso (o que é uma das causas da derrapagem ao desacelerar) e o preço deles, e as rodas não poderiam ficar de fora disso.

Ademais, utiliza-se uma engrenagem interna à roda para fazer a transmissão de potência do motor, mas, por ser uma peça que necessita de uma grande precisão e acabamento, sua produção, além de possuir um custo elevado, não pode ser feita nos laboratórios da faculdade.

Por conta disso, uma nova roda precisa ser projetada, a fim de melhorar as jogadas feitas pela equipe, alcançando uma qualidade de jogo parecida com o que é desenvolvido no simulador, e, assim, conquistar grandes resultados nas competições a nível nacional e internacional.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ROBOCUP

A ideia de robôs que jogam futebol foi proposta pela primeira vez pelo professor Alan Mackworth, em seu artigo *On Seeing Robots* (MACKWORTH, 1982). Independentemente, em outubro de 1992, um grupo de pesquisadores japoneses organizou um workshop sobre os grandes desafios em IA, onde iniciaram-se as primeiras discussões sobre usar o futebol para promoção da ciência e tecnologia. Em junho de 1993 foi organizada uma competição de robótica e, em menos de um mês, pesquisadores de fora do Japão começaram a pedir que essa iniciativa fosse ampliada para um projeto conjunto internacional (ROBOCUP, 2020).

A *RoboCup* busca promover pesquisas na área de robótica e inteligência artificial com um objetivo final de vencer a seleção campeã do mundo em 2050 com uma equipe totalmente autônoma de robôs humanoides (ROBOCUP, 2020).

O atual cenário competitivo da *RoboCup* mostra equipes tanto do ensino superior quanto do ensino básico que disputam diversas categorias, em eventos tanto a nível nacional quanto a nível internacional, tais como *RoboCup Soccer*, *RoboCup Rescue*, *RoboCup@home* e a *RoboCup Junior*.

2.1.1 *Small Size League*

É uma das ligas mais antigas da *RoboCup Soccer*, tendo o foco em solucionar o problema da cooperação e controle de robôs inteligentes num ambiente altamente dinâmico com um sistema híbrido centralizado/distribuído. A partida ocorre entre duas equipes utilizando seis ou onze robôs totalmente autônomos, que tem um máximo de diâmetro e altura, com algumas outras restrições (ROBOCUP, 2020). Além disso, os robôs da liga são omnidirecionais, o que proporciona jogos dinâmicos com jogadas imprevisíveis.

2.2 RODAS OMNIDIRECIONAIS

2.2.1 Definição

Segundo Sears e Zemansky (1973), deslocamento é uma grandeza vetorial (logo, possui módulo direção e sentido) que define a variação de posição de um corpo em um dado intervalo de tempo, ou seja, o vetor deslocamento pode ser obtido pela diferença entre as posições final e inicial.

O sistema de deslocamento de um objeto é o que garante a ele a possibilidade de movimentação ao longo do espaço, podendo ser realizado por meio de diversos métodos. No caso

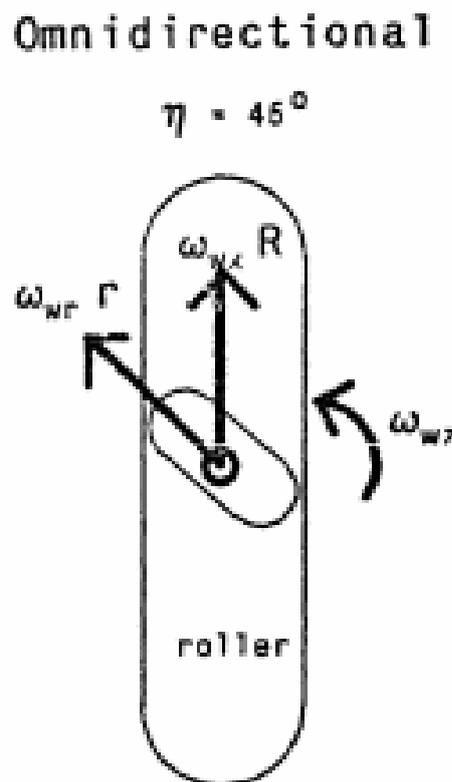
dos robôs da equipe a movimentação é feita por um sistema omnidirecional, caracterizando-o como robô omnidirecional.

Robôs omnidirecionais são capazes de se movimentar para qualquer direção ao longo do plano de atuação (x, y), independente da orientação do robô em relação ao eixo vertical. As rodas omnidirecionais permitem que o robô se movimente em qualquer direção sem a necessidade de girar no seu próprio eixo.

Segundo Williams et al. (2002), a locomoção omnidirecional é a capacidade de se mover de forma independente em todos os graus de liberdade que o objeto possui. Para que esse deslocamento omnidirecional aconteça, utilizam-se pequenos roletes emborrachados com anéis de vedação, fixados perpendicularmente ao plano da roda principal.

Segundo Muir e Neuman (1987), as rodas omnidirecionais possuem três graus de liberdade, o primeiro deles é na direção da orientação da roda, o segundo ocorre pela movimentação dos roletes colocados ao longo da borda da roda principal, o terceiro é o deslizamento rotacional do rolete sobre o ponto de contato com o solo, isso tudo é ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Graus de liberdade de uma roda omnidirecional.



Fonte: Retirado de Muir e Neuman (1987)

No caso das rodas atuais da equipe, os eixos dos roletes são montados com uma angulação de 0° em relação à orientação da roda principal, diferente do que é ilustrado na Figura 1, onde a angulação é de 45° .

O conjunto das rodas dos robôs da categoria *Small Size* da equipe RoboFEI é composto basicamente por uma carcaça, onde são encaixados os 16 roletes com O-Rings, estes ficam fixos

na carcaça pela tampa da roda. Além disso, há ainda a engrenagem interna da roda, encaixada na carcaça por interferência, dois rolamentos, um espaçador e os parafusos para a fixação de todos os componentes. Isto pode ser visto na Figura 2.

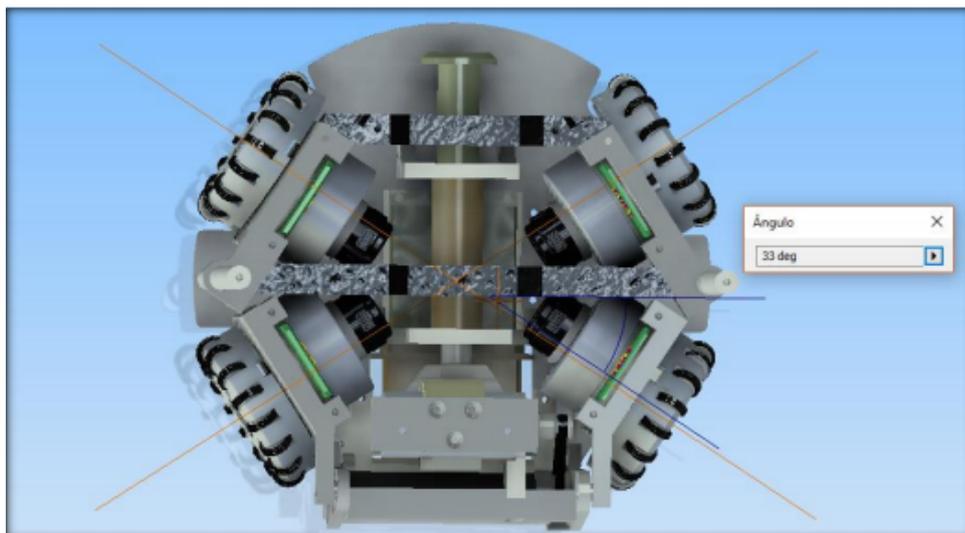
Figura 2 – Vista explodida da roda.



Fonte: Retirado de Gurzoni Jr et al. (2010).

As rodas principais se dispõem com uma angulação de 33° em relação ao eixo longitudinal do robô, como pode ser visto na Figura 3. Além disso, a transmissão é feita por um engrenamento interno com uma redução de 3:1, a engrenagem motora é acionada por um motor Maxon EC-45 flat de 50W.

Figura 3 – Vista superior do posicionamento das rodas.



Fonte: Retirado de Alves e Tonidandel (2018)

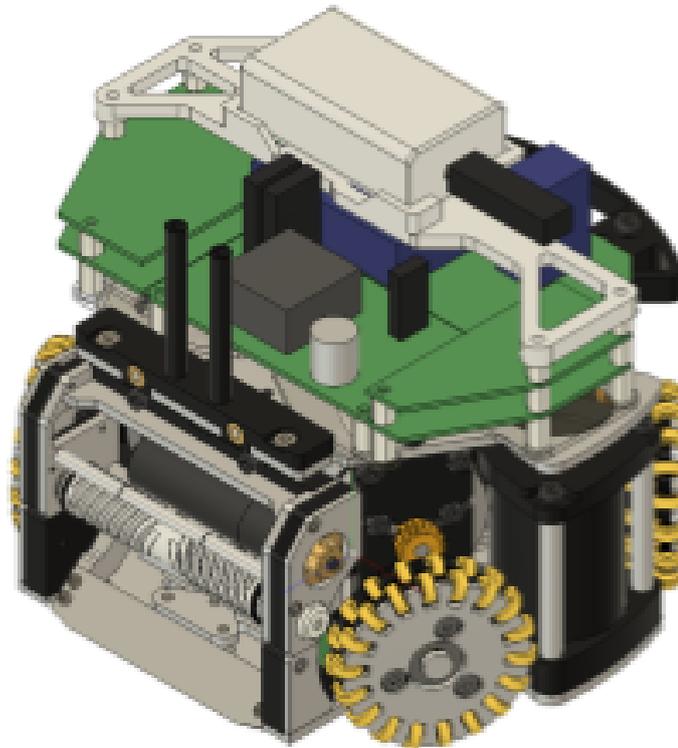
2.2.2 Influência dos roletes no desempenho do robô

Os roletes dispostos perpendicularmente em relação à roda principal formam a parte mais importante para o sistema omnidirecional de deslocamento, eles que fazem a movimen-

tação para qualquer direção sem que o robô perca a frente, por isso é necessária uma grande atenção para eles no projeto.

Atualmente, a roda principal é composta por 16 roletes dispostos ao longo da roda principal, sendo que seu diâmetro atual é de 54mm. Analisando outras equipes percebe-se que as equipes de ponta utilizam mais roletes, por exemplo, a RoboDragons usa 20 (ITO et al., 2019), a TIGERs usa 15, sendo que as rodas da equipe têm 33mm de diâmetro (OMMER; RYLL; GEIGER, 2019), garantindo uma razão grande entre a quantidade de roletes e o tamanho da roda, considerando outras equipes da liga *Small Size*. A equipe Op-Amp utiliza um layout diferenciado das outras em relação ao posicionamento dos roletes, na figura 4 é possível observar que eles utilizam duas camadas de roletes a fim de diminuir o passo entre eles (YOSHIMOTO et al., 2019).

Figura 4 – Montagem do robô da equipe Op-Amp.



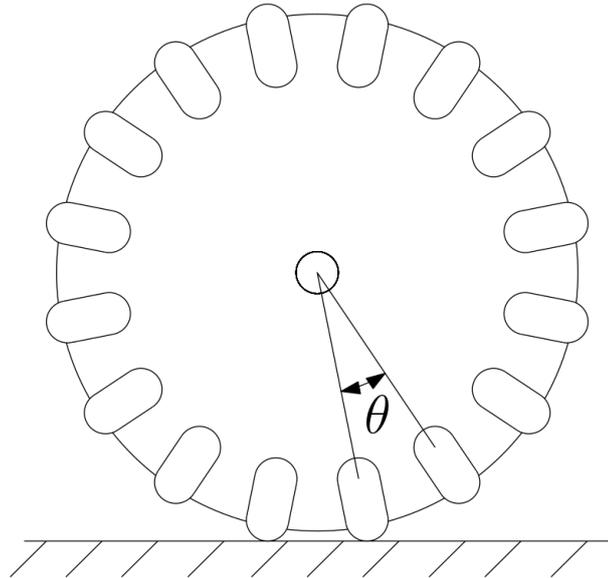
Fonte: Retirado de (YOSHIMOTO et al., 2019)

Uma das desvantagens da roda atual é justamente esse passo entre os roletes, que é considerado grande, comparado com as equipes citadas anteriormente. O objetivo do projeto é fazer uma estrutura que diminua a distância entre os roletes.

O passo grande entre os roletes pode ser um problema. Segundo Williams et al. (2002), quando a parte rígida das rodas tocam a superfície de movimentação, o coeficiente de atrito altera-se, o que não é algo bom, considerando que a parte rígida das rodas são feitas de alumínio, quando estão em contato com o carpete do campo de jogo não dão aderência na movimentação do robô, ou seja, ele escorrega em campo.

Além disso, como ilustrado na Figura 5, o ângulo entre os roletes é o ângulo mínimo que a estrutura pode girar e parar, isso ocorre devido ao fato que, com poucos roletes, a roda dificilmente irá parar com um rolete perpendicular ao chão, ou seja, o espaço entre os roletes é que servirá de ponto de contato. Portanto, quanto menor esse espaço, melhor a precisão.

Figura 5 – Demonstração do ângulo entre os roletes.



Fonte: Autor.

Ademais, quanto aos anéis de vedação utilizados para cobrir os roletes, há dois tipos principais que são utilizados pelas equipes da liga *Small Size*, os O-rings possuem seção transversal circular, enquanto os X-rings possuem seção transversal em formato de 'X', com as pontas arredondadas.

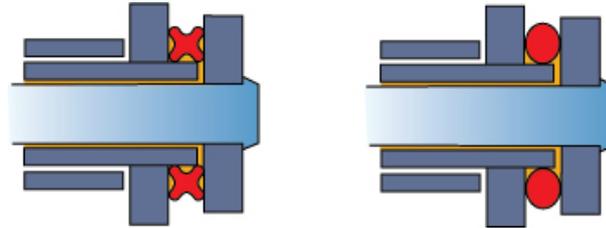
Segundo (KOLANI et al., 2020), os X-rings possuem um coeficiente de atrito maior em relação aos O-rings, o que concede maior aderência do robô ao carpete, impedindo que ele derrape ao acelerar ou desacelerar durante a partida.

Segundo (RYLL; JUT, 2020), os X-rings são superiores aos O-rings quando se trata de tração, embora eles tenham um desgaste levemente maior. Além disso, os X-rings oferecem 2 pontos de contato com o carpete em comparação a 1 ponto oferecido pelo O-ring, logo o primeiro tipo oferece uma área de contato maior com o campo, o que leva a um movimento mais suave no campo de jogo. A Figura 6 representa o corte transversal de ambos os tipos, é possível notar a diferença entre ambos os tipos quanto à área de contato, sendo na esquerda mostrado o X-ring e na direita o O-ring.

2.2.3 Influência do tamanho das rodas

Segundo Kalman (2013), o objetivo das rodas, além de prover uma movimentação suave, é transmitir forças e torques em três direções perpendiculares entre si para dar ao robô movimento e controle de direção. Para alcançar os objetivos acima faz-se necessário um design

Figura 6 – Diferença entre X-ring e O-ring.



Fonte: Retirado de (ROCKCITYCYCLES, 2022)

que seja capaz de lidar com impactos, como os que acontecem durante os jogos da categoria, que calcule o contato com o chão e que gere forças e torques necessários.

Sabendo disso, o tamanho das rodas é algo que necessita ser estudado e analisado, sempre observando o que as equipes da liga principal da categoria *Small Size* estão mudando em suas rodas, ou seja, sempre mirando a melhoria e aperfeiçoamento das partes mecânicas do robô.

Observando o ETDP (*Extended Team Description Paper*), que é o documento que classifica as equipes para a competição mundial da *RoboCup*, de equipes da liga principal, notou-se que a equipe TIGERs, considerada a equipe com uma das melhores mecânicas da competição, fez um estudo e decidiu diminuir o diâmetro de suas rodas em 32%. A justificativa da equipe foi que a diminuição possibilitou que eles posicionassem as rodas com 90° de espaçamento. Essa decisão diminuiu significativamente os efeitos das forças de atrito que interferem nas rodas, além de facilitar o controle de movimentação do robô (OMMER; RYLL; GEIGER, 2019).

Kalman (2013) diz que geralmente as forças de atrito atuam nas rodas de tal maneira que elas não sejam paralelas em relação às velocidades das rodas, o que vai fazer com que o robô acabe tomando um caminho que não é o qual ele deveria seguir, o que pode ser um problema para o controlador funcionar. Além disso, a dissipação de energia pelas rodas aumenta quanto maior a força de atrito, esse calor dissipado pode causar danos, mesmo que leves, nas partes mecânica e elétrica do robô.

Entretanto, segundo (RYLL; JUT, 2020), após a redução de 32% no tamanho da roda realizada em 2019, problemas com o material por conta do calor gerado durante a movimentação dos robôs fizeram com que a equipe TIGERs substituísse o material das rodas, saindo do Ácido Polilático (PLA) e migrando para o alumínio, o que será melhor discutido na seção 2.3. Porém, a usinagem do alumínio no mesmo tamanho do material 3D é extremamente difícil e custosa, por isso a equipe decidiu aumentar o tamanho para 62mm de diâmetro e, assim, não utilizar mais as rodas com espaçamento de 90°.

De acordo com a equipe TIGERs, o tamanho ideal das rodas é sempre um compromisso entre diversos parâmetros que devem ser analisados, tais como a velocidade máxima do robô necessária, a relação de transmissão do engrenamento, consumo de energia durante a partida e o tamanho disponível para as rodas, já que os robôs da categoria *Small Size* devem caber num diâmetro de 180mm e ter 150mm de altura, no máximo.

2.3 ESTUDO DOS MATERIAIS

O estudo do melhor material para a construção de qualquer projeto é de suma importância, diversos critérios devem ser considerados antes de que se tome qualquer decisão, buscando sempre o melhor custo-benefício para o projeto em questão.

Segundo Bresciani Filho (1988), buscando sempre o menor custo de fabricação para o produto que você deseja fazer, necessita-se realizar uma seleção conveniente dos materiais que irão constituir a peça produzida, essa escolha irá depender do projeto do produto e o projeto de fabricação desse produto, onde os requisitos de desempenho dessa peça objetivarão compatibilizar a função que ela exercerá com a possibilidade de fabricação.

A propriedade mecânica que determina a resistência de um material à impactos é a tenacidade. Essa propriedade é definida como sendo a capacidade que um material tem em absorver energia até sua ruptura (FERREIRA, 1987). Essa característica do material é importante para a equipe, pois nos jogos há diversos impactos devido à batidas que o robô pode sofrer. Embora a tendência é que esses impactos diminuam por conta das evoluções da liga, ainda sim é importante que o robô possa resistir à isso.

No caso dos robôs da categoria *Small Size* da equipe RoboFEI, as rodas são totalmente feitas de alumínio, o que pode ser vantajoso em algumas questões, como em tenacidade, enquanto em outras pode ser uma desvantagem, como em relação à custos e peso das peças, em comparação com materiais para impressão 3D.

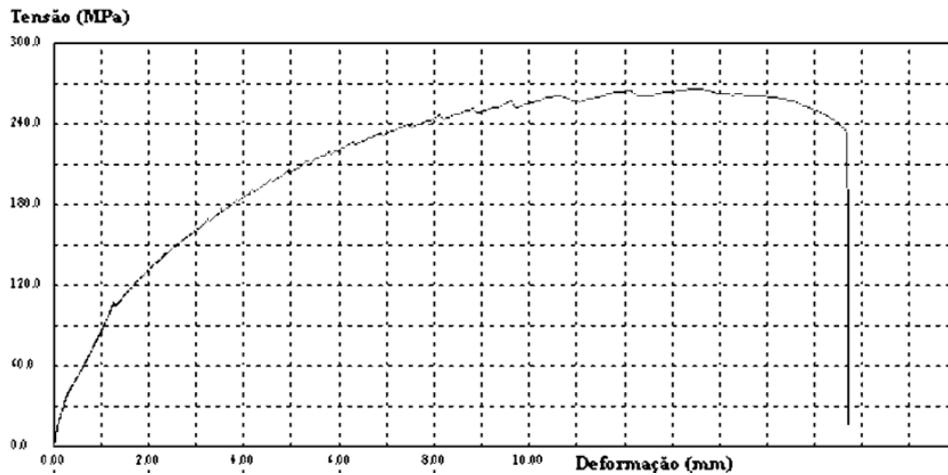
Sabendo disso, uma alternativa seria testar a substituição das peças em alumínio por impressões 3D, assim como outras equipes da *Small Size League* da *RoboCup*, tal como a equipe Tigers.

Embora as resistências ao escoamento e à ruptura do material utilizado para impressão 3D não sejam tão altas como as do alumínio, como pode ser visto nas Figuras 7 e 8, o custo e o tempo utilizados para que seja feita a peça são bem menores, o que fez a equipe pensar em imprimir uma quantidade grande dessas peças. Sabendo disso, o objetivo é que durante a partida, caso alguma peça quebre, basta fazer a troca, já que valeria mais a pena em relação à custo-benefício.

Segundo a equipe TIGERS em seu ETDP de 2020 (RYLL; JUT, 2020), a impressão 3D é um método comum e barato de usinagem de peças atualmente e sua utilização é válida para componentes de difícil usinagem, como peças pequenas, estruturas complexas e um grande volume de peças. Porém, a impressão 3D não é adequada para peças que sofrem grande estresse, como impactos, que é o caso das rodas na categoria *Small Size*.

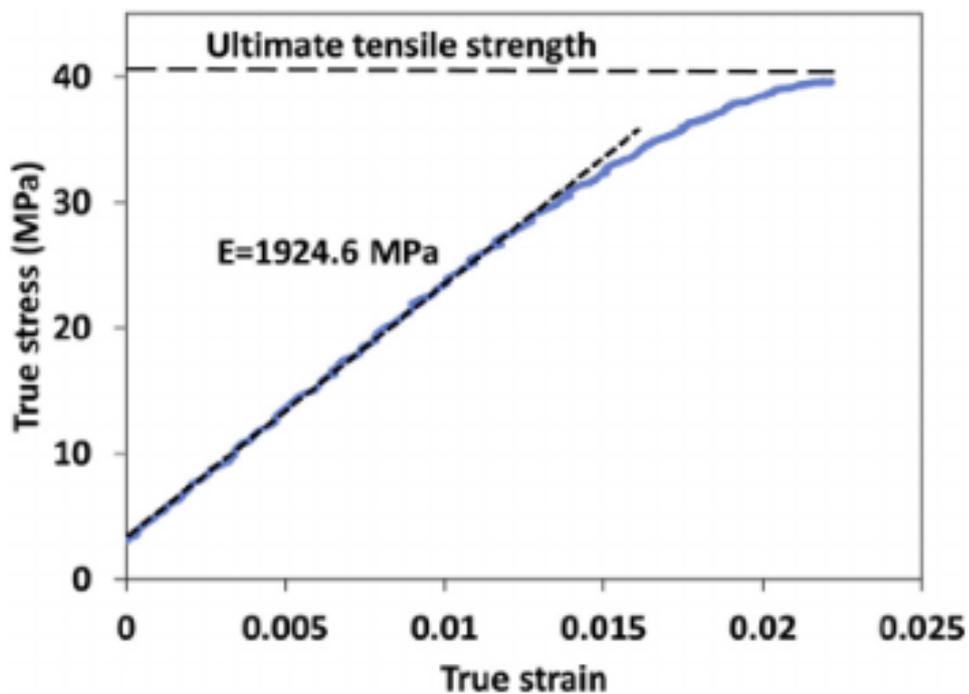
Além disso, segundo Berman (2012), em comparação às máquinas que subtraem o material de um bloco para fazer uma peça, as impressoras 3D praticamente não têm desperdício de matéria-prima. Ademais, aproximadamente 95% do material desperdiçado pode ser reutilizado nas impressoras 3D.

Figura 7 – Curva Tensão x Deformação do Alumínio.



Fonte: Retirado de Krummenauer, Silva e Quevedo (2010)

Figura 8 – Curva Tensão x Deformação do ABS.



Fonte: Retirado de Aliheidari et al. (2017)

Entretanto, alguns problemas podem ser encontrados na utilização de materiais 3D para construção das rodas. Segundo (RYLL; JUT, 2020), a estrutura utilizada pela equipe TIGERS em 2019, na qual 3 parafusos fixavam a tampa que fixava os 15 roletes na roda impressa em PLA, acabou complicando a participação da equipe no campeonato. No caso, por conta dos constantes reparos, os buracos em que os 3 parafusos eram encaixados ficavam desgastados e não conseguiam mais segurar a tampa da roda. Com isso, alguns roletes acabavam caindo da estrutura, o que colocava o material da roda em contato direto com o carpete, então o calor

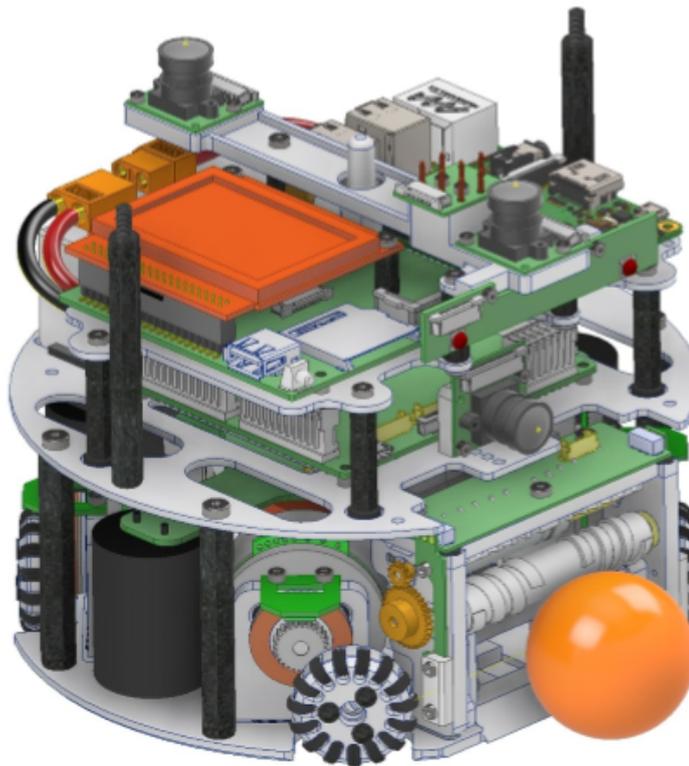
gerado pelo atrito acabava derretendo o PLA, fazendo com que a estrutura deformasse de forma irreparável.

2.4 TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA

Se uma mudança no tamanho das rodas é o objetivo, uma mudança na estrutura das rodas também deverá acontecer, já que a diminuição no diâmetro delas alteraria todo o resto, principalmente no sistema de transmissão de potência. Atualmente, a transmissão é feita por um engrenamento interno com uma redução de 3:1, essa engrenagem motora é acionada por um motor Maxon EC-45 flat de 50W, como já foi dito anteriormente.

Ao observar o ETDP da equipe TIGERS (OMMER; RYLL; GEIGER, 2019), além da diminuição do diâmetro das rodas houve também a alteração do engrenamento, mudando de interno para externo, como é possível analisar na Figura 9.

Figura 9 – Montagem do robô da equipe TIGERS.



Fonte: Retirado de (OMMER; RYLL; GEIGER, 2019)

Segundo Singh et al. (2012), as engrenagens internas possuem certas desvantagens, entre elas: utilizar raios pequenos é inadequado por conta de interferências no sistema, são necessárias ferramentas especiais para a fabricação das peças, além de que o encaixe das engrenagens é complicado, já que a engrenagem externa fica dentro da interna.

Além disso, a equipe Parsian, em seu ETDP de 2020 (KOLANI et al., 2020), diz que a utilização de engrenamento interno pode ser desafiador para sua construção com dimensões

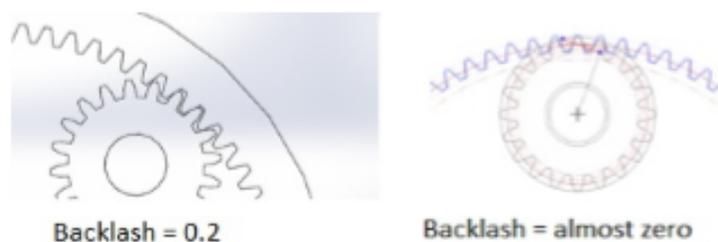
pequenas, além de que a menor excentricidade das engrenagens pode travar as rodas. A equipe alega que uma grande quantidade de carpete ficava acumulado entre as engrenagens e causava complicações na movimentação.

O maior motivo da substituição que a equipe planeja fazer é o custo de fabricação das peças. Ao utilizar um engrenamento interno, torna-se inviável fazer as peças nos laboratórios da faculdade, tornando-se necessário encaminhar o pedido para empresas terceiras, que normalmente impõem uma quantidade mínima para fazer a compra. Além disso, como a engrenagem é fixada na carcaça por interferência, as dimensões da carcaça também devem ser precisas, o que acaba encarecendo o custo final de cada robô, além da enorme burocracia.

Com a utilização de um engrenamento externo há a possibilidade tanto da fabricação das engrenagens na faculdade, quanto da compra de engrenagens de dimensões normalizadas, o que tiver melhor custo-benefício.

Além disso, é necessário observar também se entre as engrenagens há alguma folga, a exemplo de como foi feito no caso mostrado no ETDP da equipe MRL (POUDEH et al., 2019), ilustrado na Figura 10, onde as engrenagens antigas possuíam uma folga de 0.2 mm e essa folga foi removida, o que acabou melhorando a precisão da movimentação com mudança de direção. Segundo a equipe, quanto maior a folga entre as engrenagens, maior a perda de movimento entre o motor e as engrenagens, o que dificulta alcançar uma posição precisamente.

Figura 10 – Comparação entre um engrenamento com folga e um sem folga.



Fonte: Retirado de Poudeh et al. (2019)

2.5 TRABALHOS RELACIONADOS

Em Yoshimoto et al. (2019) é possível analisar a criação de um modelo de rodas omnidirecionais com duas camadas de roletes intercalados. Neste trabalho, apesar da utilização de peças nas camadas internas da roda feitas utilizando impressoras 3D, foi possível analisar a ideia geral para o desenvolvimento de rodas com duas camadas de roletes intercaladas, além de perceber os benefícios e os malefícios deste tipo de protótipo. No modelo da equipe foram utilizadas 2 camadas com 18 roletes cada uma. A equipe alegou que a utilização desse modelo melhorou a tração das rodas com o campo, além de deixar o movimento do robô mais suave em campo.

Já em Ryll e Jut (2020) foi possível analisar que materiais 3D, como PLA e ABS, não seriam a melhor escolha para se utilizar em rodas da categoria *Small Size*, por conta do calor gerado pela fricção da roda com o carpete do campo. Além disso, rodas muito pequenas seriam ruins para usinagem, por conta da dificuldade e do encarecimento do trabalho, por isso é preferível rodas maiores do que a tentativa de alocar as rodas em um espaçamento de 90° entre elas.

Além disso, em Ryll e Jut (2020), evidencia-se a preferência da utilização de X-Rings ao invés de O-Rings nos robôs da categoria *Small Size* por manter mais pontos de contato das rodas com o carpete do campo, garantindo melhor aderência do robô à superfície.

Ambos os trabalhos foram de grande valor para esta pesquisa, pois fornecem grande noção para a melhor construção de rodas omnidirecionais para a categoria *Small Size*, apresentando as melhores características e o que deve ser observado na hora de projetar rodas que forneçam a melhor movimentação para os robôs a fim de realizar as jogadas durante as partidas.

3 METODOLOGIA

Foi realizada uma pesquisa dos possíveis modelos de rodas, analisando diferentes parâmetros, como tamanho, quantidade de roletes, tipo de engrenamento e material, utilizados pelas melhores equipes da liga *Small Size* a fim de obter dados necessários para desenvolver diferentes modelos para testes.

O primeiro modelo desenvolvido foi construído visando o aumento da quantidade de roletes na estrutura sem a alteração do diâmetro da roda. O segundo modelo tem um rolete a mais e manteve o mesmo diâmetro da roda atual também. Ambos modelos servirão para mostrar a diferença que a adição de roletes na estrutura das rodas faz na movimentação do robô durante as jogadas em campo.

O terceiro modelo desenvolvido teve alterações no diâmetro, sendo realizada a diminuição do tamanho da roda em relação a estrutura atual e aos modelos desenvolvidos. Este modelo visa estudar os efeitos da alteração do diâmetro das rodas na movimentação do robô durante as jogadas em campo.

O quarto modelo foi desenvolvido baseado na estrutura de duas camadas intercaladas de roletes observada no TDP da equipe Op-Amp (vide Figura 4). Essa estrutura também é bastante promissora, pois o espaço entre um rolete e outro da mesma camada acaba sendo ocupado por um rolete da outra camada. Este modelo será construído para estudar a eficiência do modelo de duas camadas intercaladas em relação ao modelo com uma única camada.

O objetivo é avaliar os modelos a partir de métricas escolhidas, que são elas: massa da roda montada, consumo de tensão, consumo de corrente, qualidade do acabamento, torque e rotação fornecidos, alteração do projeto original, qualidade da movimentação em campo.

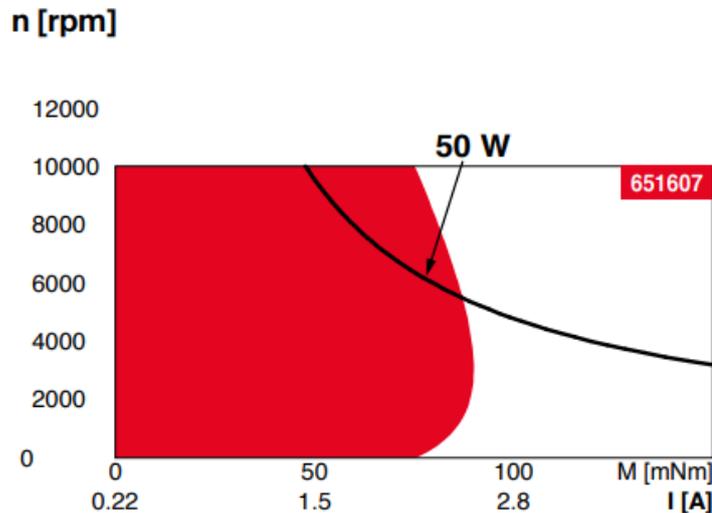
Os testes em campo foram feitos a partir de cenários de movimentação definidos pela equipe de programação, tal como um quadrado de lado 1 metro. A ideia é que as estruturas sejam testadas de forma igual para que não haja desigualdade nas avaliações.

A análise da massa da roda montada faz a comparação entre a massa dos modelos desenvolvidos com diferentes materiais e a estrutura da roda atual. Esta métrica para a liga *Small Size* é de suma importância, visto que as equipes estão tomando um caminho de diminuição do peso dos robôs por conta do aumento do tamanho do campo de jogo, logo rodas mais leves serão melhores.

O consumo de tensão e corrente estão ligados ao torque e rotação que serão fornecidos com os modelos utilizados, já que uma alteração no tamanho das rodas ou na relação de transmissão do engrenamento alteram a quantidade fornecida às rodas. Além disso, é importante buscar soluções que tenham menos consumo das baterias, para que não seja necessário a substituição de baterias durante a partida. A análise desta métrica é baseada no *datasheet* do motor utilizado para transmissão de potência, citado na seção 2.4. Na Figura 11 é possível observar o gráfico da faixa de operação do motor, a zona vermelha representa a região de operação

contínua, já a zona branca representa a área de operação curta, a linha preta reflete a potência atribuída em relação a corrente atribuída ao motor.

Figura 11 – Faixa de operação do motor EC 45 Flat 50W *brushless*.



Fonte: Retirado de DATASHEET... (2021)

A qualidade de acabamento da usinagem ou da impressão é de suma importância para uma boa movimentação dentro do campo de jogo. Uma roda com qualidade de acabamento pior pode fazer com que a roda não gire tão bem no eixo ou até mesmo que os roletes travem, por exemplo, fazendo com que a movimentação do robô dentro de campo fique comprometida. A análise da qualidade do acabamento foi feita de maneira visual e em campo, observando possíveis ruídos que representam problemas na estrutura, e definida como baixa, mediana e alta. Portanto, rodas com qualidade de acabamento alta são preferíveis.

O torque e velocidade fornecidos para movimentação do robô precisam estar de acordo com a necessidade da equipe dentro do campo. Segundo (RYLL; JUT, 2020), a maior parte do tempo o robô da categoria *Small Size* está acelerando, então promover um modelo que conceda um bom torque para as rodas é de suma importância, entretanto o robô não pode ser lento em campo, portanto foi necessário encontrar valores que unam as melhores condições para a equipe. Essa análise foi feita em conjunto da equipe, observando se a velocidade e torque fornecidos às rodas são suficiente para o que a equipe almeja para uma boa qualidade de jogo.

A alteração do projeto original analisou a dificuldade de implementação de um modelo de rodas no robô já existente. Alguns modelos precisaram de mudanças na estrutura do robô que não sejam no conjunto da roda, então buscou-se um modelo que não impusesse tanta dificuldade em sua implementação. A análise foi definida como fácil, razoável ou difícil, e dependerá do nível de alteração necessária na estrutura atual para a implementação.

A qualidade da movimentação em campo foi uma análise geral do comportamento do robô ao se movimentar dentro de campo, fazendo comparações com a estrutura das rodas que era utilizada anteriormente. A análise da qualidade foi feita por testes em campo, analisando como

o robô está se comportando durante as movimentações, se está derrapando durante acelerações, por exemplo, sendo definida como baixa, mediana e alta.

Após os testes e a análise das métricas comentadas acima, o melhor modelo foi escolhido e implementado à estrutura com as alterações necessárias para que seja utilizado nos campeonatos pela equipe, mostrando sua real eficiência.

4 RESULTADOS FINAIS

4.1 CÁLCULO DO DIÂMETRO IDEAL

Apesar do desenvolvimento dos protótipos baseado na estrutura atual e observando outras equipes, buscam-se equações a fim de encontrar o valor ideal a partir de parâmetros de entrada, ou pelo menos um intervalo de valores que melhore a escolha do tamanho das rodas. Para isso, soluções serão buscadas utilizando a cinemática e a dinâmica do robô atual.

4.1.1 Estudo da dinâmica do robô

Segundo (SÁ, 2016), a dinâmica de um veículo se dá pelo entendimento dos movimentos e suas interações com o ambiente e com seus eixos de coordenadas, ou seja, é definida como os movimentos de um corpo rígido em relação a um sistema de referência.

A primeira solução será desenvolvida a partir da dinâmica, utilizando-se da segunda lei de Newton como guia para a hipótese, conforme às Equações 1, 2 e 3, onde m é a massa do robô, \ddot{x} é a aceleração do robô no eixo X, \ddot{y} é a aceleração no eixo Y, F_x e F_y são as forças aplicadas pelo robô nos eixos X e Y, respectivamente, I é o momento de inércia do robô e τ é o momento no robô.

$$m\ddot{x} = F_x \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = F_y \quad (2)$$

$$I\ddot{\theta} = \tau \quad (3)$$

As forças aplicadas pelo robô nos eixos X e Y e o momento no robô podem ser descritos segundo as Equações 4, 5 e 6, onde d_1 é a distância entre o centro do veículo e o eixo da roda e d_2 é a distância entre o centro do veículo e o meio da roda.

$$F_x = (-F_1 + F_2 + F_3 - F_4) \sin \theta \quad (4)$$

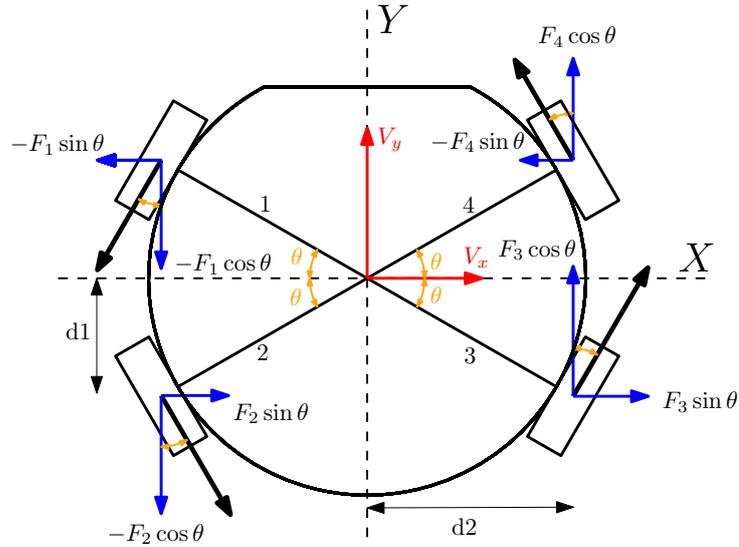
$$F_y = (-F_1 - F_2 + F_3 + F_4) \cos \theta \quad (5)$$

$$\tau = (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \cos \theta \times d_1 + (F_1 + F_2 + F_3 + F_4) \sin \theta \times d_2 \quad (6)$$

Todas as cotas, ângulos, sentidos das forças e suas componentes podem ser observados na Figura 12 a fim de uma melhor compreensão do desenvolvimento das equações.

A partir das equações anteriores é possível deduzir a Equação 7, onde T_i é o torque atuante na roda i , sendo que i varia de 1 a 4 e R é o raio da roda, e será uma das equações que ajudará a encontrar o valor, ou intervalo de valores, ideal para o diâmetro das rodas do robô.

Figura 12 – Vista 2D do robô com as forças e ângulos.



Fonte: Autor

$$\begin{bmatrix} \ddot{x} \\ \ddot{y} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-\sin \theta}{R \times m} & \frac{\sin \theta}{R \times m} & \frac{\sin \theta}{R \times m} & \frac{-\sin \theta}{R \times m} \\ \frac{-\cos \theta}{R \times m} & \frac{-\cos \theta}{R \times m} & \frac{\cos \theta}{R \times m} & \frac{\cos \theta}{R \times m} \\ \frac{\cos \theta \times d_1 + \sin \theta \times d_2}{I \times R} & \frac{\cos \theta \times d_1 + \sin \theta \times d_2}{I \times R} & \frac{\cos \theta \times d_1 + \sin \theta \times d_2}{I \times R} & \frac{\cos \theta \times d_1 + \sin \theta \times d_2}{I \times R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} T_1 \\ T_2 \\ T_3 \\ T_4 \end{bmatrix} \quad (7)$$

Porém, visto que no projeto atual não é possível realizar o controle de aceleração do movimento, o estudo da dinâmica do robô fica comprometido, visto que não é possível estimar quais são os torques necessários a fim de alcançar determinadas acelerações. Por conta disso, encontrar valores em que o raio da roda seriam ideais não será possível neste projeto, deixando uma ideia para projetos futuros dentro da equipe.

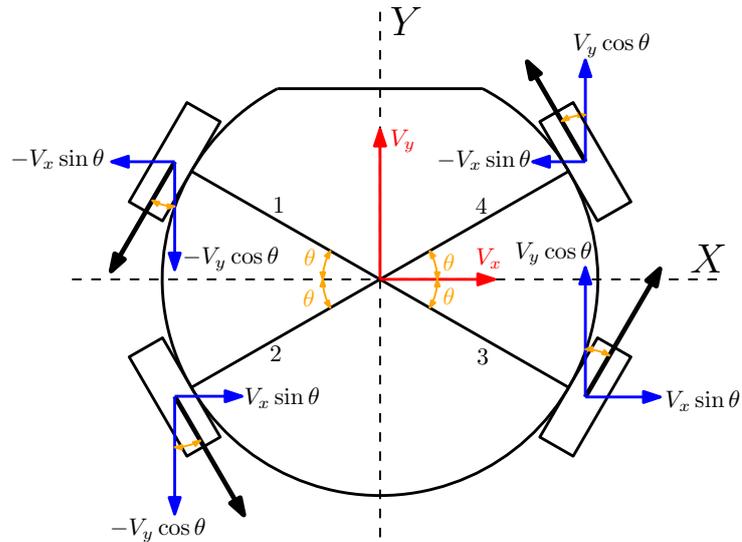
4.1.2 Estudo da cinemática do robô

Segundo (SÁ, 2016), a cinemática é fundamental para definir posição e velocidade de robôs ao estudar os movimentos dos corpos. Quando se menciona posição, refere-se à posição propriamente dita, como a orientação, enquanto quando se fala em velocidade, considera-se tanto a velocidade angular como a linear.

A segunda solução será desenvolvida a partir da cinemática, utilizando-se da cinemática direta mais precisamente, que permite encontrar o movimento do robô sabendo a velocidade angular de cada roda. A Figura 13 demonstra as velocidades do robô e suas componentes de cada roda, das quais se deduzirá a próxima possível solução.

A partir disso, é possível encontrar a Equação 8, onde ω_i é a velocidade angular da roda i , sendo que i varia de 1 a 4, v_x é a velocidade linear no eixo X, v_y é a velocidade linear no eixo Y e $\dot{\theta}$ é a velocidade de rotação do robô.

Figura 13 – Vista 2D do robô com as velocidades e ângulos.



Fonte: Autor

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} -\sin \theta & \cos \theta & 1 \\ \sin \theta & \cos \theta & 1 \\ \sin \theta & -\cos \theta & 1 \\ -\sin \theta & -\cos \theta & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} \quad (8)$$

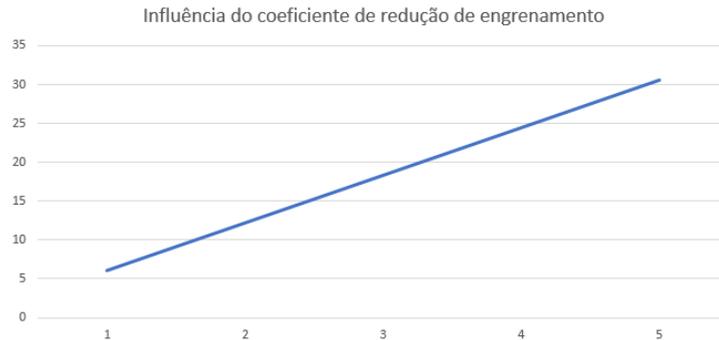
Considerando a utilização em cada uma das rodas de um motor Maxon EC 45 flat de 50W em sua tensão nominal de 24 Volts (DATASHEET... , 2021), em que a velocidade nominal é de 5240rpm, em um cenário em que o robô apenas andará no caminho do eixo Y, isto é, sem componente no eixo X ou sem velocidade de rotação, além de uma relação de transmissão de 1:3, o ângulo θ como 33° e velocidade linear desejada no eixo Y como 4m/s, é possível encontrar um valor estimado de 18.34mm para o raio das rodas.

Analisando melhor o valor encontrado, é possível dizer que esse seria o valor mínimo para as especificações desejadas. Esse valor mostra que os diâmetros de 54 mm e 44mm utilizados para a realização dos 4 modelos propostos neste projeto estão adequados com a cinemática do robô.

Além disso, é importante mostrar a influência dos diferentes parâmetros listados acima para encontrar os valores de raios ideais para a construção dos modelos. Na Figura 14, é possível analisar a influência do coeficiente de redução do engrenamento, onde foram variados os valores de 1 a 5, como pode ser observado, confirmando a tendência linear do parâmetro.

Na Figura 15, é possível analisar a influência do ângulo entre a posição das rodas e o eixo do robô, variando os valores de 20° a 45° , como pode ser observado, também confirmando a tendência linear do parâmetro. É necessário dizer que deve-se ter cuidado quanto a ângulos muito pequenos, pois pode haver interferência entre duas rodas dependendo do diâmetro utilizado para a construção das rodas. Além disso, é necessário lembrar também que não neces-

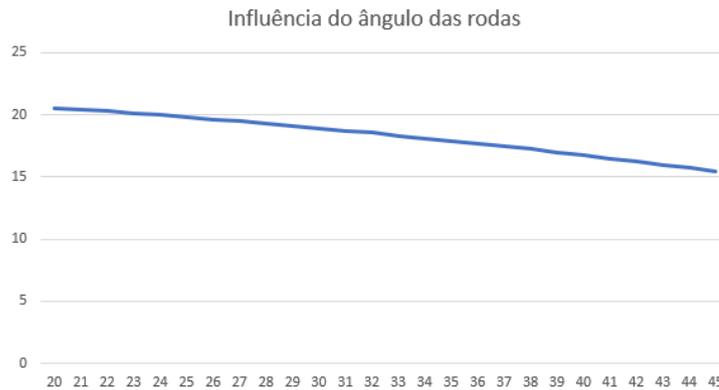
Figura 14 – Influência do coeficiente de redução do engrenamento no cálculo dos raios ideais.



Fonte: Autor

sariamente as rodas dianteiras precisam estar na mesma angulação das traseiras, como mostrado pela equipe RoboTeam Twente em seu TDP de 2020 (BOS et al., 2020).

Figura 15 – Influência do ângulo das rodas em relação ao eixo do robô no cálculo dos raios ideais.



Fonte: Autor

Já na Figura 16, é possível analisar a influência da velocidade linear desejada pela equipe no desenvolvimento do protótipo dos robôs na parte da construção das rodas, atualmente as equipes de ponta da *Small Size League* jogam com robôs que possuem velocidade máxima de, aproximadamente, 4m/s, por conta do campo de grande porte utilizado na divisão principal da liga. Observando o gráfico, em que foram variados os valores de velocidade entre 1,5m/s e 4,5m/s, é possível observar também a tendência linear do parâmetro.

4.2 PRIMEIRO MODELO DESENVOLVIDO

O primeiro modelo desenvolvido foi projetado com 54mm de diâmetro, além de utilizar 20 roletes com X-Rings ao invés de 16, como era utilizado previamente pela equipe. A roda montada é composta pela tampa, pelo corpo da roda, 20 roletes com 20 X-Rings, a coroa engrenada de 60 dentes montada por interferência que fará a transmissão da potência do motor, 3 parafusos Allen com cabeça abaulada M3 com 8mm de comprimento e 2 rolamentos. Além

Figura 16 – Influência da velocidade desejada no cálculo dos raios ideais.

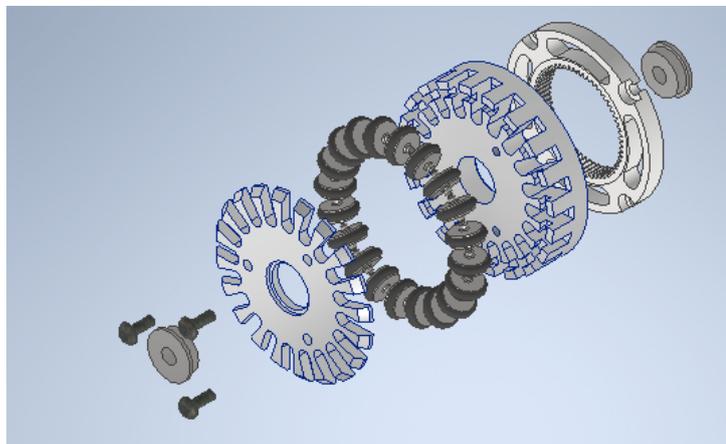


Fonte: Autor

disso, o modelo como um todo foi usinado utilizando alumínio série 6060, enquanto a coroa engrenada foi utilizado aço inoxidável série 4320 e os X-Rings são feitos de borracha para melhor aderência com o carpete utilizado nas partidas.

Na Figura 17, é possível observar a vista explodida do primeiro protótipo, nela é possível notar melhor os detalhes e as partes que compõem a roda como um todo. As medidas, em milímetros, do corpo da roda e da tampa podem ser encontradas no Apêndice B, para entendimento mais detalhado.

Figura 17 – Vista explodida do primeiro protótipo com 54mm e 20 roletes.



Fonte: Autor

Em relação a massa do primeiro modelo desenvolvido, o valor encontrado foi de 85g por roda. Em relação ao antigo modelo, é possível notar uma melhoria de 16g, visto que a massa dele era de 101g. Analisando cruamente esta diminuição pode aparentar ser um valor baixo, entretanto, as equipes da categoria *Small Size* nos últimos anos estão visando a diminuição de peso dos robôs por conta de dois objetivos, o primeiro seria a facilidade do controle do robô e o segundo seria a maior facilidade para aceleração em campos maiores.

Quanto a qualidade de acabamento da usinagem, o modelo teve uma boa qualidade nos testes realizados em campo e no laboratório. Visualmente, não apareceram problemas visíveis

que pudessem influenciar na movimentação no carpete das partidas, sendo comprovado com os testes em campo, que não apresentaram qualquer ruído ou má qualidade na usinagem que atrapalhou nos testes. Por isso, é possível dizer que, quanto a qualidade do acabamento da usinagem, o primeiro modelo teve alta qualidade.

Em relação ao torque e velocidades fornecidos para movimentação do robô, é necessário considerar a redução do engrenamento de 1:3 e o raio da roda de 27mm. Além disso, considera-se também o motor Maxon EC 45 flat de 50W, que fornece nominalmente 5240rpm e 83.4mNm, com uma eficiência máxima de 83%. Nas equações 9 e 10 mostram os valores teóricos que cada roda fornecerá de velocidade linear e torque aos robôs. Em discussão com a equipe, foi determinado que esses valores são suficientes para os objetivos da equipe nos campeonatos e adequados ao tamanho do campo de jogo.

$$v = \omega * R = \frac{5140 * 2 * \pi}{3 * 60} * 27 * 10^{-3} = 4.8443m/s \quad (9)$$

$$T = 83.4 * 3 * 0.83 = 207.67mNm \quad (10)$$

Com os valores calculados acima nas equações 9 e 10, o consumo de tensão e corrente, que estão ligados ao torque e rotação fornecidos às rodas, estão dentro do limite da região de operação contínua do motor Maxon EC 45 flat 50W, como é possível observar na figura 11, além de que os valores de torque e rotação são suficientes para a liga *Small Size*. Portanto, o motor não vai precisar trabalhar na área de operação curta, que utiliza mais corrente num espaço de tempo menor, mas que pode diminuir significativamente a vida útil dos motores.

Já em relação a alteração do projeto original, pode-se dizer que o primeiro modelo foi de fácil alteração, visto que não houve necessidade de alteração da estrutura dos mancais que seguram a roda em seu lugar, já que não houve alteração no tamanho da roda ou na relação de transmissão do engrenamento.

Com os testes em campo, não foram nítidos quaisquer problemas em relação a qualidade de movimentação do robô ao utilizar as rodas do primeiro modelo desenvolvido, o robô utilizado obteve uma movimentação limpa, sem escorregamento ou qualquer tipo de trepidação causados por problemas na construção dos modelos, demonstrando a eficiência do tamanho da roda e da quantidade de roletes por roda. Com isso, pode-se definir que a qualidade da movimentação em campo foi alta analisando os testes em campo.

4.3 SEGUNDO MODELO DESENVOLVIDO

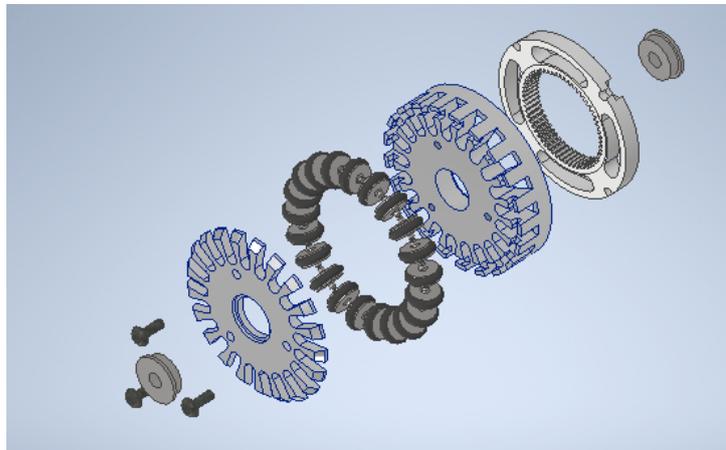
O segundo modelo desenvolvido foi projetado com 54mm de diâmetro, além de utilizar 21 roletes com X-Rings ao invés de 16 O-rings, como era utilizado previamente pela equipe. A roda montada é composta pela tampa, pelo corpo da roda, 21 roletes com 21 X-Rings, a coroa engrenada de 60 dentes montada por interferência que fará a transmissão da potência do motor, 3 parafusos Allen com cabeça abaulada M3 com 8mm de comprimento e 2 rolamentos.

Além disso, o modelo como um todo foi usinado utilizando alumínio série 6060, enquanto a coroa engrenada foi utilizado aço inoxidável série 4320 e os X-Rings são feitos de borracha para melhor aderência com o carpete utilizado nas partidas.

A ideia desse modelo foi poder analisar a influência da adição de um rolete, observando em relação ao primeiro modelo desenvolvido, que possui 20 roletes para aderência.

Na Figura 18, é possível observar a vista explodida do segundo protótipo, nela é possível notar melhor os detalhes e as partes que compõem a roda como um todo. As medidas, em milímetros, do corpo da roda e da tampa podem ser encontradas no Apêndice C, para entendimento mais detalhado.

Figura 18 – Vista explodida do segundo protótipo com 54mm e 21 roletes.



Fonte: Autor

Em relação a massa do segundo modelo desenvolvido, o valor encontrado foi de 83g por roda. Em relação ao antigo modelo, é possível notar uma melhoria de 18g, visto que a massa dele era de 101g, além de representar uma diminuição de 2g em relação ao primeiro modelo desenvolvido. Apesar da pequena variação em relação ao primeiro modelo, analisando cruamente a diminuição em relação ao modelo original pode aparentar ser um valor baixo, entretanto, as equipes da categoria *Small Size* nos últimos anos estão visando a diminuição de peso dos robôs, portanto a diminuição é interessante, como explicado anteriormente.

Quanto a qualidade de acabamento da usinagem, o modelo teve uma boa qualidade nos testes realizados em campo e no laboratório. Visualmente, não apareceram problemas visíveis que pudessem influenciar na movimentação no carpete das partidas. Entretanto, ao tentar realizar a montagem das rodas, notou-se que por conta da tolerância especificada e da qualidade da usinagem, os roletes não cabiam e acabavam interferindo no consecutivo. Para resolver esse problema foi necessário limar as peças para que coubessem.

Apesar deste problema, com os testes em campo foi possível observar que o modelo não apresentou qualquer ruído ou má qualidade, apresentando um bom desempenho ao se movimentar. Por isso, é possível dizer que, quanto a qualidade do acabamento da usinagem, o segundo modelo teve média qualidade, já que, apesar da boa qualidade da movimentação, houveram problemas para montagem do protótipo.

Em relação ao torque e velocidades fornecidos para movimentação do robô, é necessário considerar a redução do engrenamento de 1:3 e o raio da roda de 27mm. Além disso, considera-se também o motor Maxon EC 45 flat de 50W, que fornece nominalmente 5240rpm e 83.4mNm, com uma eficiência máxima de 83%. Nas equações 11 e 12 mostram os valores teóricos que cada roda fornecerá de velocidade linear e torque aos robôs. Em discussão com a equipe, foi determinado que esses valores são suficientes para os objetivos da equipe nos campeonatos e adequados ao tamanho do campo de jogo.

$$v = \omega * R = \frac{5140 * 2 * \pi}{3 * 60} * 27 * 10^{-3} = 4.8443m/s \quad (11)$$

$$T = 83.4 * 3 * 0.83 = 207.67mNm \quad (12)$$

Com os valores calculados acima nas equações 11 e 12, o consumo de tensão e corrente, que estão ligados ao torque e rotação fornecidos às rodas, estão dentro do limite da região de operação contínua do motor Maxon EC 45 flat 50W, como é possível observar na figura 11, além de que os valores de torque e rotação são suficientes para a liga *Small Size*. Portanto, o motor não vai precisar trabalhar na área de operação curta, que utiliza mais corrente num espaço de tempo menor, mas que pode diminuir significativamente a vida útil dos motores.

Já em relação a alteração do projeto original, pode-se dizer que o segundo modelo foi de fácil alteração, visto que não houve necessidade de alteração da estrutura dos mancais que seguram a roda em seu lugar, já que não houve alteração no tamanho da roda ou na relação de transmissão do engrenamento.

Com os testes em campo, não foram nítidos qualquer problemas em relação a qualidade de movimentação do robô ao utilizar as rodas do segundo modelo desenvolvido, o robô utilizado obteve uma movimentação limpa, sem escorregamento ou qualquer tipo de trepidação causados por problemas na construção dos modelos, demonstrando a eficiência do tamanho da roda e da quantidade de roletes por roda. Com isso, pode-se definir que a qualidade da movimentação em campo foi alta analisando os testes em campo.

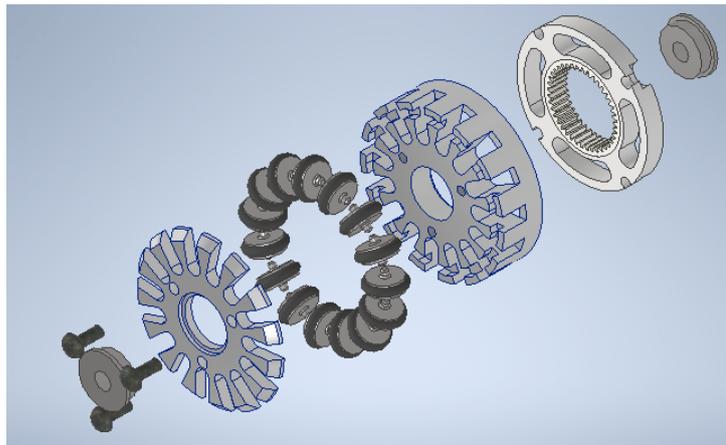
4.4 TERCEIRO MODELO DESENVOLVIDO

O terceiro modelo desenvolvido foi projetado com 44mm de diâmetro, além de utilizar 15 roletes com X-Rings. A roda montada é composta pela tampa, pelo corpo da roda, 15 roletes com 15 X-Rings, a coroa engrenada de 60 dentes montada por interferência que fará a transmissão da potência do motor, 3 parafusos Allen com cabeça abaulada M3 com 8mm de comprimento e 2 rolamentos. Além disso, o modelo como um todo foi usinado utilizando alumínio série 6060, enquanto a coroa engrenada foi utilizado aço inoxidável série 4320 e os X-Rings são feitos de borracha para melhor aderência com o carpete utilizado nas partidas.

A ideia desse modelo foi poder analisar a influência da alteração do diâmetro da roda, observando em relação aos outros modelos desenvolvidos e a roda utilizada pela equipe previamente.

Na Figura 19, é possível observar a vista explodida do terceiro protótipo, nela é possível notar melhor os detalhes e as partes que compõem a roda como um todo. As medidas, em milímetros, do corpo da roda e da tampa podem ser encontradas no Apêndice D, para entendimento mais detalhado.

Figura 19 – Vista explodida do terceiro protótipo com 44mm e 15 roletes.



Fonte: Autor

Em relação a massa do terceiro modelo desenvolvido, o valor encontrado foi de 66g por roda. Em relação ao antigo modelo, é possível notar uma melhoria de 35g, visto que a massa dele era de 101g, além de representar uma diminuição de 17g em relação ao primeiro modelo desenvolvido e 15g em relação ao segundo modelo desenvolvido. Apesar da grande variação em relação aos primeiro e segundo modelos, já era de se esperar uma grande diferença por conta da diminuição do diâmetro do terceiro modelo. Entretanto, as equipes da categoria *Small Size* nos últimos anos estão visando a diminuição de peso dos robôs, portanto a diminuição é interessante, como explicado anteriormente.

Quanto a qualidade de acabamento da usinagem, o modelo teve uma boa qualidade nos testes realizados em campo e no laboratório. Visualmente, não apareceram problemas visíveis que pudessem influenciar na movimentação no carpete das partidas, sendo comprovado com os testes em campo, que não apresentaram qualquer ruído ou má qualidade na usinagem que atrapalhou nos testes. Por isso, é possível dizer que, quanto a qualidade do acabamento da usinagem, o primeiro modelo teve alta qualidade.

Em relação ao torque e velocidades fornecidos para movimentação do robô, é necessário considerar a redução do engrenamento de 1:3 e o raio da roda de 22mm. Além disso, considera-se também o motor Maxon EC 45 flat de 50W, que fornece nominalmente 5240rpm e 83.4mNm, com uma eficiência máxima de 83%. Nas equações 13 e 14 mostram os valores teóricos que cada roda fornecerá de velocidade linear e torque aos robôs. Em discussão com a equipe, foi

determinado que esses valores são suficientes para os objetivos da equipe nos campeonatos e adequados ao tamanho do campo de jogo.

$$v = \omega * R = \frac{5140 * 2 * \pi}{3 * 60} * 22 * 10^{-3} = 3.9472m/s \quad (13)$$

$$T = 83.4 * 3 * 0.83 = 207.67mNm \quad (14)$$

Com os valores calculados acima nas equações 13 e 14, o consumo de tensão e corrente, que estão ligados ao torque e rotação fornecidos às rodas, estão dentro do limite da região de operação contínua do motor Maxon EC 45 flat 50W, como é possível observar na figura 11, além de que os valores de torque e rotação são suficientes para a liga *Small Size*. Portanto, o motor não vai precisar trabalhar na área de operação curta, que utiliza mais corrente num espaço de tempo menor, mas que pode diminuir significativamente a vida útil dos motores.

Já em relação a alteração do projeto original, pode-se dizer que o segundo modelo foi de difícil alteração, visto que houve necessidade de alteração da estrutura dos mancais que seguram a roda em seu lugar, por conta da alteração do diâmetro das rodas. Para que as rodas pudessem encostar no carpete, foi necessário alterar a posição do motor e do eixo da roda nos mancais, abaixando-as. Por conta dessa alteração, que teria que ser feita em vários robôs, decidiu-se que a alteração do projeto seria difícil.

Com os testes em campo, não foram nítidos qualquer problemas em relação a qualidade de movimentação do robô ao utilizar as rodas do terceiro modelo desenvolvido, o robô utilizado obteve uma movimentação limpa, sem escorregamento ou qualquer tipo de trepidação causados por problemas na construção dos modelos, demonstrando a eficiência do tamanho da roda e da quantidade de roletes por roda, apesar do tamanho menor das rodas em relação aos outros modelos. Com isso, pode-se definir que a qualidade da movimentação em campo foi alta analisando os testes em campo.

4.5 QUARTO MODELO DESENVOLVIDO

O quarto modelo desenvolvido foi projetado com 54mm de diâmetro, além de utilizar 2 camadas de 20 roletes com X-Rings, totalizando 40 roletes com X-Rings. A roda montada é composta pela tampa, pelo corpo da roda, que foi dividido em duas partes, para facilitar o processo de usinagem, 40 roletes com 40 X-Rings, a coroa engrenada de 60 dentes montada por interferência que fará a transmissão da potência do motor, 3 parafusos Allen com cabeça abaulada M3 com 18.4mm de comprimento e 2 rolamentos. Além disso, o modelo como um todo foi usinado utilizando alumínio série 6060, enquanto a coroa engrenada foi utilizado aço inoxidável série 4320 e os X-Rings são feitos de borracha para melhor aderência com o carpete utilizado nas partidas.

A ideia desse modelo foi poder analisar o modelo de dupla camadas desenvolvido a partir da ideia da equipe Op-Amp e adaptado para a realidade da equipe RoboFEI. A ideia deste

modelo é utilizar o espaço 'perdido' entre um rolete e outro adicionando uma outra camada de roletes, ocupando a maior parte da roda. Entretanto, este ganho em relação ao espaço acaba influenciando no comprimento da roda como um todo, já que ela fica maior pela adição da segunda camada de roletes.

Na Figura 20, é possível observar a vista explodida do quarto protótipo, nela é possível notar melhor os detalhes e as partes que compõem a roda como um todo. As medidas, em milímetros, da base, dos corpos e da tampa da roda podem ser encontradas no Apêndice E, para entendimento mais detalhado.

Figura 20 – Vista explodida do quarto protótipo com 54mm e duas camadas de 20 roletes cada.



Fonte: Autor

Em relação a massa do quarto modelo desenvolvido, o valor encontrado foi de 127g por roda. Em relação ao antigo modelo, é possível notar uma piora de 26g, visto que a massa dele era de 101g, além de representar um aumento de 44g em relação ao primeiro modelo desenvolvido. Apesar da grande variação em relação ao primeiro modelo, a comparação direta é complicada visto que para que o quarto modelo pudesse comportar duas camadas de roletes foi necessário aumentar o tamanho do corpo da roda, logo já era esperado esse aumento em relação aos outros modelos. Entretanto, as equipes da categoria *Small Size* nos últimos anos estão visando a diminuição de peso dos robôs, portanto a diminuição de peso seria mais interessante, como explicado anteriormente.

Quanto a qualidade de acabamento da usinagem, o modelo teve uma boa qualidade nos testes realizados em campo e no laboratório. Visualmente, não apareceram problemas visíveis que pudessem influenciar na movimentação no carpete das partidas, sendo comprovado com os testes em campo, que não apresentaram qualquer ruído ou má qualidade na usinagem que atrapalhou nos testes. Por isso, é possível dizer que, quanto a qualidade do acabamento da usinagem, o primeiro modelo teve alta qualidade.

Em relação ao torque e velocidades fornecidos para movimentação do robô, é necessário considerar a redução do engrenamento de 1:3 e o raio da roda de 27mm. Além disso, considera-se também o motor Maxon EC 45 flat de 50W, que fornece nominalmente 5240rpm e 83.4mNm,

com uma eficiência máxima de 83%. Nas equações 15 e 16 mostram os valores teóricos que cada roda fornecerá de velocidade linear e torque aos robôs. Em discussão com a equipe, foi determinado que esses valores são suficientes para os objetivos da equipe nos campeonatos e adequados ao tamanho do campo de jogo.

$$v = \omega * R = \frac{5140 * 2 * \pi}{3 * 60} * 27 * 10^{-3} = 4.8443m/s \quad (15)$$

$$T = 83.4 * 3 * 0.83 = 207.67mNm \quad (16)$$

Com os valores calculados acima nas equações 11 e 12, o consumo de tensão e corrente, que estão ligados ao torque e rotação fornecidos às rodas, estão dentro do limite da região de operação contínua do motor Maxon EC 45 flat 50W, como é possível observar na figura 11, além de que os valores de torque e rotação são suficientes para a liga *Small Size*. Portanto, o motor não vai precisar trabalhar na área de operação curta, que utiliza mais corrente num espaço de tempo menor, mas que pode diminuir significativamente a vida útil dos motores.

Já em relação a alteração do projeto original, a mudança do quarto modelo foi média, visto que não houve necessidade de alteração da estrutura dos mancais que seguram a roda em seu lugar, entretanto foi necessário aumentar o tamanho do eixo que acopla a roda ao mancal, já que houve um aumento na espessura da roda. Portanto, por conta desta alteração, decidiu-se que a alteração do projeto original teve dificuldade média.

Com os testes em campo, não foram nítidos qualquer problemas em relação a qualidade de movimentação do robô ao utilizar as rodas do quarto modelo desenvolvido, o robô utilizado obteve uma movimentação limpa, sem escorregamento ou qualquer tipo de trepidação causados por problemas na construção dos modelos, demonstrando a eficiência do tamanho da roda e da quantidade de roletes por roda. Com isso, pode-se definir que a qualidade da movimentação em campo foi alta analisando os testes em campo.

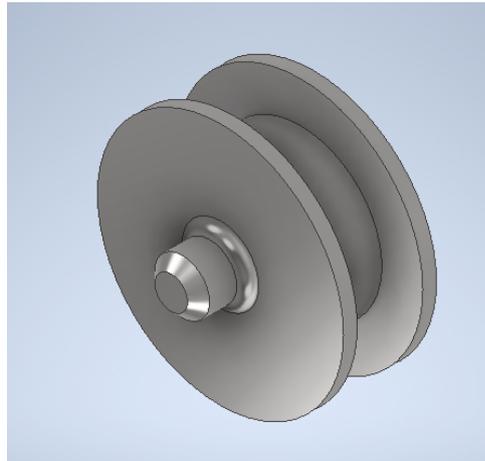
4.6 ROLETE DESENVOLVIDO

Para que fosse possível realizar o encaixe dos roletes nos protótipos desenvolvidos, foi necessário alterar o projeto do rolete, já que uma densidade maior de roletes implica na diminuição do comprimento deles. É possível analisar a nova estrutura do rolete utilizado na construção dos protótipos na Figura 21.

A nova estrutura do rolete foi desenvolvida com base na estrutura utilizada atualmente, com algumas ideias vindas de outras equipes da liga *Small Size*, como o chanfro na ponta para facilitar o encaixe de todos os roletes e o arredondamento na região concentradora de tensão.

A estrutura do rolete possuía 1,6mm de diâmetro em seu eixo inicialmente, porém, por questões de dificuldade de produção de uma peça com medidas extremamente pequenas, alterações foram necessárias, o que acabou dificultando o planejamento da produção dos protótipos.

Figura 21 – Nova estrutura do rolete.



Fonte: Autor

A estrutura final dos roletes possui 2,0mm de diâmetro. Todas as medidas, em milímetros, dos roletes podem ser observadas no Apêndice A, incluindo a visão isométrica da peça.

4.7 TRANSMISSÃO DE POTÊNCIA DOS MODELOS

Apesar do que foi dito na seção 2.4, decidiu-se manter com o engrenamento interno, apesar de suas desvantagens em relação ao engrenamento externo. A decisão de não mudar foi decidida por alguns motivos, o primeiro foi início de usinagem de engrenagens nos laboratórios da faculdade, diferente do que foi dito que não seria possível anteriormente por falta de maquinário acessível, o segundo foi que o projeto das engrenagens não foi alterado, continuando com a relação de 3:1 e todas suas outras características, como módulo de 0.5, o que facilitou no desenvolvimento dos protótipos, o terceiro foi que a utilização de engrenagens internas ocupa menos espaço interno dos robôs, o que é útil considerando a limitação de espaço imposta pelas regras da liga *Small Size*.

A única alteração feita nas engrenagens foi realizada no entorno delas para que pudesse ser realizado a diminuição do diâmetro de 54mm para 44mm do terceiro protótipo. Para isso, foi realizado uma diminuição do espaço entre as engrenagens e a borda que entrará por interferência no corpo da roda.

5 CONCLUSÃO

O objetivo deste projeto foi o desenvolvimento de um novo sistema de rodas dos robôs da equipe RoboFEI da categoria *Small Size* com as melhores características para a realização de jogadas e dentro das regras da liga. Para isso, foram desenvolvidos 4 modelos diferentes entre si para analisar as melhores características, entre elas o tamanho da roda, número de roletes e camadas intercaladas. Na Figura 22, é possível verificar a comparação entre os modelos desenvolvidos e o modelo original utilizado anteriormente pela equipe RoboFEI em seus robôs.

Figura 22 – Comparação entre os 4 modelos desenvolvidos e o modelo original.

	Massa(g)	Qualidade usinagem	Torque(mNm)	Velocidade(m/s)	Consumo tensão/corrente	Alteração projeto original	Qualidade movimentação
Original	101	Boa	207,67	4,8443	Operação contínua	-	Média
1º Modelo	85	Boa	207,67	4,8443	Operação contínua	Fácil	Alta
2º Modelo	83	Média	207,67	4,8443	Operação contínua	Fácil	Alta
3º Modelo	66	Boa	207,67	3,9472	Operação contínua	Difícil	Alta
4º Modelo	127	Boa	207,67	4,8443	Operação contínua	Média	Alta

Fonte: Autor

O primeiro modelo foi uma adaptação do modelo utilizado anteriormente pela equipe, mas com mais roletes na estrutura. Este modelo apresentou boas características e deu boa movimentação para o robô em campo, sem apresentar escorregamento ou trepidação. O segundo modelo foi uma adaptação do primeiro modelo com um rolete a mais a fim de analisar a influência de um rolete a mais na estrutura. Dito isso, apesar das complicações causadas para montagem do segundo modelo por conta das tolerâncias dos roletes desenvolvidos, o segundo modelo apresentou uma melhor movimentação em campo se comparado ao primeiro modelo. Uma sugestão para trabalhos futuros seria estudar uma estrutura mais eficiente para adequar os roletes na estrutura.

Quanto ao terceiro modelo, apesar de suprir com as necessidades de torque e velocidade e ter boa movimentação em campo, a dificuldade de adaptação da estrutura de todos os robôs para adequar esse modelo seria uma complicação, por isso decidiu-se que esse modelo não será usado no momento, mas sua utilização numa próxima versão mecânica dos robôs não está descartada.

Quanto ao quarto modelo, apesar de apresentar boa movimentação em campo, o aumento de massa seria um problema para a equipe. Além disso, para adequar as duas camadas de roletes foi necessário aumentar a espessura das rodas, o que acabou infringindo a regra de que o robô precisa caber num círculo de 180mm. Por isso, a utilização desse modelo foi descartada atualmente, mas sua utilização numa próxima versão mecânica dos robôs que consiga adequar esse modelo não está descartada, visto que os testes em campo mostraram a qualidade do modelo.

Por isso, atualmente, para a equipe, o melhor modelo a ser utilizado é o segundo modelo, que apresenta 21 roletes e diâmetro de 54mm. A qualidade do modelo foi demonstrada com testes, viabilizando uma melhora na movimentação dos robôs em campo e projetando melhores jogadas realizadas em partidas durante campeonatos.

REFERÊNCIAS

- ALIHEIDARI, Nahal et al. Fracture resistance measurement of fused deposition modeling 3D printed polymers. **Polymer Testing**, Elsevier, v. 60, p. 94–101, 2017.
- ALVES, Vinícius Medeiros; TONIDANDEL, Flavio. PROJETO MECÂNICO PARA REESTRUTURAÇÃO DO ROBÔ SMALL SIZE, 2018.
- BERMAN, Barry. 3-D printing: The new industrial revolution. **Business horizons**, Elsevier, v. 55, n. 2, p. 155–162, 2012.
- BOS, Lukas et al. RoboTeam Twente Extended Team Description Paper 2020, 2020.
- BRESCIANI FILHO, Ettore. **Selecao de materiais metalicos**. [S.l.]: Unicamp, 1988.
- CARTER, Brian et al. Mechanical design and modeling of an omni-directional robocup player. In: CITESEER. ROBOCUP AI Conference. [S.l.: s.n.], 2001. v. 10.
- FERREIRA, Itamar. Tenacidade a fratura, em condições elasto-plasticas, das ligas de aluminio de alta resistencia do Tipo AL-6Zn-2Mg-xCu, 1987.
- GURZONI JR, José Angelo et al. RoboFEI Small Size League 2010 Team Description Paper, 2010.
- ITO, Masahide et al. RoboDragons 2019 Extended Team Description. In.
- KALMAN, Viktor. Controlled braking for omnidirectional wheels. **International Journal of Control Science and Engineering**, v. 3, n. 2, p. 48–57, 2013.
- KOLANI, Mohammad Reza et al. PARSIAN 2020 Extended Team Description Paper, 2020.
- KRUMMENAUER, Eduard Joseph; SILVA, Giovani Garcia da; QUEVEDO, Heleno. Tecnologia para produção de biocombustíveis: compressão de biogás, 2010.
- MACKWORTH, Alan K. On Seeing Robots, 1982.
- MAXON MOTORS. **Datasheet EC 45 flat, brushless, 50 watt**. [S.l.], jan. 2021.
- MUIR, Patrick F.; NEUMAN, Charles P. Kinematic modeling of wheeled mobile robots, 1987. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/rob.4620040209>>.
- OMMER, Nicolai; RYLL, Andre; GEIGER, Mark. Extended Team Description for RoboCup 2019. In.

POUDEH, Amin Ganjali et al. MRL Extended Team Description 2019. In.

ROBOCUP. **A Brief History of RoboCup**. Acesso em 27 fev. 2020 as 14:00. 2020.

Disponível em: <https://www.robocup.org/a_brief_history_of_robocup>.

ROCKCITYCYCLES. **WHAT'S THE DIFFERENCE BETWEEN O-RING and X-RING CHAINS?** Acesso em 5 jan. 2022 as 12:37. Jan. 2022. Disponível em:

<<https://www.rockcitycycles.com/whats-the-difference-between-o-ring-and-x-ring-chains/>>.

RULES, Small Size League. **Página das regras da SSL**. Acesso em 1 mar. 2020 as 20:00. Set. 2019. Disponível em: <<https://ssl.robocup.org/rules/>>.

RYLL, Andre; JUT, Sabolc. TIGERs Mannheim Extended Team Description for RoboCup 2020, 2020.

SÁ, Leticia Nicolino de. Modeling and Control of an Omnidirectional Vehicle, 2016.

SEARS, Francis Weston; ZEMANSKY, Mark W. **Física**. [S.l.]: Ao Livro Técnico, 1973.

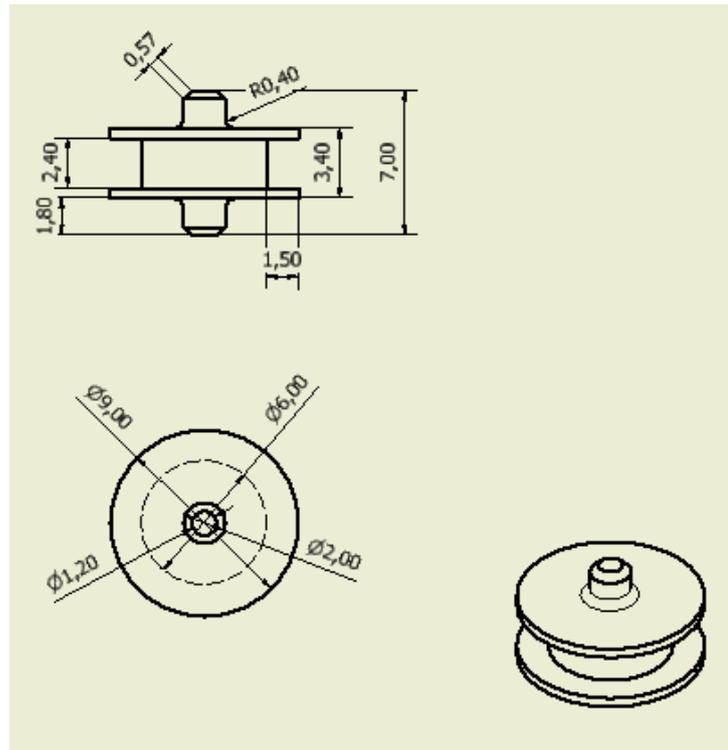
SINGH, Ashtosh Kumar et al. Optimization of internal spur gear design using genetic algorithm. **MIT International Journal of Mechanical Engineering**, v. 2, n. 1, p. 22–30, 2012.

WILLIAMS, Robert L et al. Dynamic model with slip for wheeled omnidirectional robots. **IEEE transactions on Robotics and Automation**, IEEE, v. 18, n. 3, p. 285–293, 2002.

YOSHIMOTO, Takamichi et al. Extended Team Discription Paper. In.

APÊNDICE A – DESENHO TÉCNICO DO ROLETE

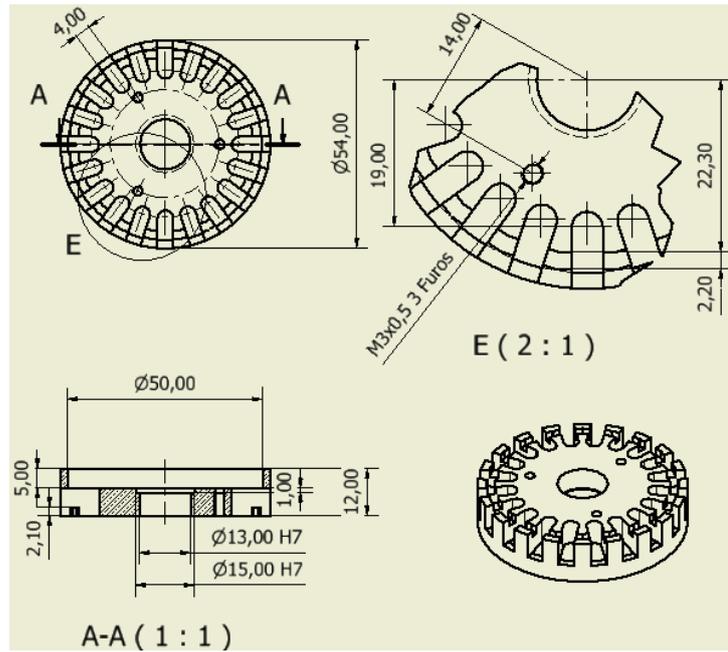
Figura A.1 – Desenho técnico do rolete desenvolvido.



Fonte: Autor

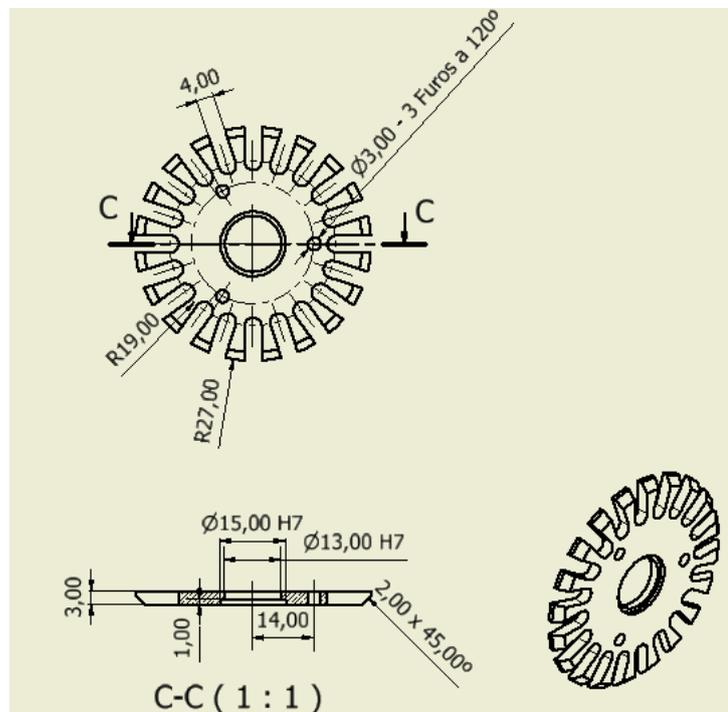
APÊNDICE B – DESENHOS TÉCNICOS DO PRIMEIRO MODELO DESENVOLVIDO

Figura B.1 – Desenho técnico do corpo do primeiro modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

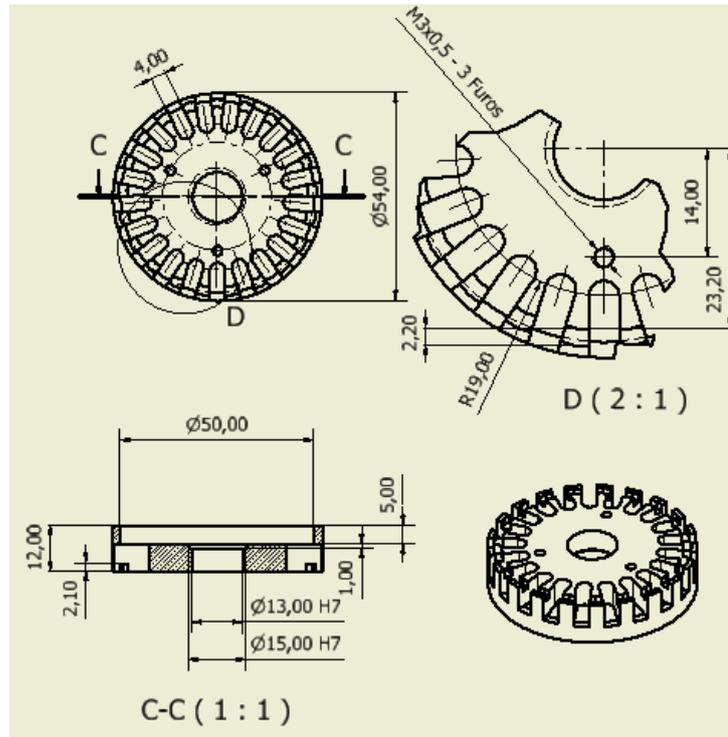
Figura B.2 – Desenho técnico da tampa do primeiro modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

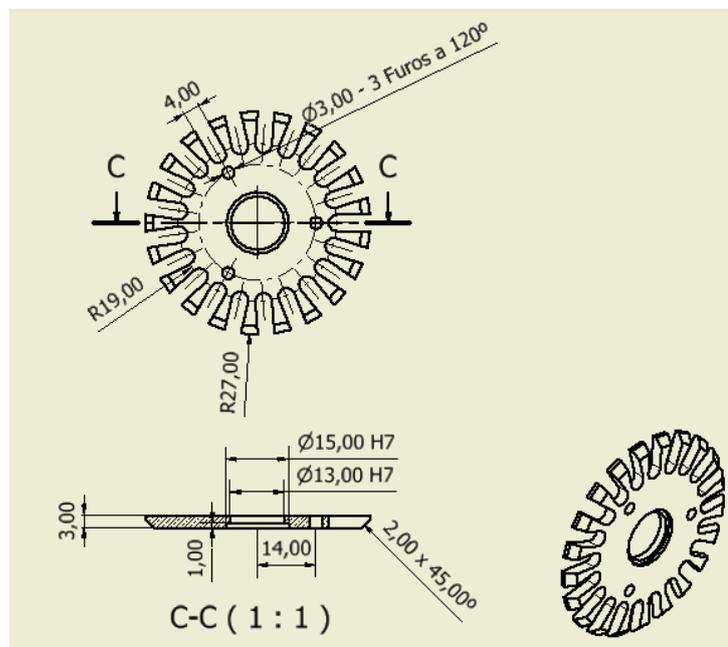
APÊNDICE C – DESENHOS TÉCNICOS DO SEGUNDO MODELO DESENVOLVIDO

Figura C.1 – Desenho técnico do corpo do segundo modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

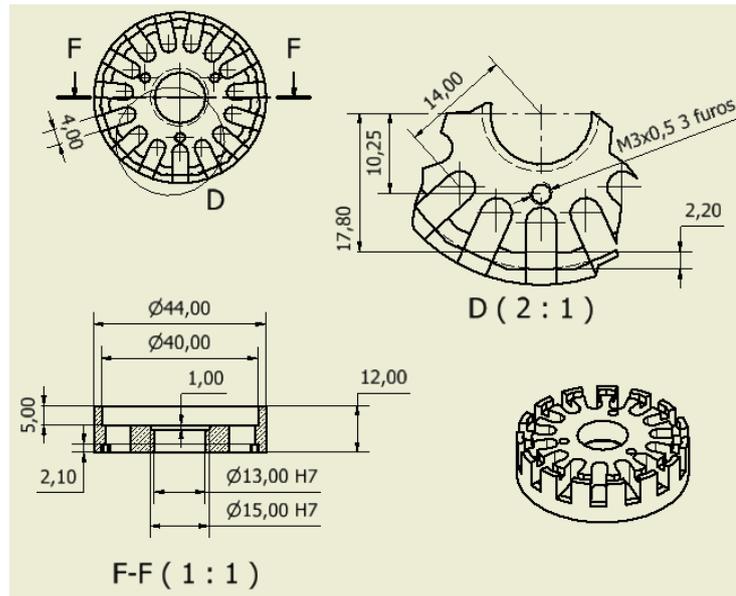
Figura C.2 – Desenho técnico da tampa do segundo modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

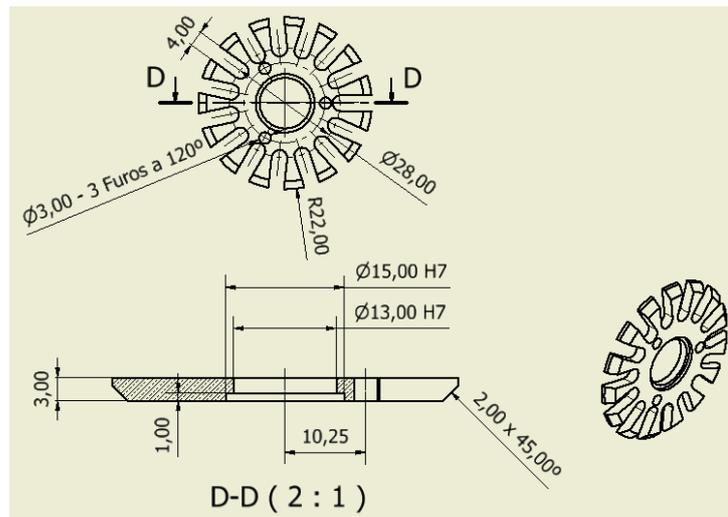
APÊNDICE D – DESENHOS TÉCNICOS DO TERCEIRO MODELO DESENVOLVIDO

Figura D.1 – Desenho técnico do corpo do terceiro modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

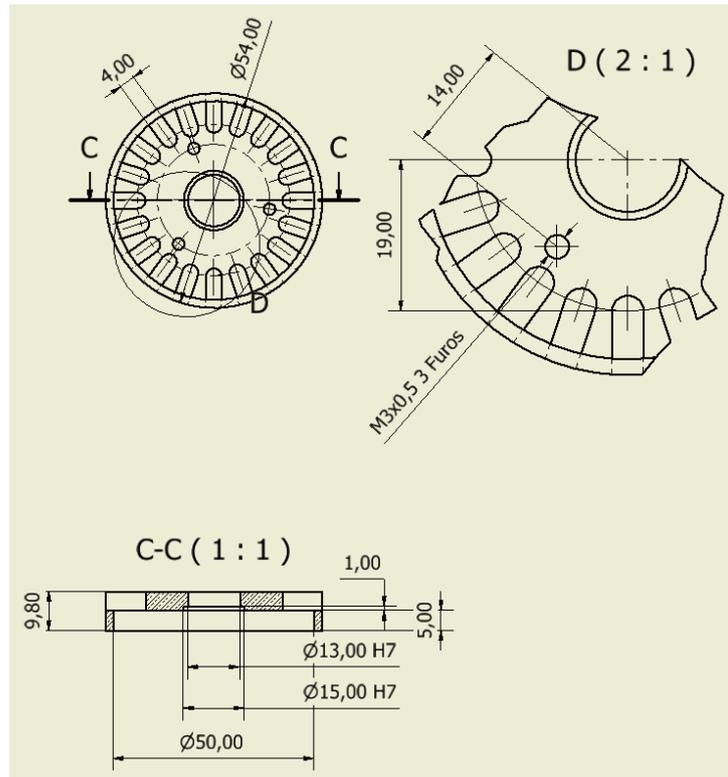
Figura D.2 – Desenho técnico da tampa do terceiro modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

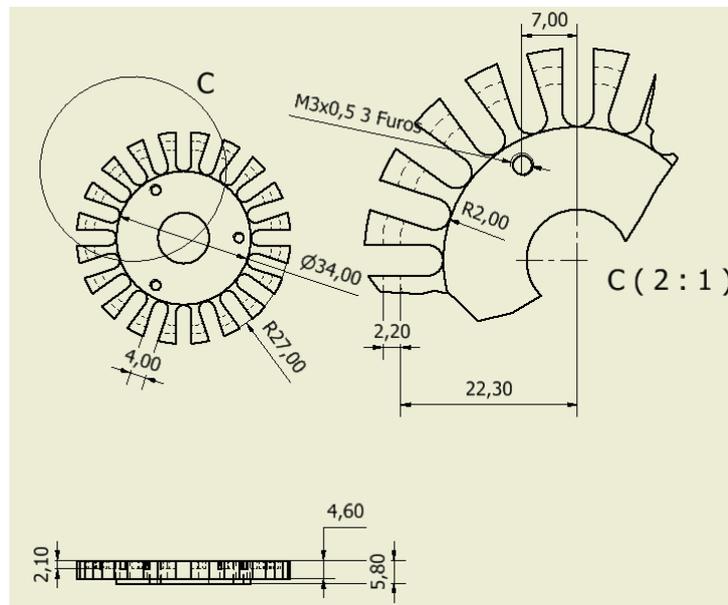
APÊNDICE E – DESENHOS TÉCNICOS DO QUARTO MODELO DESENVOLVIDO

Figura E.1 – Desenho técnico da base do quarto modelo desenvolvido.



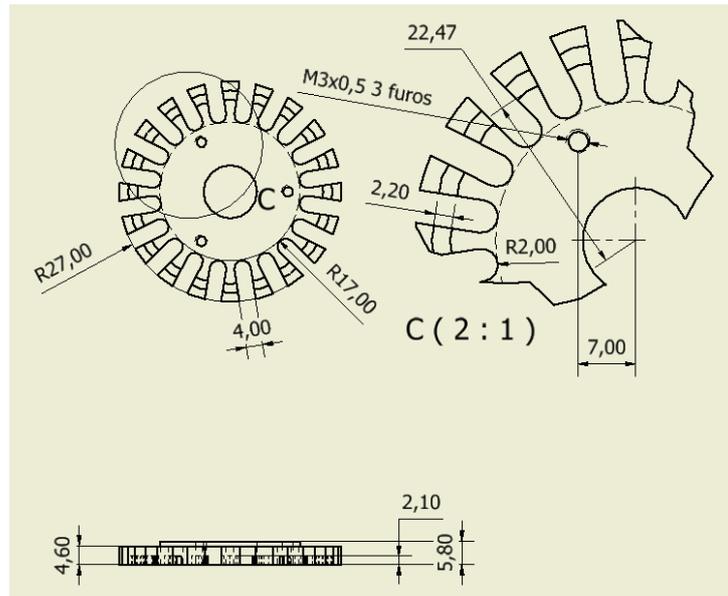
Fonte: Autor

Figura E.2 – Desenho técnico da primeira parte do corpo do quarto modelo desenvolvido.



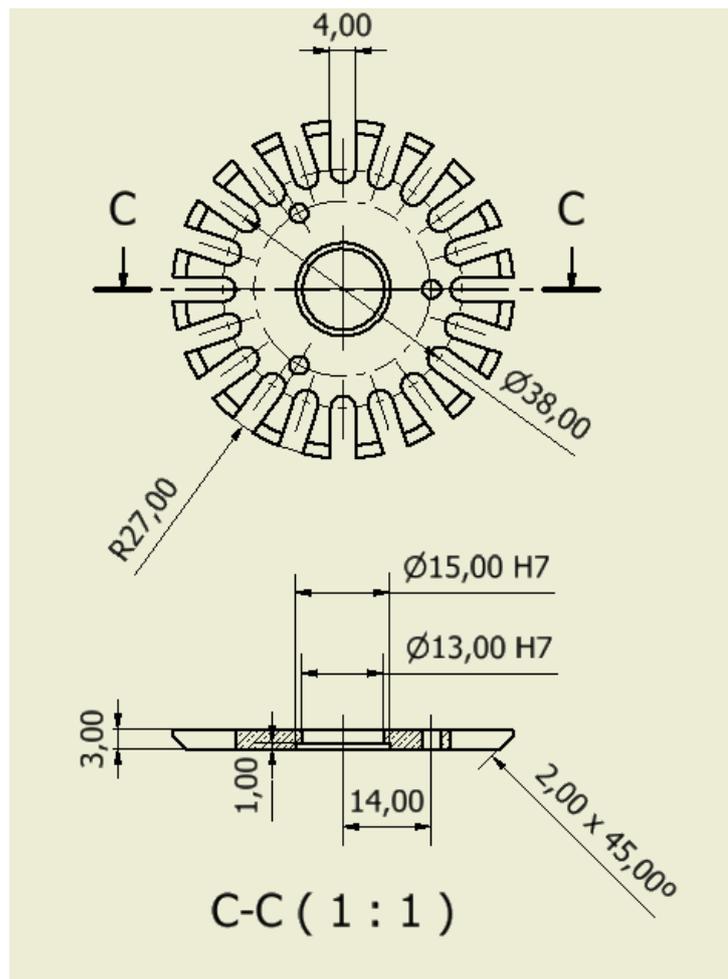
Fonte: Autor

Figura E.3 – Desenho técnico da segunda parte do corpo do quarto modelo desenvolvido.



Fonte: Autor

Figura E.4 – Desenho técnico da tampa do quarto modelo desenvolvido.



Fonte: Autor