



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO OESTE DA BAHIA
CENTRO MULTIDISCIPLINAR DE BOM JESUS DA LAPA
ENGENHARIA MECÂNICA**

MARIA NIVALDA PEREIRA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE CHUVA

BOM JESUS DA LAPA

2023

MARIA NIVALDA PEREIRA DE ALMEIDA

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE CHUVA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: PROF. ME. FILIPI MARQUES DE SOUZA.

BOM JESUS DA LAPA

2023

DESENVOLVIMENTO DE UM SIMULADOR DE CHUVA

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) apresentado ao Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa da Universidade Federal do Oeste da Bahia para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Bom Jesus da Lapa, 11 de julho de 2023

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou este projeto:

Prof. Me. Filipi Marques de Souza, Presidente
Universidade Federal do oeste da Bahia

Prof. Dr. Iug Lopes
Instituto Federal Baiano

Prof. Me. Iuri Benedito da Silva Santos

FICHA CATALOGRÁFICA

A447 Almeida, Maria Nivalda Pereira de
 Desenvolvimento de um simulador de chuva. / Maria Nivalda Pereira de
 Almeida. – 2023.

80f.: il.

Orientador: Prof. Me. Filipi Marques de Souza
TCC - Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do
Oeste da Bahia. Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa - BA,
2023.

1. Engenharia Mecânica. I. Souza, Filipi Marques de. II. Universidade
Federal do Oeste da Bahia – Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa -
BA. III. Título.

CDD 620.1

Biblioteca Universitária de Bom Jesus da Lapa – UFOB

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a Deus, pois sem ele não teria capacidade para desenvolvê-lo. E aos meus pais, os maiores amores da minha vida, a eles todas as minhas vitórias.

AGRADECIMENTOS

Ao prof. Me. Filipi Marques de Souza pela competência, dedicação e sabedoria para conduzir este processo. Obrigada por ser uma referência e inspiração de profissional para mim.

Ao Prof. Me. Rodrigo da Paixão Estrela pelo suporte durante toda a trajetória acadêmica. Ao prof. Dr. Iug Lopes do Instituto Federal Baiano pela parceria de projeto, incentivo e elevado conhecimento compartilhado neste trabalho.

À minha família, que independente da distância sempre fizeram presentes em minha vida. Ao Gabriel Thadeu por todo incentivo durante boa parte dessa caminhada, seu apoio foi determinante para o estímulo e desejo de continuar prosseguindo no caminho educacional.

À Universidade Federal do Oeste da Bahia por mudar a minha vida com o conhecimento. E ao colegiado de Engenharia Mecânica pelo ensinamento e conselho.

Tudo quanto te vier à mão para fazer, faze-o conforme as tuas forças, porque no além, para onde tu vais, não há obra, nem projetos, nem conhecimento, nem sabedoria alguma.

(Eclesiastes 9:10)

RESUMO

ALMEIDA.P; Maria Nivalda. **Desenvolvimento de um simulador de chuva**. 2023. Bahia: Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 06/07/2023.

O estudo da mecânica é amplo e diversificado, com aplicações em diversas subáreas, em especial na área de conhecimento sobre Mecanismos. Diante disso, este trabalho de conclusão de curso tem como um dos principais objetivos desenvolver um simulador de chuva utilizando um mecanismo com movimento variável. Esta proposta surgiu de uma demanda do Instituto Federal Baiano da cidade de Bom Jesus da Lapa que desenvolve estudos utilizando esse tipo de equipamento. A problemática encontrada foi o fato do simulador utilizado até então não apresentar uma distribuição uniforme dessa chuva, sendo mais intensa nas extremidades da área experimental utilizada. Isto pôde ser observado por meio de experimentos já desenvolvido no próprio campus. Devido a não uniformidade do equipamento atual, surgiu a necessidade de aperfeiçoar o já existente para obter um simulador de chuva com melhor distribuição. Assim, para solucionar este problema o presente trabalho teve como objetivo inicial adaptar o sistema existente e em seguida desenvolver um novo sistema com maior eficiência. Para isso, foi preciso alterar o tipo mecanismo anteriormente utilizado, que apresenta uma parada antes do fim do curso da barra motora, para um mecanismo de um par de Engrenagem de dentes retos. Por meio desse mecanismo pode-se solucionar o problema da má distribuição da lâmina da água da chuva na área experimental, que se aponta com uma maior uniformidade.

PALAVRAS-CHAVE: Simulador de chuva. Uniformidade. Engrenagem cilíndrica de dentes retos.

ABSTRACT

ALMEIDA.P; Maria Nivalda. Desenvolvimento de um simulador de chuva. 2023. Bahia: Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Oeste da Bahia, Bom Jesus da Lapa, 06/07/2023

The study of mechanics is wide and diversified, with applications in several subareas, especially in the area of knowledge about Mechanisms. Therefore, this course conclusion work has as one of the main objectives to develop a rain simulator using a mechanism with variable movement. This proposal arose from a request from the Instituto Federal Baiano in the city of Bom Jesus da Lapa, which develops studies using this type of equipment. The problem encountered was the fact that the simulator used so far did not present a uniform distribution of this rain, being more intense at the ends of the experimental area used. This could be observed through experiments already developed on the campus itself. Due to the non-uniformity of the current equipment, the need arose to improve the existing one to obtain a rain simulator with better distribution. Thus, to solve this problem, the present work had as its initial objective to adapt the existing system and then to develop a new system with greater efficiency. For this, it was necessary to change the type of mechanism previously used, which has a stop before the end of the travel of the motor bar, to a mechanism with a pair of spur gears. Through this mechanism, the problem of poor distribution of rainwater in the experimental area can be solved, which points to greater uniformity.

KEYWORDS: Rain simulator. Uniformity. Cylindrical gear with straight teeth.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 -Variação dos dados mensais meteorológicos de precipitação de (BJL).	19
Figura 2 - Conceito de simulador de chuva com disco perfurado rotacional.	23
Figura 3 - Vista de simulador de chuvas.	24
Figura 4 - Coletores de chuva e recipientes para ensaio de perda por “Splash”	24
Figura 5 - Conceito do simulador de chuva de laboratório.	25
Figura 6 - Parcelas experimentais constituída de material metálico com Neossolo.	26
Figura 7 - Vista parcial do sistema de teste de chuva simulada.	26
Figura 8 - Jato cone cheio (A) e jato leque (B).	28
Figura 9 - Sc montado para o teste de uniformidade do bocal do aspensor	27
Figura 10 - Inversão do mecanismo biela – manivela	29
Figura 11 - Diagrama cinemático da inversão do mecanismo biela - manivela	29
Figura 12 - Simulador de Chuva e sistema de coleta de fluxo Terrestre	30
Figura 13 - Algumas configurações de mecanismos de engrenagem	31
Figura 14 - Tipos de movimento que podem existir em um mecanismo.	31
Figura 15 - (a) Mecanismo de quatro barras; (b) Mecanismo came - seguidor	32
Figura 16 - Quadrilátero articulado: Movimento plano de rotação e oscilante.	33
Figura 17 - Par de engrenagens de dentes retos envoltetais.	34
Figura 18 - Infográfico sobre as principais etapas dos materiais e métodos	35
Figura 19 - Matriz casa de qualidade do SC de laboratório e de campo.	36
Figura 20 - Funções elementares definidas através da matriz morfológica	37
Figura 21 - Matriz morfológica	38
Figura 22 - Esboço da engrenagem menor e maior motora	45
Figura 23 - Esboço da engrenagem maior movida	45
Figura 24 - Esboço do simulador de chuva de laboratório	46
Figura 25 - Esboço do simulador de chuva de campo	46
Figura 26 - Linguagem técnica da engrenagem menor motora	47
Figura 27 - Linguagem técnica da engrenagem maior motora	47
Figura 28 - Linguagem técnica da engrenagem maior movida	48
Figura 29 - Linguagem dosimulador de chuva de laboratório	48
Figura 30 - Linguagem dosimulador de chuva de campo	49
Figura 31 - Protótipo 3D da engrenagem motora menor	50

Figura 32 - Protótipo 3D da engrenagem motora maior	50
Figura 33 - Protótipo 3D da engrenagem movida maior	51
Figura 34 - Protótipo 3D do sc de laboratório, vista frontal e lateral	52
Figura 35 - Protótipo 3D do simulador de chuva de laboratório, isométrica	52
Figura 36 - Protótipo 3D do simulador de chuva de campo, vista frontal e lateral	53
Figura 37 - Protótipo 3D do simulador de chuva de laboratório, isométrica	53
Figura 38 - Montagem do mecanismo do simulador de laboratório	54
Figura 39 - Etapas de montagem do mecanismo do sc de laboratório	54
Figura 40 - Montagem do mecanismo do simulador de campo	55
Figura 41 - Etapas de montagem do mecanismo do simulador de chuva de campo	55
Figura 42 - Impressão dos mecanismos pela impressora 3D	56
Figura 43 - Estatística de impressão	57
Figura 44 - Impressora 3D	58
Figura 45 - ABS	58
Figura 46 - Tubos quadrados de metalon	59
Figura 47 - Ferramentas utilizadas na primeira etapa de fabricação	60
Figura 48 - Segunda etapa do processo usando o método de soldagem	61
Figura 49 - Terceira etapa do processo de usinagem	61
Figura 50 - Estrutura do simulador de chuva de laboratório	62
Figura 51 - Equipamentos utilizados na ultima etapa de fabricação	63
Figura 52 - Desmontagem da estrutura superior	64
Figura 53 - Lixagem ou polimento	64
Figura 54 - Processo de pintura	65
Figura 55 - Processo de secagem	65
Figura 56 - Estrutura	66
Figura 57 - Teste de uniformidade de Christianse	67
Figura 58 - Concentração da água na área de ensaio na primeira repetição	70
Figura 59 - Concentração da água na área de ensaio na segunda repetição	70
Figura 60 - Concentração da água na área de ensaio na primeira repetição do sc atual	72
Figura 61 - Concentração da água na área de ensaio na segunda repetição do sc atual	72
Figura 62 - Diagrama de Gantt	73

LISTA DE TABELA

Tabela 1	Dados analíticos da engrenagem menor motora	44
Tabela 2	Dados analíticos da engrenagem maior motora	44
Tabela 3	Dados analíticos da engrenagem maior movida	44
Tabela 4	Dados analíticos das engrenagem engrenagens	44
Tabela 5	Materiais de fabricação do mecanismo	58
Tabela 6	Equipamentos utilizados na etapa de fabricação	62
Tabela 7	Equipamentos utilizados na montagem	66
Tabela 8	Classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen.	68
Tabela 9	Uniformidade de distribuição na primeira repetição	69
Tabela 10	Uniformidade de distribuição na segunda repetição	69
Tabela 11	Uniformidade de distribuição na primeira repetição do sc atual	71
Tabela 12	Uniformidade de distribuição na segunda repetição do sc atual	71

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1	.....	39
Equação 2	.....	40
Equação 3	.....	40
Equação 4	.....	40
Equação 5	.....	41
Equação 6	.....	41
Equação 7	.....	41
Equação 8	.....	41
Equação 9	.....	42
Equação 10	.....	42
Equação 11	.....	42
Equação 12	.....	42
Equação 13	.....	42
Equação 14	.....	43
Equação 15	.....	43

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Abreviaturas

p.	Página
Fig	Figura

Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BJL	Bom Jesus da Lapa
CUC	Coeficiente de uniformidade de Christiansen
UD	Coeficiente de uniformidade de distribuição
ETR	Estimativas da evapotranspiração real
ETP	Evapotranspiração de referência
SC	Simulador de Chuva
UD	Uniformidade de distribuição

LISTA DE SÍMBOLOS

a	Adendo	[mm]
α	Alfa	[°]
H	Altura	[mm]
b	Dedendo	[mm]
CUC	Coeficiente de uniformidade de Christiansen	[%]
CUD	Coeficiente de uniformidade de distribuição	[%]
D_{EM}	Diâmetro externo da engrenagem maior	[mm]
D_{Em}	Diâmetro externo da engrenagem menor	[mm]
D_{IM}	Diâmetro interno da engrenagem maior	[mm]
D_{Im}	Diâmetro interno da engrenagem menor	[mm]
Dp_M	Diâmetro primitivo da engrenagem maior	[mm]
Dp_m	Diâmetro primitivo da engrenagem menor	[mm]
f	Folga	[mm]
M	Módulo	
n	Número de gotejadores analisados	
N_M	Número de dentes da engrenagem maior	[dentes]
N_m	Número de dentes da engrenagem menor	[dentes]
$\bar{Q}$	Média das vazões coletadas de todos os gotejadores	[L h ⁻¹]
l	Percurso percorrido	[mm]
π	Pi	
R	Raio da engrenagem maior	[mm]
r	Raio da engrenagem menor	[mm]
i	Relação de transmissão	
θ	Teta	[°]
UD	Uniformidade de distribuição	[%]
Q	Vazão coletada em cada gotejador	[L h ⁻¹]

SUMÁRIO

CDD 620.1	24
1. INTRODUÇÃO	15
1.1. Justificativa.....	16
1.2 OBJETIVOS.....	16
1.2.1 Objetivo geral.....	16
1.2.2 Objetivos específicos	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	18
2.1 Escoamento superficial e umidade do solo	18
2.1.2 Erosão hídrica.....	20
2.1.3 Simuladores de chuvas.....	21
2.1.4 Simuladores de laboratório	22
2.1.5 Simuladores de campo	26
2.1.6 Aspersão.....	27
2.1.7 Gotejamento	29
2.1.8 Mecanismos	30
2.1.9 Engrenagem cilíndrica de dentes retos.....	33
3. MATERIAIS E MÉTODO.....	35
3.1 Definição do mecanismo	38
3.2 Dimensionamento do sistema	39
3.2.1 Linguagem analítica	39
3.2.2 Esboço.....	44
3.2.3 Linguagem técnica	47
3.3 Fabricação e construção	56
3.3.1 Impressora 3D	56
3.3.2 Estrutura: fabricação e construção	59
3.3.3 Montagem	66
3. 4 Teste de eficiência.....	67
4. RESULTADO E DISCURSSÃO	69
4.1 Uniformidade da distribuição de chuva.....	69
5. CRONOGRAMA	73
6. CONCLUSÃO	74
REFERÊNCIAS	75

1. INTRODUÇÃO

Uma das maiores problemáticas ambientais existente tem sido a erosão do solo, e no Nordeste do Brasil, isso não seria diferente, principalmente na região semiárida. Essa região mesmo não possuindo um período de chuvas regulares ao longo do ano, sofre com ocorrência de eventos extremos de chuva (SANTOS et al., 2010). A irregularidade pluviométrica desta região, além de apresentar má distribuição espacial, apresenta também uma péssima distribuição temporal, influenciando diretamente no escoamento superficial e na produção de sedimentos (SANTOS et al., 2006). Assim, a intensidade da chuva de forma irregular, a frequência, a fragilidade dos solos e a sua declividade, são condicionantes para o processo de erosão.

A erosão é um processo físico que consiste na degradação, transporte do solo, pela água ou pelo vento. A forma de erosão produzida pela ação da água consiste em uma das formas mais prejudiciais de degradação do solo, uma vez que reduz a capacidade produtiva (BEZERRA; CANTALICE, 2006). Esta forma de erosão consiste em três momentos, iniciando com o processo de desagregação, transporte e a deposição de partículas de solo pela ação das gotas de chuva e pelo escoamento superficial (ELLISON, 1947). As características das chuvas intensas que mais interferem no processo de erosão do solo são a intensidade, a duração e a frequência da precipitação e a sua erosividade.

Diante da problemática existente, surgiram necessidades em realizarem estudos utilizando equipamentos denominados de simuladores de chuvas, que aplicam a água por aspersão, com a possibilidade de controlar a intensidade da precipitação, o tamanho e a velocidade de impacto das gotas sobre a parcela do solo em estudo (MONTEBELLER, 2001). Esse equipamento tem sido muito utilizado, pois ele tem total controle sobre as características da chuva. Ainda que se note um aumento no número de autores que tem estudado e desenvolvido os mais variados tipos de simuladores de chuva, percebe-se uma escassez de trabalhos voltados ao projeto cinemático do mecanismo.

Na cidade de Bom Jesus da Lapa, na região centro oeste da Bahia, tem desenvolvido estudos sobre um tipo de simulador de chuva capaz de simular a chuva natural. Experimentos realizados com este simulador apresentam uma distribuição de volume de água de chuva não-uniforme, o que demanda a necessidade do projeto de um novo simulador.

Assim, o presente trabalho tem como objetivo inicial criar um novo projeto e em seguida desenvolver um novo sistema com maior eficiência no que diz respeito a uniformidade do

volume da água de chuva. Para isso, é preciso alterar o mecanismo utilizado atualmente que consiste em um sistema articulado, para um par de engrenagens de dentes retos. Por meio desse mecanismo, acredita ser possível solucionar o problema da distribuição irregular do volume de água da chuva na região experimental, trazendo assim, maior precisão nos resultados das pesquisas agrícolas, que dependam dessa variável.

A relevância dos resultados obtidos por este trabalho pode ser associada à multidisciplinaridade entre a Engenharia Mecânica e a Engenharia Agrícola, fomentando o setor Agroindustrial, responsável por uma fatia relevante do PIB Nacional, além do desenvolvimento de literatura aplicada.

1.1. Justificativa

De um modo geral, a importância de desenvolvimentos de simuladores de chuva constituído de um mecanismo que permita a variação de altura e deslocamento do bico aspersor em toda área experimental, contribui para um resultado excelente da uniformidade de distribuição da água, que de modo geral traz uma redução significativo no valor econômico, principalmente para culturas de alto valor econômico. Um sistema de irrigação por aspersão com alta uniformidade de distribuição gera economia para o país e o setor agrícola.

Diante disso, este trabalho de conclusão de curso é extremamente importante, pois desenvolve simuladores de chuva constituído de um par de engrenagens cilíndricas de dentes retos, associando a multidisciplinaridade da Engenharia mecânica e a Engenharia Agrícola. Além de contribuir para o desenvolvimento do PIB, gera economia e eficiência para a sociedade na produção de vegetais.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Projetar um simulador de chuva de modo a obter uma distribuição homogênea do volume de água na área experimental.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar erros de projeto responsáveis pelo desempenho insatisfatório do simulador de chuva já existente.
- Realizar a síntese de um novo mecanismo

- Analisar a eficiência de Christiansen no novo mecanismo.
- Construir o simulador.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Nesta seção será realizada uma breve apresentação da fundamentação teórica dos conceitos associados à proposta deste trabalho. Primeiramente serão apresentados os principais problemas hídricos para a agricultura. Em seguida, aponta-se uma contextualização sobre simuladores de chuvas (SC) utilizados no setor agrícola seja eles de campo ou laboratório. Por fim, enfatiza-se os assuntos gerais sobre mecanismos, e os mais diversos tipos aplicados em simuladores de chuva.

2.1 Escoamento superficial e umidade do solo

Segundo Aragão (2000), quando a água proveniente da precipitação das chuvas atinge a superfície, percorre vários caminhos até encontrar os rios, canais e reservatórios. O movimento da água sobre a superfície do solo é conhecido como escoamento superficial. O escoamento é influenciado pelas características da precipitação (intensidade e duração), pelas características do solo (textura, capacidade de infiltração e umidade) e pelo tipo de cobertura vegetal. Quanto maior for a capacidade de infiltração do solo, menor será a parcela da precipitação que irá escoar.

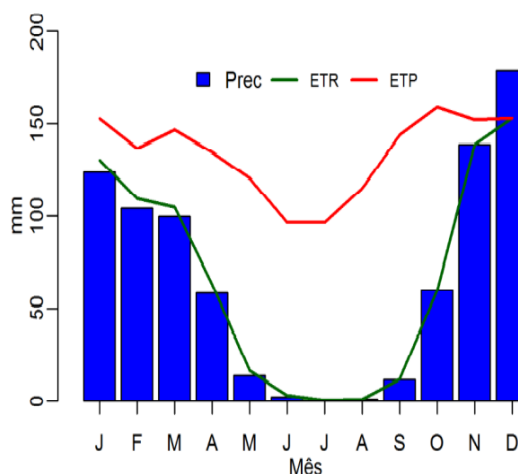
À medida que a água infiltra pela superfície, as camadas superiores do solo vão se umedecendo de cima para baixo, alterando gradativamente o perfil de umidade. Enquanto há entrada de água, o perfil de umidade tende à saturação em toda a profundidade. Normalmente as precipitações naturais não são capazes de saturar todo perfil, saturando em geral apenas as camadas próximas à superfície, formando um perfil típico onde a umidade do solo diminui com a profundidade (SANTOS, 1994).

Segundo Figueiredo (1988), existem dois tipos de mecanismos geradores de escoamento: a) fluxo superficial devido ao excesso de precipitação; b) fluxo superficial devido ao excesso de saturação.

Neste trabalho, abordar-se-á apenas o primeiro caso que segundo Aragão (2000) ocorre normalmente em regiões áridas e semiáridas. Diante disso, nota-se que o município de Bom Jesus da Lapa apresenta características semiáridas, com excesso de deficiência hídrica anual, onde a temperatura média anual foi de 26,37 °C e a precipitação média anual é de 792,66 mm. Os meses de janeiro a novembro compreendem o período de deficiência hídrica, enquanto que dezembro é representado por reposição hídrica (Costa et al. ,2019), caracterizado por períodos de chuvas com eventos extremos.

De acordo com Duarte et al (2015) e Sena et al. (2017), esses extremos consistem em ocorrências climatológicas fora do padrão de análise, com grandes períodos de estiagem, alta frequência de secas, altas frequências de chuvas extremas dentre outros. Devido aos extensos períodos de chuvas, em Bom Jesus da Lapa (BJL), há períodos em que as precipitações das chuvas ocorrem com grande intensidade, gerando escoamentos superficial, como é possível verificar na Figura 1. Nela é apresentada a variação dos dados mensais meteorológicos de precipitação e estimativas da evapotranspiração real e evapotranspiração de referência, em milímetros, para cada mês, no município de Bom Jesus da Lapa – BA, entre 1970 a 2018.

Figura 1 - Variação dos dados mensais meteorológicos de precipitação do município de Bom Jesus da Lapa - BA.



Fonte: Costa et al. 2019.

Em contrapartida, os períodos de escassez hídrica trazem problemas ao setor agrícola. Costa et al. (2019), relata que o município de Bom Jesus da Lapa apresenta deficiência hídrica em 11 meses do ano, valor esse que representa uma deficiência de 814,09 mm, mais que o dobro da precipitação média anual da região. Isso faz com que haja grandes problemas em culturas manejadas sem irrigação na região. Neste contexto, a instalação do Perímetro Irrigado Formoso, uma região onde a agricultura é irrigada através do Rio São Francisco, tem contribuído significativamente, sendo que o setor de fruticultura irrigada representa 88% de toda área plantada e tem como principais culturas a banana (85%), seguida do mamão, melancia e coco (CODEVASF, 2014).

Devido BJJL possuir um setor de fruticultura bem consolidado, além da instalação do perímetro irrigado formoso, a aplicação de um simulador de chuva é ideal para os períodos em que ocorre grandes precipitações, já que a região semiárida, possui períodos longos de secas e

períodos de chuvas intensas. Assim, simulariam, a intensidade, e duração das mesmas, sendo possível propor soluções para evitar danos como a erosão hídrica e perdas no setor agrícola.

2.1.2 Erosão hídrica

O processo erosivo é definido como as etapas de desprendimento e arraste das partículas do solo, ocasionada pela ação direta da água e do vento, representando a principal causa de degradação das terras cultivadas (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990).

O processo de erosão hídrica do solo é resultante de uma sequência de três fases sucessivas e concomitantes: a desagregação do solo na superfície, o transporte dos sedimentos desagregados e por fim, a deposição do material transportando nas partes mais baixas do relevo ou dos cursos d'água (POSSAMAI, EDIVAN JOSÉ et al., 2022).

Além dos resultados sequenciais deste processo, temos os fatores que influenciam a erosão hídrica, que são:

- Os fatores climáticos, pois, para Bastos (1999) a chuva, radiação solar e ventos são variáveis que influenciam na erosão do solo. A chuva é, sem dúvida, o que mais provoca diretamente a erosão pelo impacto das gotas sobre a superfície e determina o fluxo concentrado das águas de escoamento superficial. Sua ação erosiva, chamada de erosividade, depende da distribuição pluviométrica (tempo e intensidade de chuva).
- A vegetação, que segundo Bellinaso et al (2019), tem efeitos na interceptação da chuva e no decréscimo da velocidade do escoamento superficial. Mudanças no regime de escoamento superficial e subterrâneo são observados como consequência do desmatamento e alteração nas formas de uso do solo. Por outro lado, as raízes afetam propriedades do solo aumentando a sua resistência à erosão. O plantio de espécie ajuda na diminuição da erosão.
- Os fatores topográficos, dos quais a declividade e o comprimento da rampa influenciam particularmente no escoamento superficial: terrenos com maiores declividade e comprimento de rampa apresentam maiores velocidades de escoamento superficial e, consequentemente, maior capacidade erosiva (SPOHR et. al., 2009).
- O fator solo, uma vez que independente do clima, declividade e vegetação, há tipos de solo que são mais propensos à erosão. Fatores como granulometria do solo, porosidade, resistência das partículas ao impacto, entre outros, influencia diretamente no processo erosivo. A taxa de erosividade dos solos é a que mede de forma quantitativa o quanto o

solo pode ser mais ou menos erodido nas mesmas condições de clima, declividade e densidade da cobertura vegetal (CASSOL; LIMA, 2003).

Avaliando a erosão hídrica na perspectiva de uma região semiárida, trata-se de uma região brasileira caracterizada por baixos índices pluviométricos, e em consequência a isso, a hidrografia é debilitada, não apresentando estabilidade para sustentar rios torrenciais em períodos de seca. Um exemplo de rio que permanece perene ao longo da estiagem é o Rio São Francisco (SILVA et al., 2021).

Após abordar-se-á sobre os fatores que influenciam a erosão hídrica, Lima (2018) aborda o quanto o semiárido brasileiro por apresentar deficiências climáticas, dispõe de maior precipitação pluviométrica. As precipitações elevadas, contribuem para a remoção do solo, que é um problema crítico, e assim, gera a erosão que não pode ser revertida, sendo por isso considerada como causa muito relevante da degradação dos solos (BARBOSA NETO et al., 2017).

No semiárido é comum encontrar situações de solo, vegetação e água enfraquecidos. O pisoteio dos animais faz com que o processo de compactação da superfície do solo seja ainda mais agravado, há quebra ou mesmo destruição da cobertura vegetal nativa e até mesmo a serapilheira é extenuada. Com o solo desprotegido e a chegada das chuvas fortes, ocorre a evaporação da água que não infiltra, ocorrendo também o escoamento para áreas mais baixas ocasionando assoreamento dos mananciais (PORTO et al., 2019).

Na próxima seção serão abordados os simuladores de chuvas criados para estudar e buscar soluções que amenizem todos estes impactos.

2.1.3 Simuladores de chuvas

Na agricultura, a água atua em todos os processos fisiológicos, bioquímicos e também na regulação térmica das culturas. O excesso de água na forma de chuva gera perdas da produção agrícola, principalmente pelos efeitos da erosão hídrica, pelo escoamento superficial e pela remoção de produtos fitossanitários após a sua aplicação. Neste sentido são utilizados os simuladores de chuva para realizar experimentos agrícolas simulando as características da chuva natural em um ambiente controlado, (SANTOS et al., 2017).

Os simuladores de chuva são ferramentas de pesquisa desenvolvidas para aplicar água de forma similar às chuvas naturais (Silva et al., 2015c). Os simuladores de chuva têm sido projetados e calibrados para produzir chuvas artificiais, que apresentem as características, entre elas gotas com diâmetros médios similares aos das chuvas, dotadas com a mesma energia

cinética que promovam uma distribuição uniforme da precipitação sobre a parcela experimental em estudo.

Os simuladores de chuva foram desenvolvidos na década de 1930, quando Borst e WoodBurn construíram um simulador de chuva para estudos do comportamento do escoamento superficial da água. Depois disso, um grande número de simuladores de chuva foi desenvolvido para controlar e reproduzir as características de uma chuva natural (SANTOS, 2015).

A aplicação do simulador de chuva no ambiente agrícola tem crescido cada vez mais, sendo empregado em diversos estudos que avaliam impactos de práticas conservacionistas no Semiárido Brasileiro (MONTENEGRO et al. 2020).

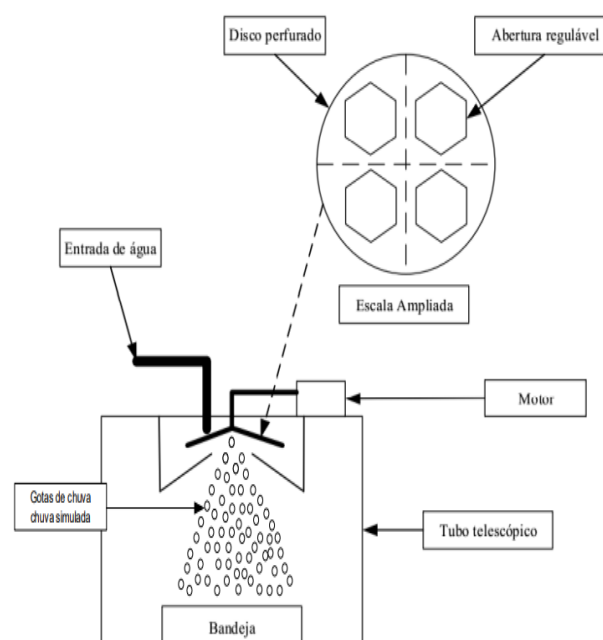
Quando se trata de vantagem no uso do simulador de chuva estão associadas aos estudos sobre retenção de água, erosão do solo, à sua praticidade e economia, além de permitir a simulação e replicação de chuva de diferentes intensidades, sob solos com características diversas, sem que seja necessário esperar para que tais eventos chuvosos naturais aconteçam (ISIDORO; SILVEIRA; LIMA, 2022; CONFESSOR; RODRIGUES, 2018).

Após definir, compreender a sua aplicação e vantagem é importante enfatizar que existem dois tipos de simuladores, de laboratório e o de campo que são melhor exemplificados na subseção a seguir.

2.1.4 Simuladores de laboratório

Nesta seção, serão apresentados os alguns tipos de simuladores de laboratório existentes. Um destes exemplos são os abordados por Santos et al. (2017), que sistematiza o conhecimento do processo de quantificação de pontas aspersoras para a geração de chuva simulada. As análises experimentais foram realizadas em laboratórios, o qual utilizou três modelos de pontas aspersoras, variando a altura e pressão para analisar o coeficiente de uniformidade da área molhada de 1 m^2 e $0,36\text{ m}^2$. Utilizando um hidrômetro foi determinado o tamanho da gota, intensidade, velocidade de queda e energia cinética das diferentes chuvas simuladas geradas. Na Figura 2 é apresentado o conceito de um simulador de chuva desenvolvido por Pall et al. (1983), que utiliza ponta aspersora modelo 1.5H30 e 1HH12 produzido pela Spraying Systems ®. Os dígitos após o “H” indicam a vazão de água em galões por *minuto*², respectivamente 30 e 12, a uma pressão de 48kPa. O conceito representa um disco com aberturas. Este mecanismo permite, por meio de sua rotação, controlar a intensidade de chuva simulada

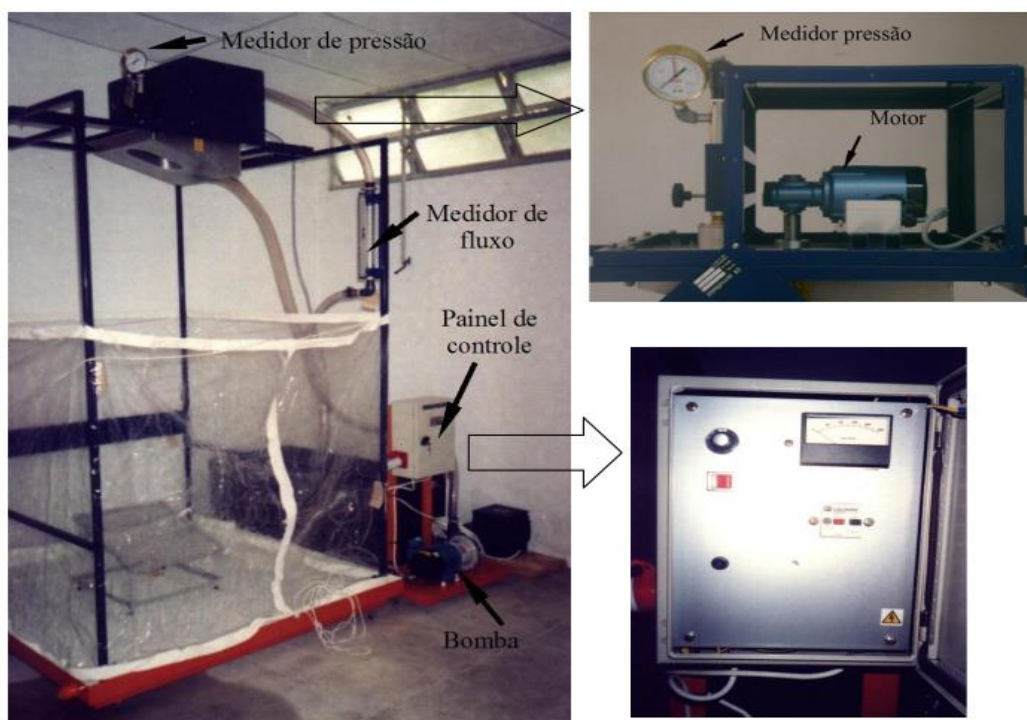
Figura 2 – Conceito de simulador de chuva com disco perfurado rotacional.



Fonte: Adaptado de Pall et al., (1983).

Faul et al. (2004), aborda um simulador de chuva de disco giratório modelo FEL 3, fabricado pela Armfield, e está representado na Figura 3. Este equipamento pode ser utilizado tanto em laboratório, quanto em campo para estudos de infiltração, perda de solo, influência de coberturas. O equipamento é composto por uma câmara pulverizadora suportada por uma estrutura metálica e por um módulo de serviço que compreende reservatório de água, painel de controle e bomba. A câmara pulverizadora é composta por um disco giratório acionado por um motor, um sistema de aspersão (bocal) e, um medidor de pressão.

A Figura 4 apresenta vários acessórios que constituem parte integrante do equipamento: mesa com ajuste angular, coletores de chuva, recipientes para amostras, caixas de 150 mm² (que permitem a realização do ensaio de perda por lavagem), acessórios para realização de ensaio em campo e dois tipos diferentes de bocais (elemento modificador de tipo de chuva). O equipamento funciona através do bombeamento de água do reservatório até o medidor de fluxo, o qual permite ajustar a vazão desejada. Em seguida, a água é encaminhada para o sistema de aspersão (bocal) que possui uma derivação para conhecimento da pressão da água que chega no bocal via um manômetro de Bourbon. O jato de água é interceptado pelo disco giratório, cuja abertura varia de 5° a 40°, com incrementos de 5°, permitindo obter uma variação na intensidade das precipitações induzidas. A água interceptada, que não passa pelas placas do disco, retorna para o reservatório.

Figura 3 – Vista de simulador de chuvas

Fonte: Faul et al., (2004).

Figura 4 – Coletores de chuva e recipientes para ensaio de perda por “Splash”

Fonte: Faul et al., (2004).

Dentre os diversos conceitos de simuladores de chuva, Souza e Siqueira (2011) desenvolveram um simulador de chuva representado na Figura 5 para realizar estudos sobre o comportamento da hidrologia em regiões urbanas. O projeto desenvolvido é composto por dois aspersores do tipo Fullet $1/2$ SSHH40 (detalhe “i”), sendo que os aspersores atuam com um movimento oscilatório, permitindo obter uma maior área molhada da chuva simulada gerada. O detalhe “ii” indica as calhas que são utilizadas com o objetivo de delimitar a área molhada

máxima para coletar o excesso de água aplicada tendo seu retorno ao reservatório. Foram realizados testes com pressões de trabalho de 50,80, 110, 140 e 170 kPa.

Figura 5 – Conceito do simulador de chuva de laboratório



Fonte: Souza e Siqueira (2011).

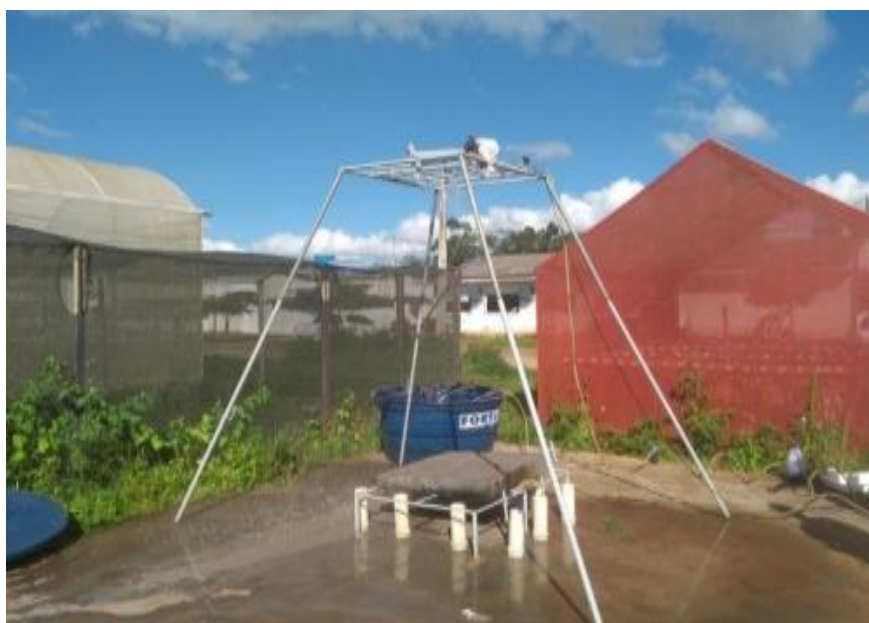
Fonseca et al., (2019), realizaram um teste de chuvas aplicados em um simulador de chuva, construído de acordo as especificações por Meyer e Harmon (1979), equipado com um bico aspersor tipo Veejet 80-150 com diâmetro de interno de 12,7 mm. O equipamento reproduz uma distribuição de dimensões de gotas e níveis de energia cinética próximas às das chuvas naturais, que é de 0,294 MJ ha⁻¹ mm⁻¹ e de 17,64 MJ há⁻¹ para os 40 minutos de testes. A aplicação das palhas sobre as taxas de desagregação do solo, para doses de 0,20 e 0,30 kg m⁻² de palha de capim e para três localidades no estado de Alagoas. Este simulador de chuva estudado, se encontra no estado de Alagoas, e é ilustrado nas Figura 6 e 7, a seguir.

Figura 6 - Parcelas experimentais constituída de material metálico com Neossolo com a presença de cobertura vegetal e sem a cobertura.



Fonte: Fonseca et al. (2019).

Figura 7 - Vista parcial do sistema de teste de chuva simulada, em operação nas dependências da Universidade Federal de Alagoas.



Fonte: Fonseca et al. (2019).

2.1.5 Simuladores de campo

Existem dois grandes grupos de simuladores com base no mecanismo gerador de gotas: os que usam o método de gotejamento e os que utilizam a metodologia de bicos aspersores para produção de chuva, chamados também de infiltrômetro por aspersão. São bastantes utilizados em áreas urbanas ou de campo, e serão apresentados as suas vantagens e desvantagens.

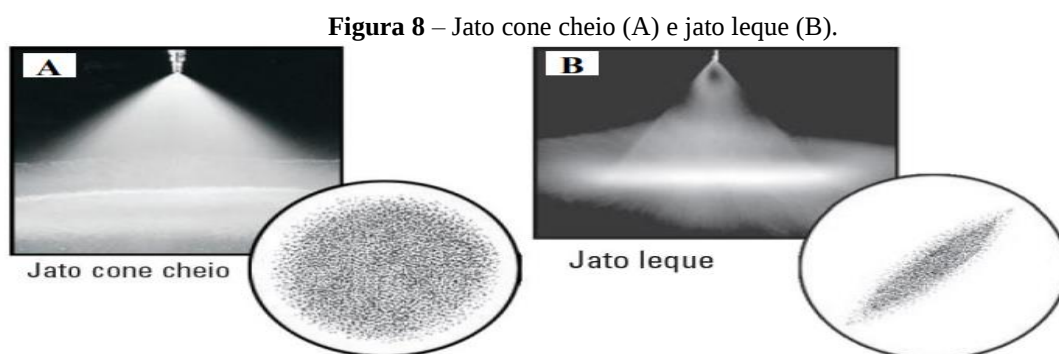
2.1.6 Aspersão

Segundo Montebeller et al., (2001), nos simuladores por aspersão a precipitação se forma pelo fracionamento do jato d'água em gotas, que se dá pela passagem da água pressurizada em pequenos orifícios dos bicos ou bocais. Esses equipamentos permitem reproduzir a velocidade de impacto das gotas numa dada superfície similar à velocidade terminal das gotas de uma chuva natural, regulando-se a pressão do sistema (ALVES SOBRINHO; FERREIRA; PRUSKI, 2002).

Entre as suas características, eles apresentam como principal vantagem a sua dependência do bico aspersor, da pressão de saída de água e da altura do bico, é possível obter precipitação de diferentes intensidades e energias cinéticas (BENITO et al., 2001). Com esses simuladores é possível gerar chuvas com intensidades maiores que aquelas geradas pelos simuladores por gotejamento (COVERT; JORDAN, 2009).

Além das vantagens destes tipos de simuladores, uma desvantagem é o diâmetro das gotas, que para altas pressões e, conseqüente, altas intensidades, não se aproxima do real (SANTOS, 2006). Além disso, apresentam uma maior complexidade na montagem e consumo de água que aqueles que usam o método de gotejamento (BENITO et al., 2001). Os bicos utilizados para os simuladores por aspersão em sua maioria são fornecidos pela Spraying Systems Company ®.

Na literatura, a maioria das pesquisas empregam os bicos aspersores de jato cone cheio (linha FullJet) ou 33 jatos leque (linha VeeJet) apresentados na Figura 8. Os bicos de jato cone cheio formam um padrão de pulverização cheio, circular, uniforme e com gotas de tamanhos médio a grande. Os de jato leque formam um padrão de pulverização fino, elíptico, uniforme e com gotas de tamanhos pequeno a médio.



Fonte: Spraying Systems Company (2016).

Outro exemplo é o simulador de chuva por aspersão, o simulador de chuvas pendular que foi construído utilizando os princípios de funcionamento do simulador descrito por Souza (2004), contudo foi desenvolvido um novo modelo de transmissão de movimento angular para movimento linear do bico aspersor. Utilizou-se um bico aspersor VeeJet 80.150, que oscilava 60 ciclos por minuto sobre a parcela. A avaliação se deu por meio da uniformidade da chuva precipitada do equipamento, coletando-se a chuva simulada em pluviômetros distribuídos por um período de 2 minutos. Os Coeficientes de Uniformidade Estatístico obtidos nos testes do simulador de chuvas foram considerados adequados e indicam haver uma boa uniformidade de distribuição das gotas. Os dados obtidos a partir da avaliação possibilitaram concluir que o simulador construído atende aos requisitos básicos para servir de ferramenta para pesquisas científicas relacionadas à erosão hídrica (PONCIANO et al., 2021). A Figura 9 ilustra este simulador.

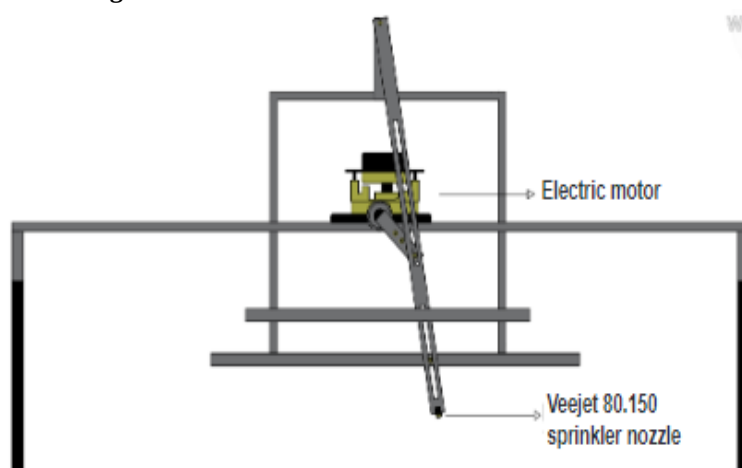
Figura 9 - Simulador de chuva montado para o teste de uniformidade do bocal do aspersor.



Fonte: Ponciano e Vanessa de Fátima, (2021).

O simulador de chuva apresentado na Figura 9, utiliza um mecanismo articulado representado pela Figura 10 e cujo diagrama cinemático encontra-se na Figura 11.

Figura 10 – Inversão do mecanismo biela – manivela.



Fonte: Ponciano e Vanessa de Fátima, (2021).

Figura 11 – Diagrama cinemático da inversão do mecanismo biela – manivela

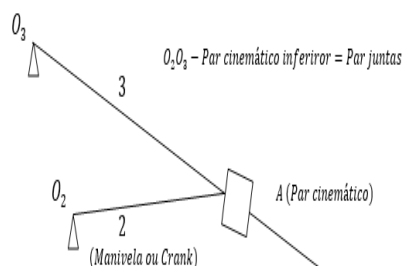
Eq. Grubler

- M = Mobilidade (GL);
- N = Número de Links;
- f_1 = Par cinemático inferior;
- f_2 = Par cinemático superior.

$$M = 3(n - 1) - 2f_1 - f_2$$

$$M = 3(3 - 1) - 2 \cdot (2) - 1$$

$$M = 1$$



Fonte: Autor (2023).

Por meio do diagrama cinemático e da equação de Grubler mostrada na Figura 11, pôde-se calcular a mobilidade do mecanismo que é representado pelo número de graus de liberdade (NGL). Ainda que Ponciano et al (2021) não aborde o tipo de mecanismo utilizado no trabalho, por meio da literatura, pode-se identificar o mecanismo aplicado neste simulador de chuva com movimento oscilatório.

2.1.7 Gotejamento

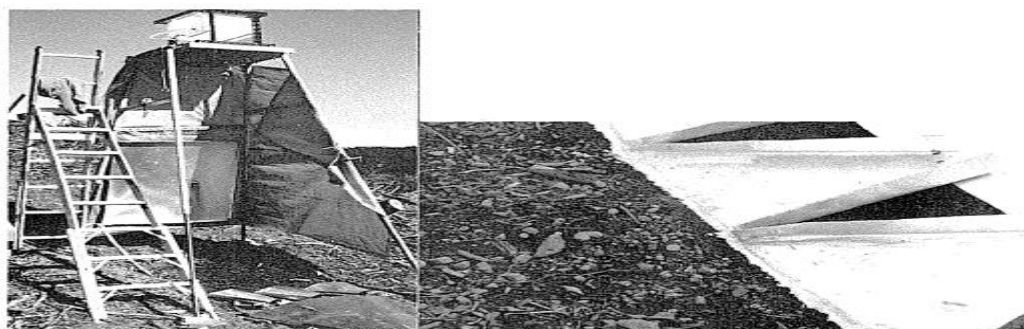
Nos simuladores por gotejamento a formação de diferentes tamanhos de gotas é definida a partir de um dispositivo gerador de gotas de frequência constante, com altura de queda variada (CARVALHO, 2006). A intensidade de precipitação nesses simuladores aumenta linearmente com o aumento da coluna de água no reservatório formador de gotas (RIBEIRO, 2006).

Como desvantagens destes simuladores a velocidade inicial da gota é zero (BENITO et al., 2001), o que impede que a gotas produzidas apresentem velocidade terminal e energia cinética próximas ao de uma chuva natural. Outra desvantagem é que a gota produzida atinge a superfície sempre num mesmo lugar pelo fato de o reservatório formador de gotas e as agulhas estarem fixas, o que não acontece numa chuva comum (KINNER; MOODY, 2008).

Abaixo apresenta-se um exemplo de simulador de chuva por gotejamento, onde um simulador de chuva portátil de campo foi empregado para determinar a infiltração e a resposta à erosão do solo de áreas florestais colhidas (pistas, bombeiros e áreas queimadas) no litoral e interior Columbia Britânica. Os resultados indicam que a capacidade de infiltração diminui à medida que a densidade total e o teor de fragmentos grosseiros aumentam. A concentração de sedimentos do fluxo terrestre aumentou à medida que o volume do escoamento aumentou. No entanto, a variabilidade na absorção de concentração de sedimentos foi alta para os maiores volumes de escoamento que sugere que outros fatores, como textura do solo, gradiente de inclinação e blindagem também têm efeitos importantes. Trabalhos futuros investigarão a papel da textura do solo na infiltração e erosão do solo, (COMMANDEUR et al., 1992).

Na Figura 12, visualiza-se o simulador de chuva que foi projetado e construído na Pacific Forestry.

Figura 12 - Simulador de chuva e sistema de coleta de fluxo terrestre



Fonte: Commandeur e Paul (1992).

2.1.8 Mecanismos

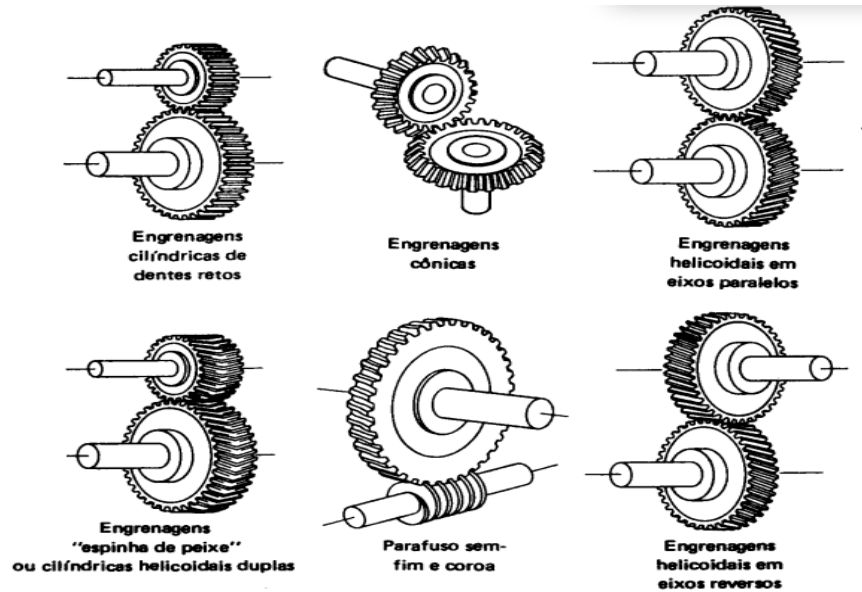
Nesta subseção apresenta-se definições e exemplos de mecanismos mais relevantes para esta monografia, a fim de proporcionar uma melhor compreensão dos componentes a serem estudados.

Segundo Mabie (1980), um Mecanismos é uma combinação de corpos rígidos ou resistentes de tal modo compostos e ligados que se movem entre si com movimento relativo

definido, ou pode ser definido como parte de um projeto de máquinas relacionada com o projeto cinemático de sistemas articulados, cames, engrenagens e trens de engrenagens.

A Figura 13, apresenta algumas configurações de Mecanismos de engrenagens que são usadas em aplicações para transmitir potência entre eixos com uma razão de velocidade angular constante.

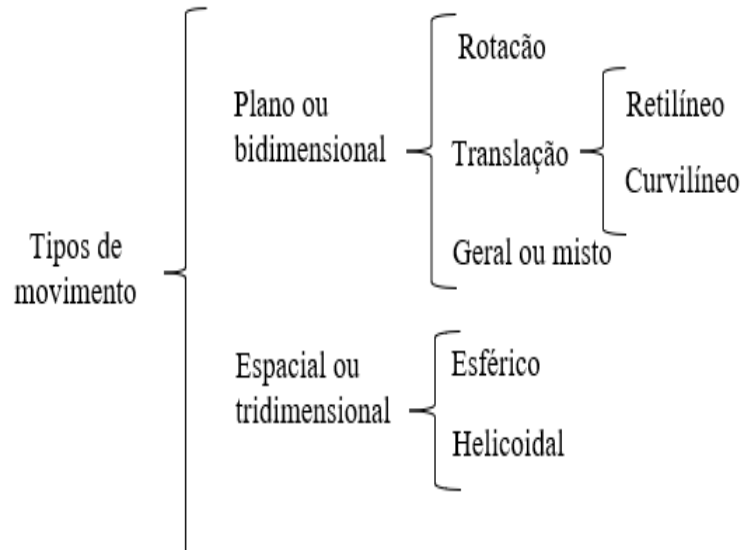
Figura 13 – Algumas configurações de Mecanismos de Engrenagens



Fonte: Mabie (1980).

Estes mecanismos podem apresentar vários tipos de movimento, os quais são apresentados na Figura 14.

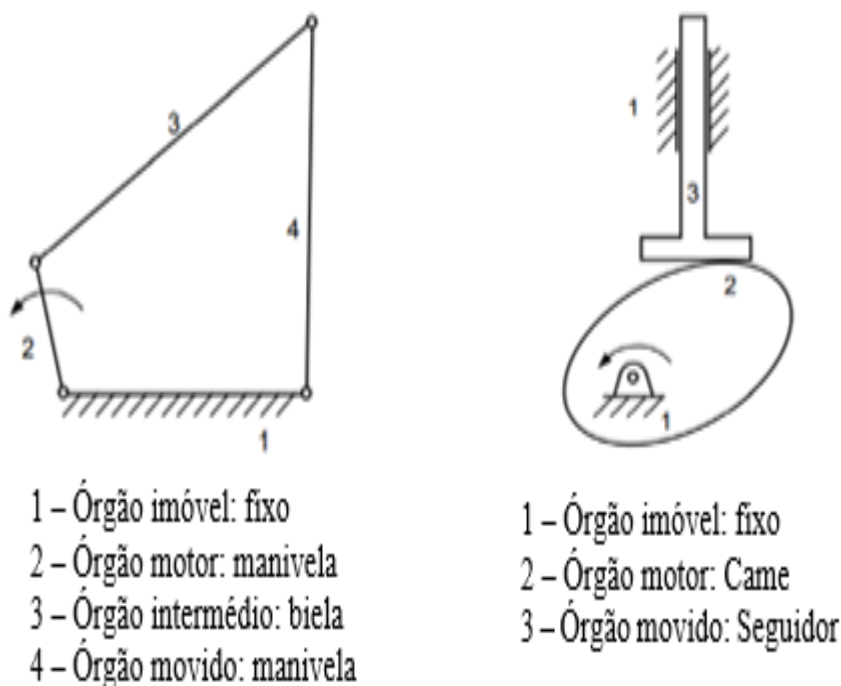
Figura 14 – Tipos de movimento que podem existir num mecanismo.



Fonte: Adaptado de Flores et al., (2005).

No movimento plano ou bidimensional, todos os pontos de um dado corpo em movimento descrevem trajetórias no mesmo plano ou em planos paralelos. O movimento plano pode ser classificado em três tipos de movimentos, o de rotação, de translação e o geral ou misto. Por sua vez, o movimento de translação pode ainda ser retilíneo ou curvilíneo, (FLORES et al., 2005). Na Figura 15 é possível visualizar o movimento plano.

Figura 15 – (a) Mecanismo de quatro barras; (b) Mecanismo came–seguidor



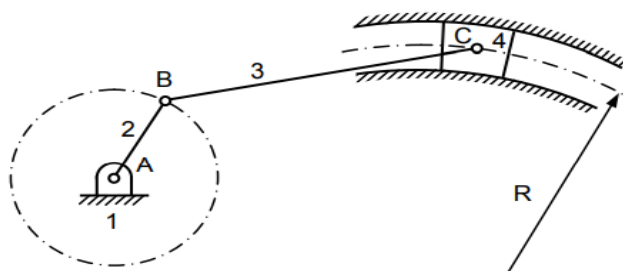
Fonte: Adaptado de Flores et al., (2005).

O movimento é de rotação quando todos os pontos descrevem trajetórias circulares em torno de uma reta perpendicular ao plano de rotação, designado eixo de rotação. No movimento de rotação, todos os pontos de um corpo permanecem a uma distância constante em relação ao eixo de rotação. Quando a rotação é alternada dentro de uma certa amplitude limite, o movimento de rotação é denominado de oscilação.

No movimento de translação, quando os pontos de uma barra descrevem trajetórias curvas e paralelas entre si, diz-se que o movimento realizado é de translação curvilíneo, (FLORES et al., 2005).

Na Figura 16, é possível visualizar o movimento de translação.

Figura 16 - Quadrilátero articulado: movimento de translação curvilíneo



Fonte: Flores et al., (2005).

No estudo de mecanismos é necessário investigar o método pelo qual o movimento pode ser transmitido de um membro para outro. Pode-se transmitir movimento de três maneiras: contato direto entre dois corpos tal como entre um excêntrico e um seguidor ou entre duas engrenagens; através de um elemento intermediário ou uma biela; e por uma ligação flexível, como uma correia ou uma corrente (MABIE, 1980).

2.1.9 Engrenagem cilíndrica de dentes retos

Dentre os diversos tipos de engrenagens existentes, existem quatro tipos básicos de engrenagem:

- Engrenagem cilíndricas de dentes retos;
- Engrenagem cilíndricas de dentes helicoidais;
- Engrenagens cônicas;
- Parafuso sem fim.

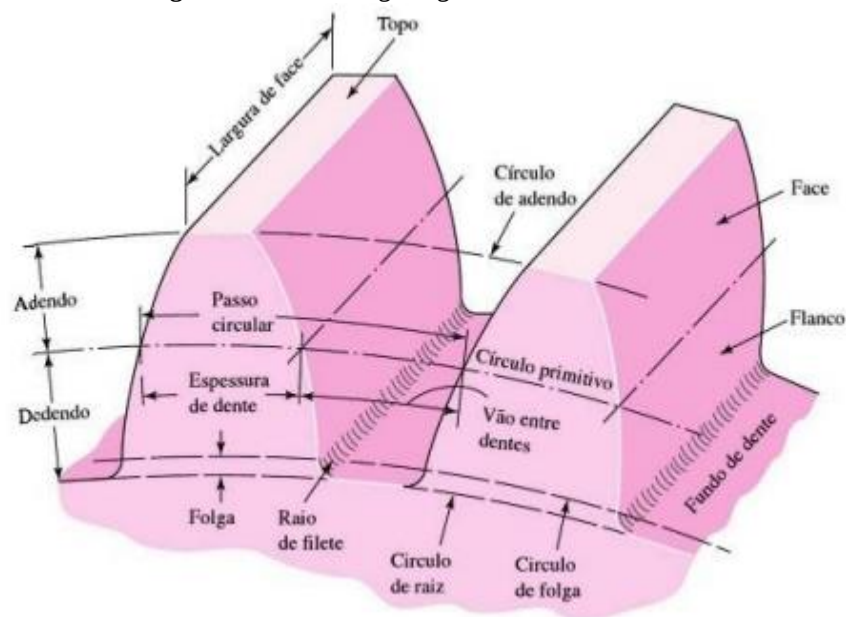
Porém nesta secção só analisará as engrenagens cilíndricas de dentes retos.

As engrenagens de dentes retos são usadas em transmissões que necessitam de uma mudança de posição das engrenagens em serviço, pois apresentam uma maior facilidade de “engatar”. Este tipo de engrenagem é mais empregado em transmissões de baixa do que de alta rotação, devido principalmente ao elevado nível de ruído que produz. Essas engrenagens são mais simples e possuem um custo de produção mais barato em relação as demais (apud COSTA, 2019, p. 26).

Existem algumas razões que explicam a grande utilização deste tipo de engrenagem estão na simplicidade e facilidade associada ao projeto, fabricação, montagem e sua manutenção (apud FERTIG, 2021, p. 16).

Na Figura 17 é mostrado um desenho esquemático indicando a terminologia de dentes de engrenagens retas. Conforme Budynas e Nisbett (2011), “o círculo primitivo é um círculo teórico sobre o qual todos os cálculos geralmente se baseiam; seu diâmetro é o diâmetro primitivo. Os círculos primitivos de um par de engrenagens engrazadas são tangentes entre si. A altura do dente é definida pelo adendo (saliência ou altura de cabeça) e o dedendo (reentrância ou altura de pé), que são referidos ao círculo primitivo (NORTON, 2013).

Figura 17 - Par de engrenagens de dentes retos envolventes.



Fonte: Paulo Flores (2017).

Norton (2013) mostra que, seus dentes são trapezoidais e, mesmo assim, verdadeiramente evolventes. Todos os cálculos analíticos da terminologia de dentes da engrenagem de dentes retos serão descritos na metodologia de forma mais detalhada.

3. MATERIAIS E MÉTODO

Os materiais e métodos são classificados por tópicos, como é possível visualizar no infográfico da Figura 18.

A descrição do infográfico é apresentada da seguinte forma: Primeiro, foi necessário passar pela seção (2), que aborda sobre a referência bibliográfica e aponta estudos dos diversos tipos de simuladores de chuva (SC), e mecanismos aplicados em SC. Após este embasamento foi possível escolher qual seria o melhor mecanismo para aplicar no projeto.

No tópico (3), aborda os requisitos pretendidos para o projeto por meio de ferramentas como a casa da qualidade e a matriz morfológica para fazer este mapeamento.

No tópico (3.1), houve a definição do mecanismo mais adequados para esta aplicação. Tudo isso, deu-se após estudos obtidos segundo o estado da arte, que pautou como sendo um par de engrenagem cilíndrica de dentes retos.

No tópico (3.2), abordado-se sobre o dimensionamento do sistema.

No tópico (3.3), é descrito a metodologia do processo de fabricação para a construção do dispositivo.

Por fim, no tópico (3.4) foram abordadas as metodologias a serem empregadas na realização dos ensaios de eficiência.

Figura 18 – Infográfico sobre as principais etapas dos materiais e métodos.

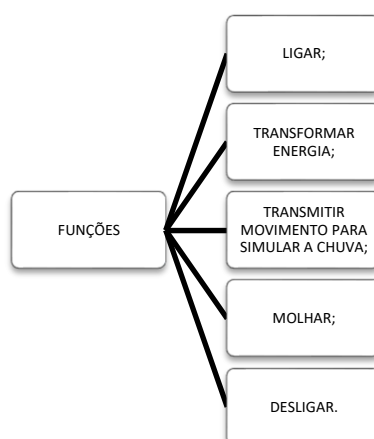


Fonte: Autor (2023).

A matriz casa de qualidade aborda as relações dos requisitos do projeto com as dos clientes e estas medidas são qualificadas como ponto positivo, negativo, forte, fraco, médio, sem relação, alto, maximizar e minimizar. Logo, pela Figura 19, nota-se uma forte relação entre o custo, eficiência de distribuição de água e velocidade constante para obter um simulador de chuva que satisfaça todos os requisitos do cliente com o do projeto. E estas relações foram satisfeitas com a escolha do mecanismo de pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos.

Após esta etapa, criou-se a matriz morfológica de geração de conceitos, que se fragmenta em funções parciais, elementares e as diversificadas soluções. Para estes simuladores de chuva foram definidas as seguintes funções representada pela Figura 20.

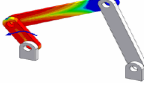
Figura 20 – Funções elementares definidas através da matriz morfológica.



Fonte: Autor (2023).

Após todas estas subfunções, pôde-se obter na Figura 21 a matriz morfológica de geração de conceito.

Figura 21 – Matriz morfológica

MATRIZ MORFOLÓGICA DE UM SIMULADOR DE CHUVA		
Funções Parciais	Funções Elementares	Soluções
Simular a chuva	Ligar/Desligar	 
	Transformar Energia	   
	Transmitir Movimento	    
	Molhar	    

Fonte: Autor (2023).

A matriz morfológica tem o objetivo se preocupar com a função e não com a forma dos componentes. Diante disso, matriz morfológica é uma matriz onde as colunas e as linhas representam os vários parâmetros de solução de um problema. Utiliza-se a primeira coluna para as características relevantes ao problema; as linhas horizontais são preenchidas com possibilidades para cada um desses parâmetros. Levantar estas possibilidades de soluções foram essenciais para definir qual o melhor equipamento usar desde a etapa de ligar e desligar para os SC de laboratório de campo.

3.1 DEFINIÇÃO DO MECANISMO

No referencial teórico abordou-se sobre os mais diversos tipos de mecanismos existentes e seus movimentos. Portanto, diante das informações levantadas e os requisitos deste projeto foi possível observar que os mecanismos oscilatórios, proporcionariam um movimento angular do bico aspersor, e dificultariam os processos de variação de altura e área experimental. Além disto, esses mecanismos proporcionariam uma velocidade não homogênea do bico aspersor, sobretudo no final do curso quando a velocidade está próxima de zero.

A problemática da velocidade e movimento oscilatório poderiam ser solucionadas com a utilização de mecanismo came-seguidor, porém o mesmo necessitaria de uma came com dimensões elevadas para proporcionar um curso linear adequado para o tamanho da área experimental, o que poderia trazer problemas para o seu funcionamento.

O pinhão-cremalheira por permitir fácil regulagem de altura e da área experimental, e apresentar velocidade constante, exceto no momento da inversão do movimento, e possibilitar regulagem da velocidade do bico aspersor, supriria a demanda do projeto, porém, a cremalheira tem um movimento extremamente longo para realizar o percurso da base de ensaio.

Diante disso, ainda na família dos mecanismos do tipo engrenagem o mais ideal seria os pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos envolventes. Pois, conseguiria realizar o movimento de percurso da base de ensaio em uma extensão menor suprimindo assim a demanda do percurso segundo as exigências para as áreas de ensaio dos SC. Além disso, o par de engrenagens permite a reutilização do motor do projeto anterior reduzindo assim o custo do projeto.

3.2 DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA

3.2.1 Linguagem analítica

Desde o início foi pensado em um simulador de chuva que retratasse uma boa uniformidade de distribuição de água na área experimental, para isso, foi necessário realizar o dimensionamento do sistema de simulador de chuva utilizando mecanismo de engrenagem cilíndrica de dentes retos. Para o correto dimensionamento fez-se uso da linguagem analítica a fim de obter o percurso das engrenagens de forma que garanta a variação da altura de 2 a 2,5 metros e das dimensões da área experimental de até 1, por 0,40 m para laboratório, e 2 por 1 m para ensaios de campo.

Estes cálculos, trata-se da linguagem analítica que envolve equações, regras e/ou procedimentos que representam a forma e função do simulador de chuva. Diante disso, fez-se o cálculo do raio da engrenagem movida que é a engrenagem maior para o mecanismo do simulador de chuva de laboratório. Como é possível verificar na Equação 1.

$$r \cdot \theta = R \cdot \alpha \quad (1)$$

Onde:

r = Raio da engrenagem menor (mm);

θ = Ângulo da engrenagem menor, teta (°);

R = Raio da engrenagem maior (mm);

α = Ângulo da engrenagem maior, alfa (°).

Adotou-se o raio da engrenagem motora como sendo de 50 mm com um ângulo teta de 150° (angulação desenvolvida pelo motor) e a engrenagem movida, a maior, com um ângulo alfa de 30° (angulação necessária para garantir a simulação de chuva em toda a área experimental de laboratório). Em seguida, fez-se a transformação dos ângulos para radianos e obteve-se o seguinte resultado.

$$r \cdot \theta = R \cdot \alpha$$

$$(50 \text{ mm}) \cdot (2,617) = R \cdot (0,523)$$

$$R = 250 \text{ mm}$$

Observa-se que para obter o diâmetro primitivo da engrenagem menor e maior através dos raios encontrados basta multiplicar por dois os raios como se encontra na Equação 2 e Equação 3 abaixo:

$$D_{pm} = 2 \cdot r \quad (2)$$

Onde:

r = Raio da engrenagem menor (mm);

D_{pm} = Diâmetro primitivo da engrenagem menor (mm).

$$D_{pM} = 2 \cdot R \quad (3)$$

Onde:

r = Raio da engrenagem maior (mm);

D_{pM} = Diâmetro primitivo da engrenagem maior (mm).

Após estes cálculos obtém-se um diâmetro primitivo de 100 mm para a engrenagem menor e 500 mm para a engrenagem maior. Com estes dados dos pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos é possível calcular o percurso percorrido por elas como aponta-se na Equação 4.

$$l = \pi \cdot \frac{D_{pM}}{2} \quad (4)$$

Onde:

$l = \text{Percurso percorrido (mm)};$

$D_{pM} = \text{Diâmetro primitivo da engrenagem maior (mm)}.$

O percurso percorrido é de 785 mm para engrenagem maior que corresponde a 7,85 cm. E de forma trivial será para a engrenagem motora, cujo o percurso é de 157 mm ou 1,57 cm. O próximo passo, para o dimensionamento dos pares de engrenagem é calcular a relação de transmissão que é obtido segundo a Equação 5.

$$i = \frac{D_{pM}}{D_{pm}} = \frac{N_M}{N_m} \quad (5)$$

Onde:

$D_{pm} = \text{Diâmetro primitivo da engrenagem menor(mm)};$

$D_{pM} = \text{Diâmetro primitivo da engrenagem maior (mm)};$

$N_m = \text{Número de dentes da engrenagem menor(mm)};$

$N_M = \text{Número de dentes da engrenagem maior (mm)};$

$i = \text{Relação de transmissão}.$

Ao substituir os valores na (Equação 5), encontra-se uma relação de transmissão igual a 5, e com este valor é possível encontrar o número de dentes da engrenagem menor, considerando que a engrenagem maior tenha 125 dentes. Logo, segundo a Equação 6 tem-se que:

$$N_m = \frac{N_M}{i} \quad (6)$$

Portanto, o número de dentes da engrenagem menor ao substituir os valores na equação é igual a 25 dentes. Em seguida, os módulos dos pares de engrenagens são determinados pela Equação 7 e Equação 8. Segundo Norton (2013), o módulo de ambas as engrenagens tem que ser o mesmo.

$$M = \frac{D_{pM}}{N_M} \quad (7)$$

$$M = \frac{D_{pm}}{N_m} \quad (8)$$

Onde:

D_{pm} = Diâmetro primitivo da engrenagem menor (mm);

D_{pM} = Diâmetro primitivo da engrenagem maior (mm);

N_M = Número de dentes da engrenagem maior;

N_m = Número de dentes da engrenagem menor;

M = Módulo.

Substituindo os valores, encontra-se um módulo para ambas as engrenagens iguais a 4. Posteriormente é possível calcular os diâmetros interno e externo dos pares de engrenagens, como representado nas Equações 9, 10, 11 e 12.

$$D_{Im} = D_{pm} - (2,166 \times M) \quad (9)$$

$$D_{IM} = D_{pM} - (2,166 \times M) \quad (10)$$

$$D_{Em} = D_{pm} + (2 \times M) \quad (11)$$

$$D_{EM} = D_{pM} + (2 \times M) \quad (12)$$

Onde:

D_{Im} = Diâmetro interno da engrenagem menor (mm);

D_{IM} = Diâmetro interno da engrenagem maior (mm);

D_{Em} = Diâmetro externo da engrenagem menor (mm);

D_{EM} = Diâmetro externo da engrenagem maior (mm).

Diante disso, temos um diâmetro interno da engrenagem menor igual a 91, 336 mm e da maior igual a 491,336 mm. Já o diâmetro externo da movida é igual a 508 mm e da motora igual a 108 mm.

A próxima etapa com base no Norton (2013), aborda as expressões matemáticas e terminologias da altura total do dente que é definido como a soma total do adendo ou altura da cabeça, e do dedendo, ou altura do pé, que são referidos pela circunferência primitiva. O dedendo é levemente maior que o adendo para fornecer a menor folga possível entre a ponta do dente de uma engrenagem. Estas expressões analíticas são representadas na Equação 13, 14 e 15.

$$H = 2,25 \times M \quad (13)$$

Onde:

$H = \text{Altura total (cm)};$

OBS: a altura (H) total dos vãos dos dentes é determinado através da ISO(UNE 10.016).

Obteve-se uma altura total de 9 mm ou de 0,9 cm. Após isso, é possível calcular o Adendo e o dedendo.

$$H = a + b \quad (14)$$

Onde:

$H = \text{Altura total (cm)};$

$a = \text{Adendo (cm)};$

$b = \text{dedendo (cm)};$

Norton (2013), salienta que o adendo é igual ao módulo. Diante disso, a altura da cabeça é igual a 0,4 cm e a altura do pé é de 0,5 cm. Com estes valores pôde-se calcular a folga entre os pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos pela Equação 15.

$$f = b - a \quad (15)$$

Todas as equações apresentadas a cima determinam o dimensionamento correto do mecanismo dos pares de engrenagens cilíndricas somente para o simulador de chuva para laboratório. O mecanismo de simulador de chuva para ensaios de campo o dimensionamento do sistema é obtido pelos mesmos cálculos, porém, a mudança ocorre somente nos valores da área de ensaio. Uma vez que, o ângulo obtido para campo foi de 50°, e assim, determinou-se um diâmetro primitivo de 166,6 mm, diâmetro interno de 157,936 mm, diâmetro externo de 174,6 mm e número de dentes igual a 42 dentes.

Segundo o Norton (2013), a espessura dos dentes, o passo e o módulo são iguais. E reconhece-se que estas informações prevalecem nos cálculos obtidos. Uma vez que, obteve um módulo igual a 4 tanto para o mecanismo de ensaio de campo quanto para o de laboratório com espessura dos dentes é de 6,28 mm e o passo de 12,56 mm.

Diante disso, as Tabelas 1, 2, 3 e 4 apresentam todos os dados analíticos dos mecanismos do simulador de chuva.

Tabela 1 – Dados analíticos da engrenagem menor motora.

Engrenagem menor motora	
Diâmetro primitivo	100 mm
Diâmetro interno	91,336 mm
Diâmetro externo	108 mm
Número de dentes	25 dentes

Fonte: Autor (2023).

Tabela 2– Dados analíticos da engrenagem maior motora.

Engrenagem maior motora	
Diâmetro primitivo	166,6 mm
Diâmetro interno	157,936 mm
Diâmetro externo	174,6 mm
Número de dentes	42 dentes

Fonte: Autor (2023).

Tabela 3– Dados analíticos da engrenagem maior movida.

Engrenagem maior movida	
Diâmetro primitivo	500 mm
Diâmetro interno	491,336 mm
Diâmetro externo	508 mm
Número de dentes	125 dentes

Fonte: Autor (2023)

Tabela 4 – Dados analíticos das engrenagens

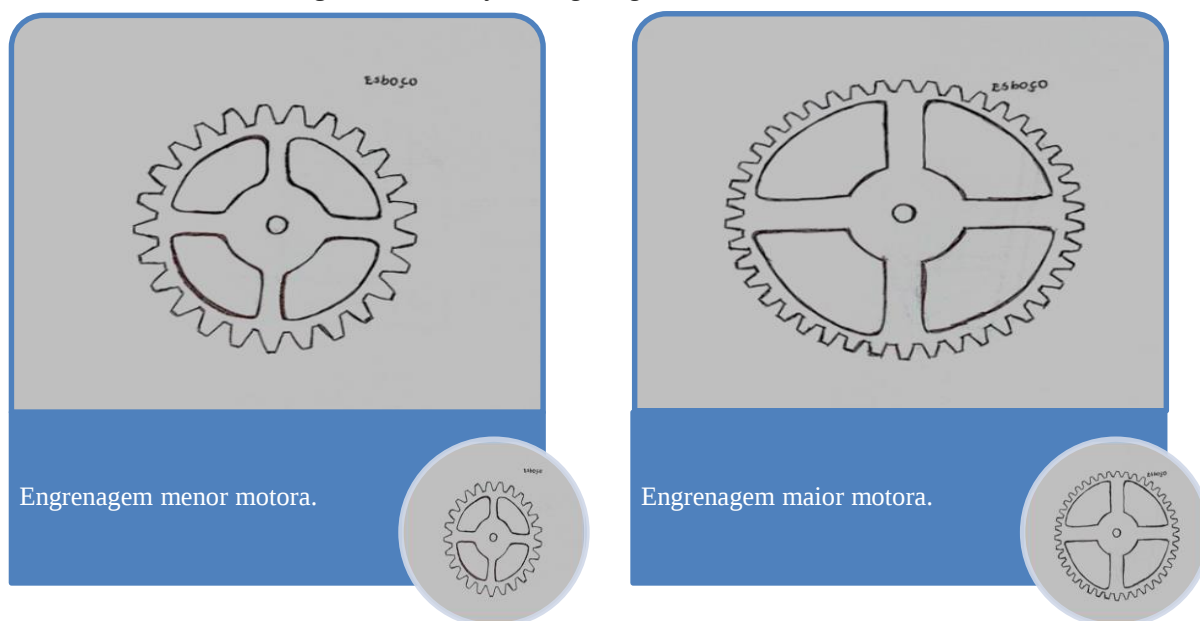
Dados iguais das engrenagens	
Espessura dos dentes	6,28 mm
Altura total do dente	0,9 cm ou 9 mm
Módulo	4
Passo	12,56 mm
Relação de transmissão	5

Fonte: Autor (2023).

3.2.2 Esboço

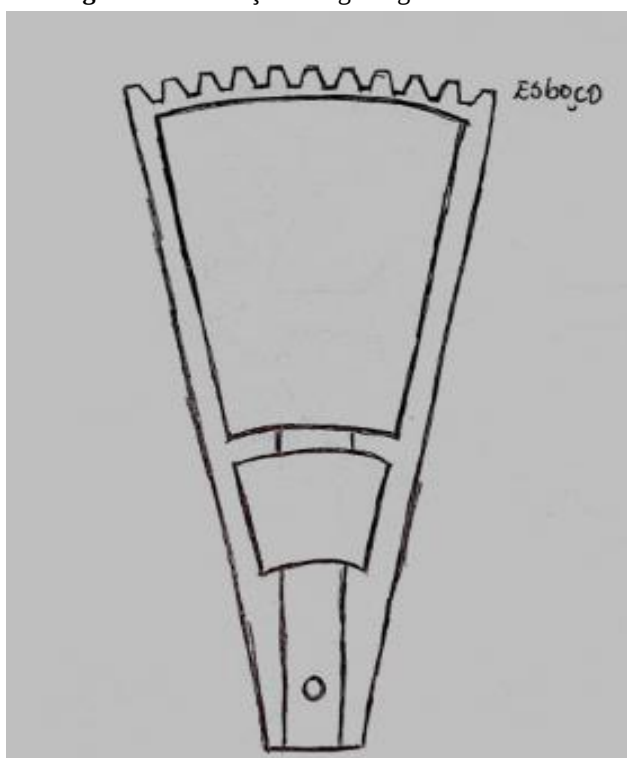
Um bom dimensionamento de projeto também envolve a parte do esboço ou sketch. O esboço é um desenho rápido, à mão livre, sem muitos acabamentos e detalhes. Nesta subseção fez-se uso do esboço para um bom dimensionamento do simulador de chuva, este tipo de trabalho contribuiu para o desenvolvimento das ideias desde as engrenagens até o simulador final como é possível observar nas Figuras 22, 23, 24 e 25.

Figura 22 – Esboço da engrenagem menor e maior motora.



Fonte: Compilação do Autor¹.

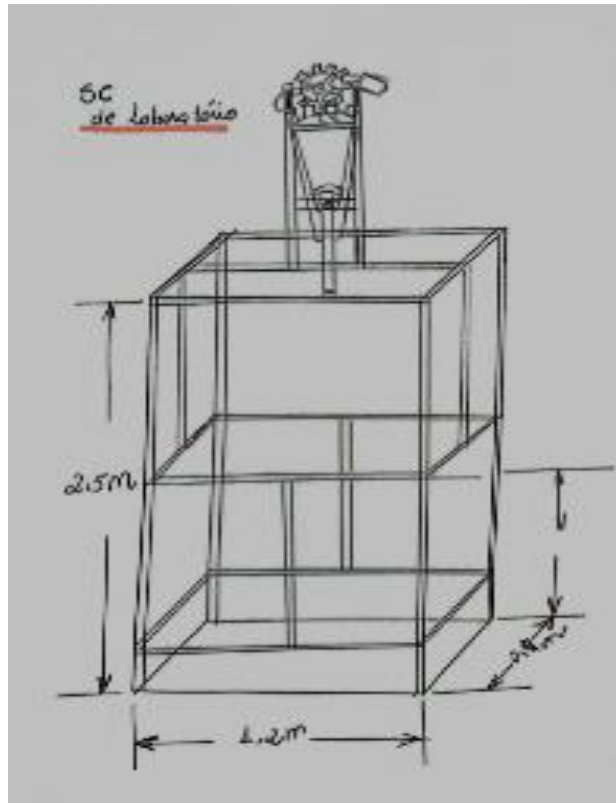
Figura 23 – Esboço da engrenagem maior movida



Fonte: Autor (2023).

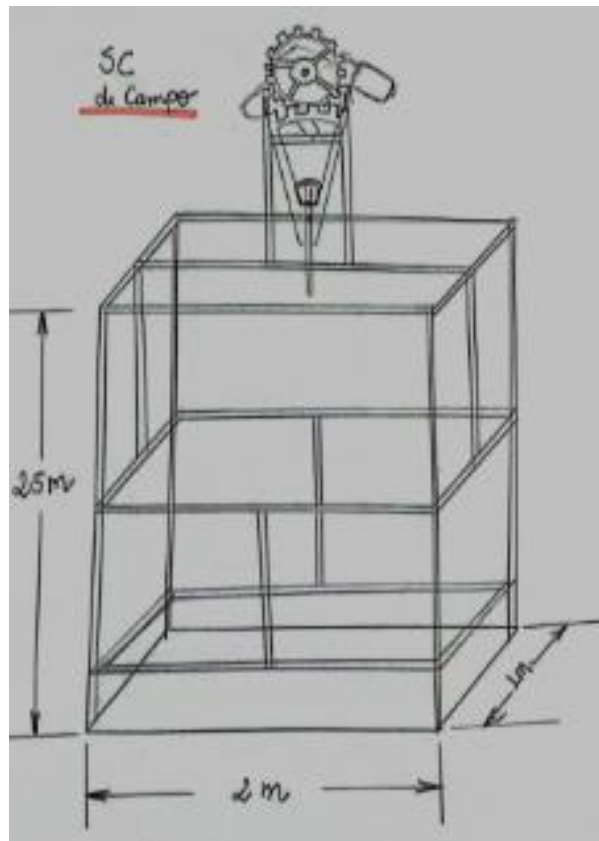
¹ Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

Figura 24 – Esboço do simulador de chuva de laboratório



Fonte: Autor (2023).

Figura 25 – Esboço do simulador de chuva de campo.

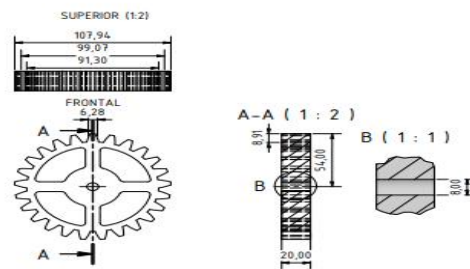


Fonte: Autor (2023).

3.2.3 Linguagem técnica

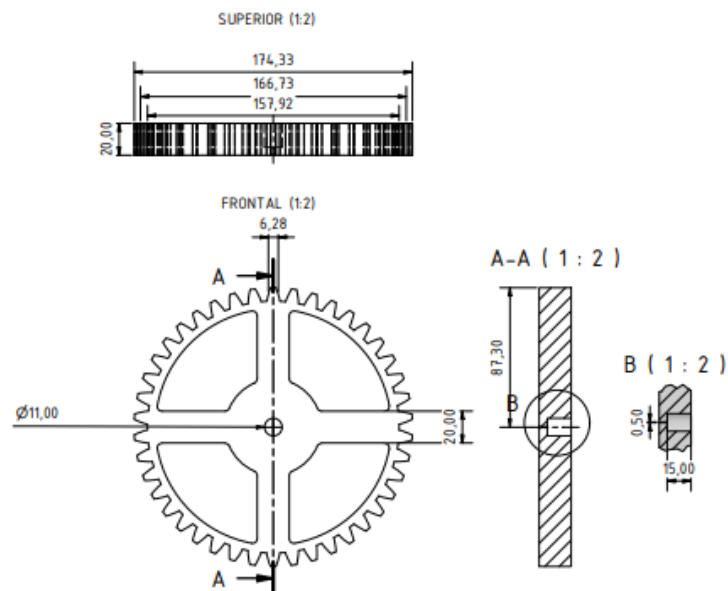
A medida que o projeto avançava, foi realizado o desenho técnico, trata-se de uma linguagem gráfica menos abstrata, com escala, acabamentos e detalhes. Todo este processo foi realizado no próprio ambiente do software Inventor profissional 2023, versão estudante. Nas Figuras 26, 27, 28, 29 e 30 pode-se visualizar os desenhos técnicos de cada peça do projeto.

Figura 26 – Linguagem técnica da engrenagem menor motora.



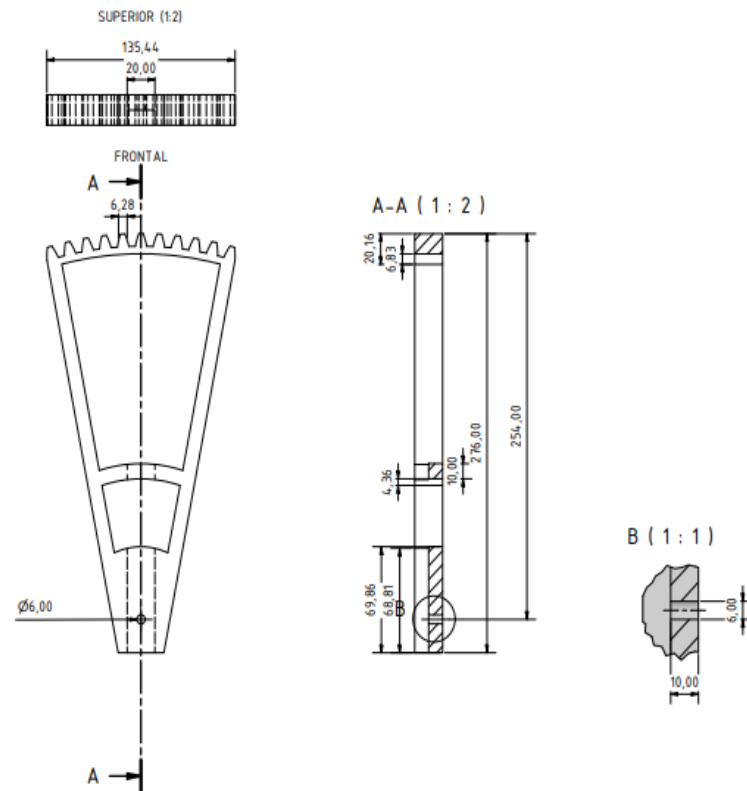
Fonte: Autor (2023).

Figura 27 – Linguagem técnica da engrenagem maior motora.



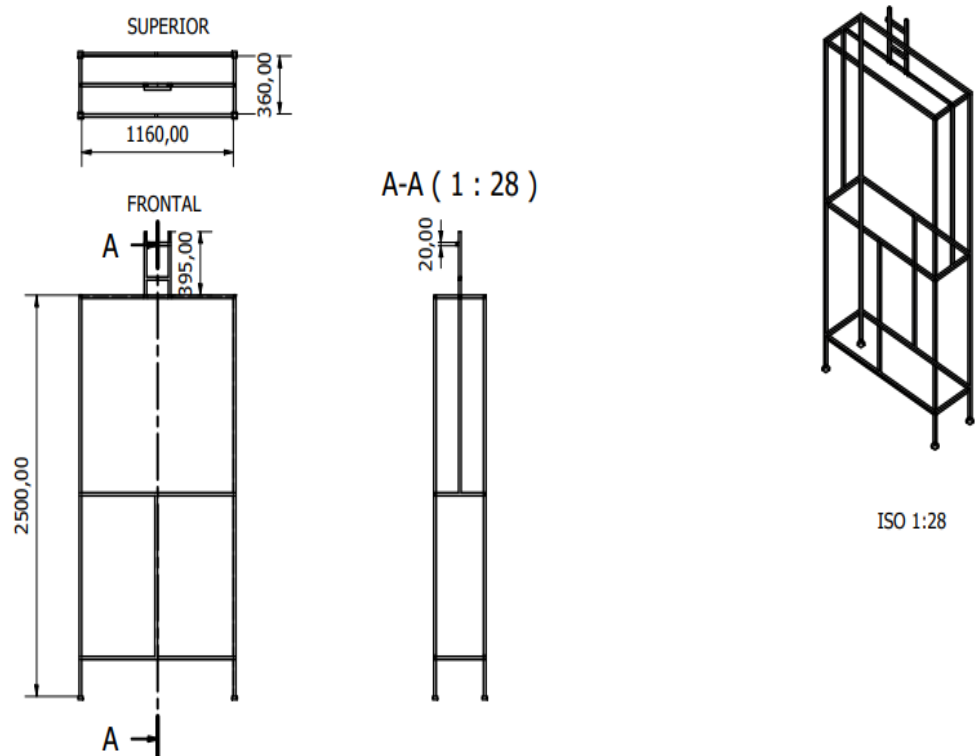
Fonte: Autor (2023).

Figura 28 – Linguagem técnica da engrenagem maior movida.

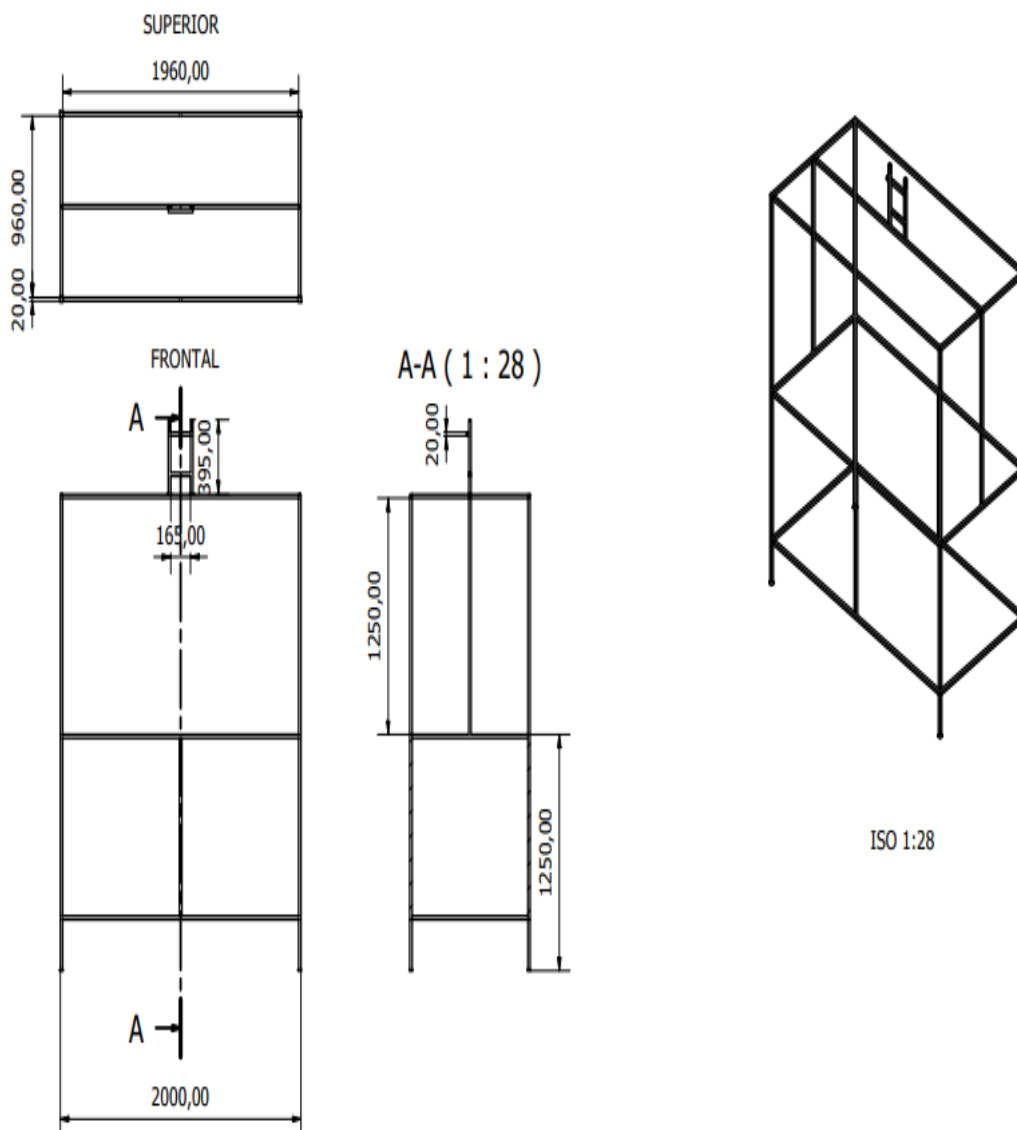


Fonte: Autor (2023).

Figura 29 – Linguagem técnica do simulador de chuva de laboratório



Fonte: Autor (2023).

Figura 30 – Linguagem técnica do simulador de chuva de campo

Fonte: Autor (2023).

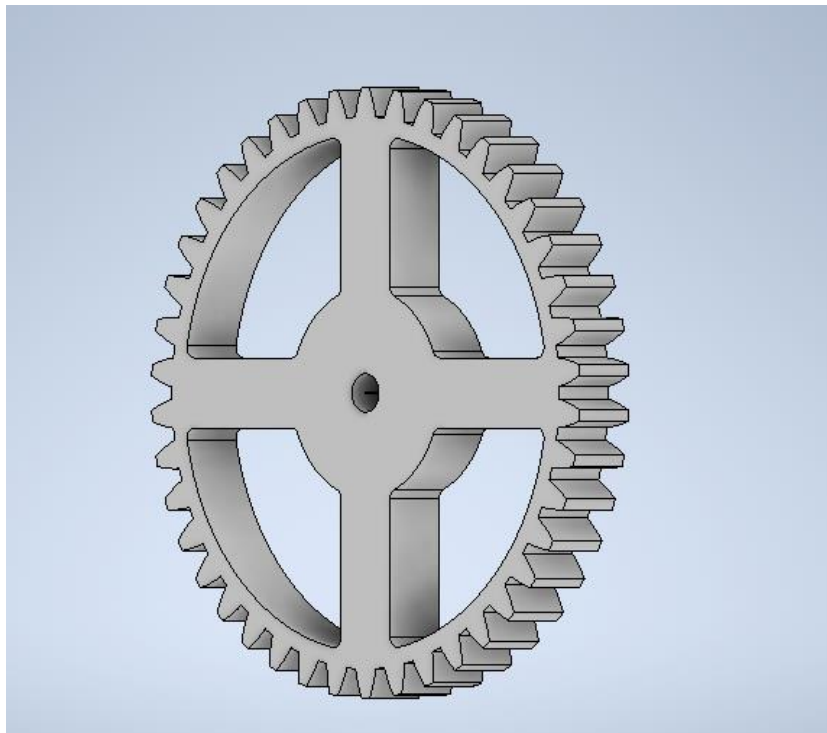
Antes do processo de fabricação do sistema, desenvolveram-se os layouts dos mecanismos e simuladores de chuva através do software Autodesk Inventor profissional 2023, versão estudantil. Este software disponibiliza ferramentas profissionais de projeto mecânico 3D, documentação e simulação. Diante disso, por meio deste programa desenvolvido pela empresa Autodesk pôde-se criar protótipos virtuais tridimensionais do sistema deste trabalho como é possível visualizar nas Figuras 31, 32, 33, 34, 35, 36 e 37.

Figura 31 – Protótipo 3D da engrenagem motora menor.



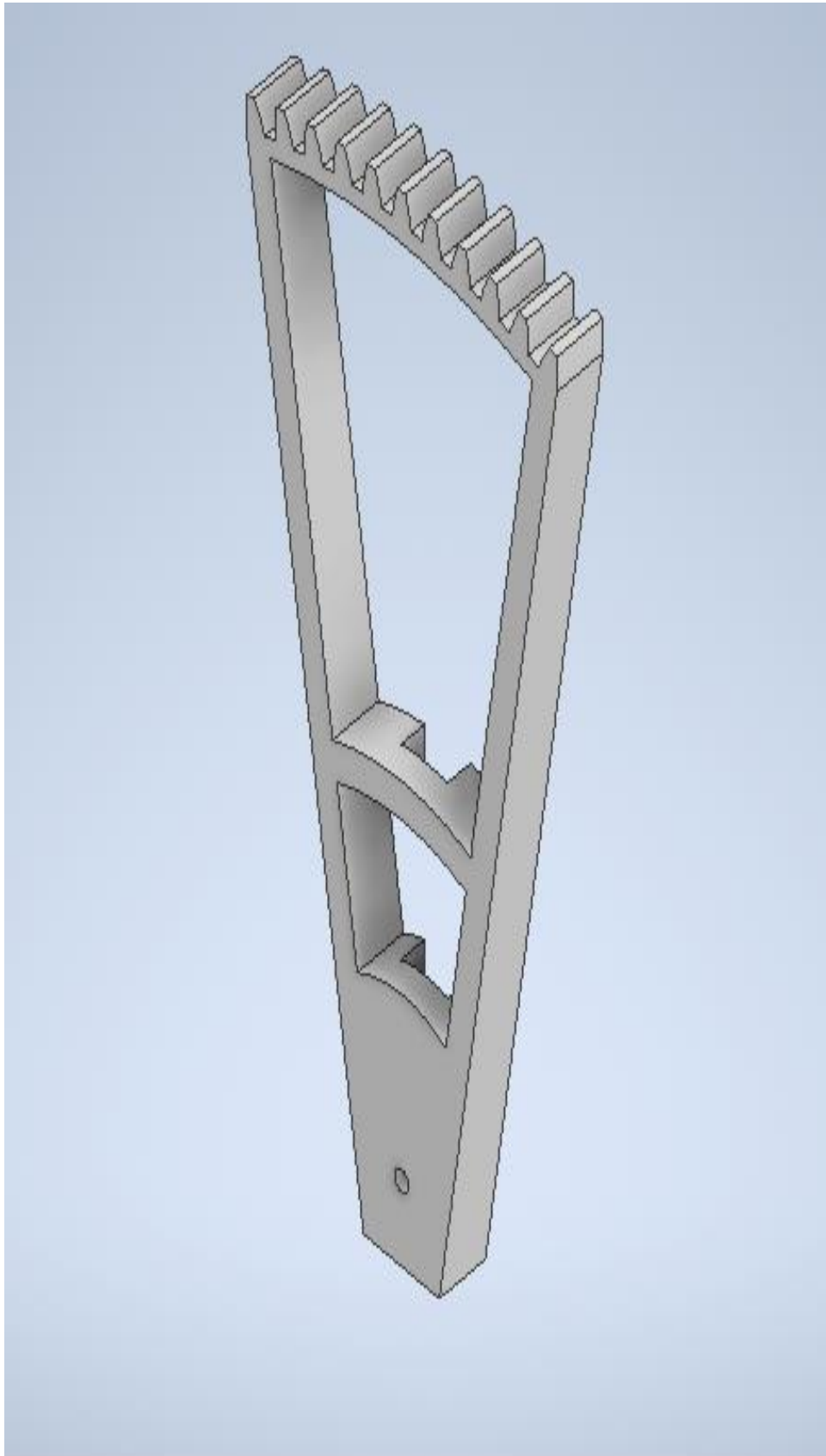
Fonte: Autor (2023).

Figura 32 – Protótipo 3D da engrenagem motora maior.



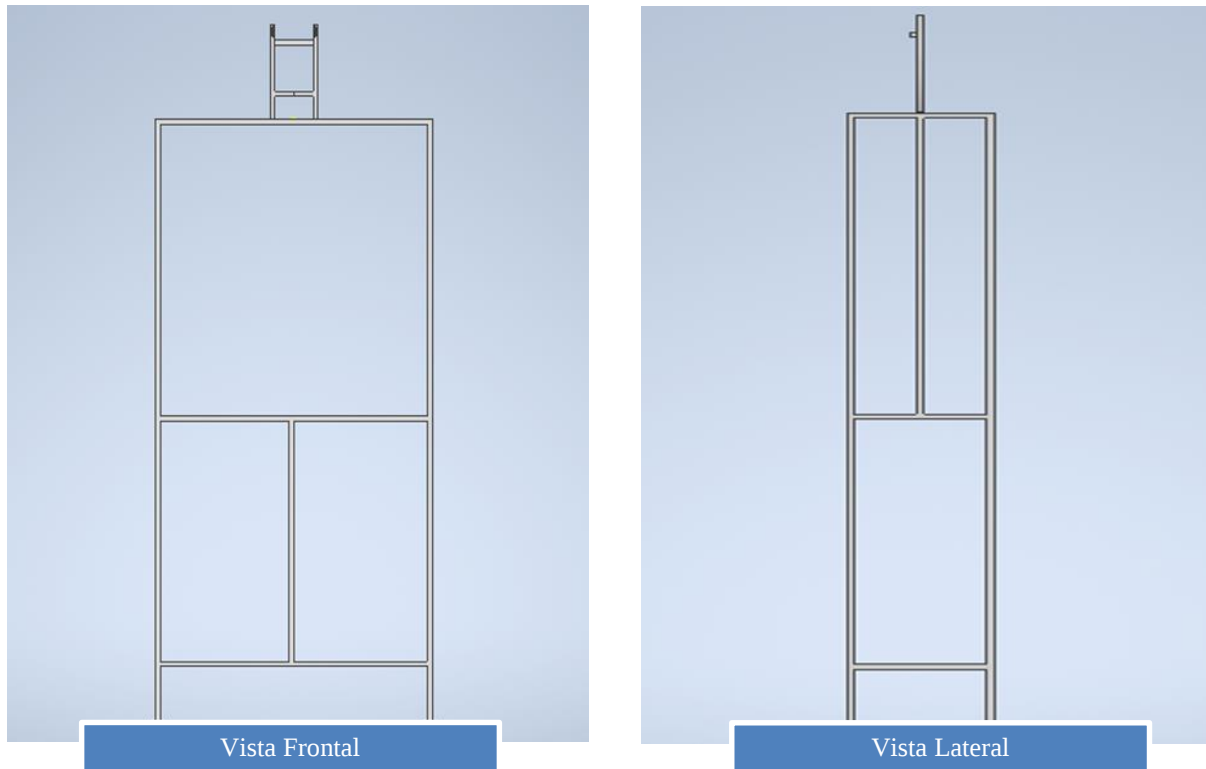
Fonte: Autor (2023).

Figura 33 – Protótipo 3D da engrenagem movida maior.



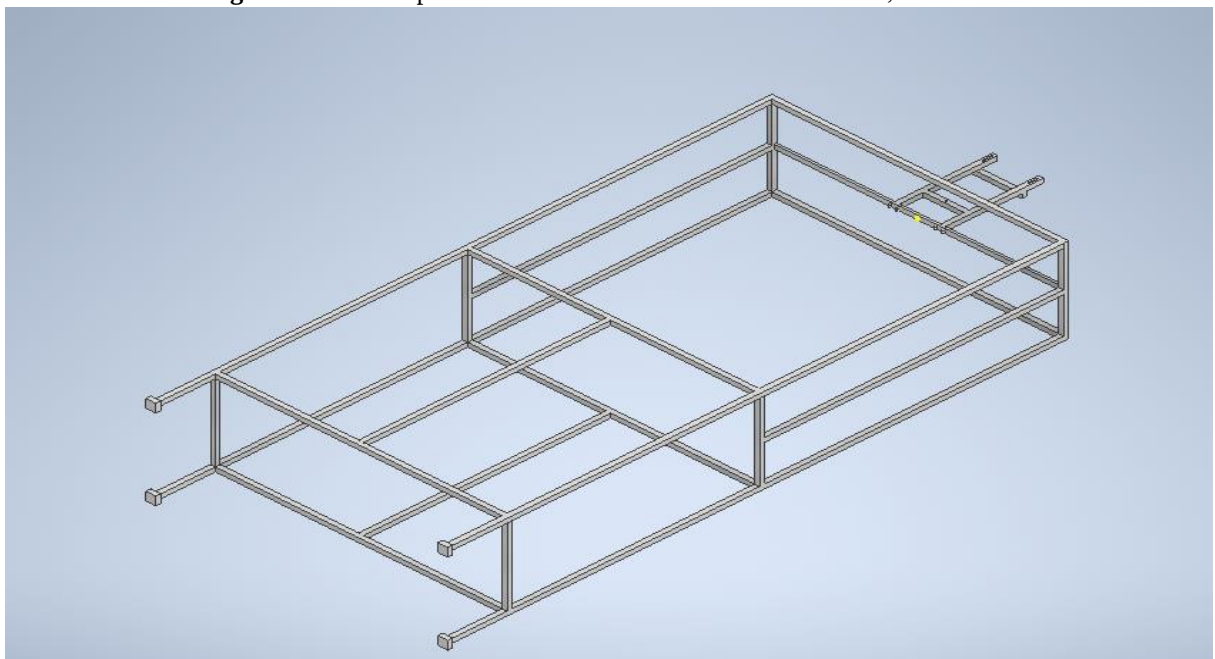
Fonte: Autor (2023).

Figura 34 – Protótipo 3D do simulador de chuva e laboratório, vista frontal e lateral.



Fonte: Compilação do autor².

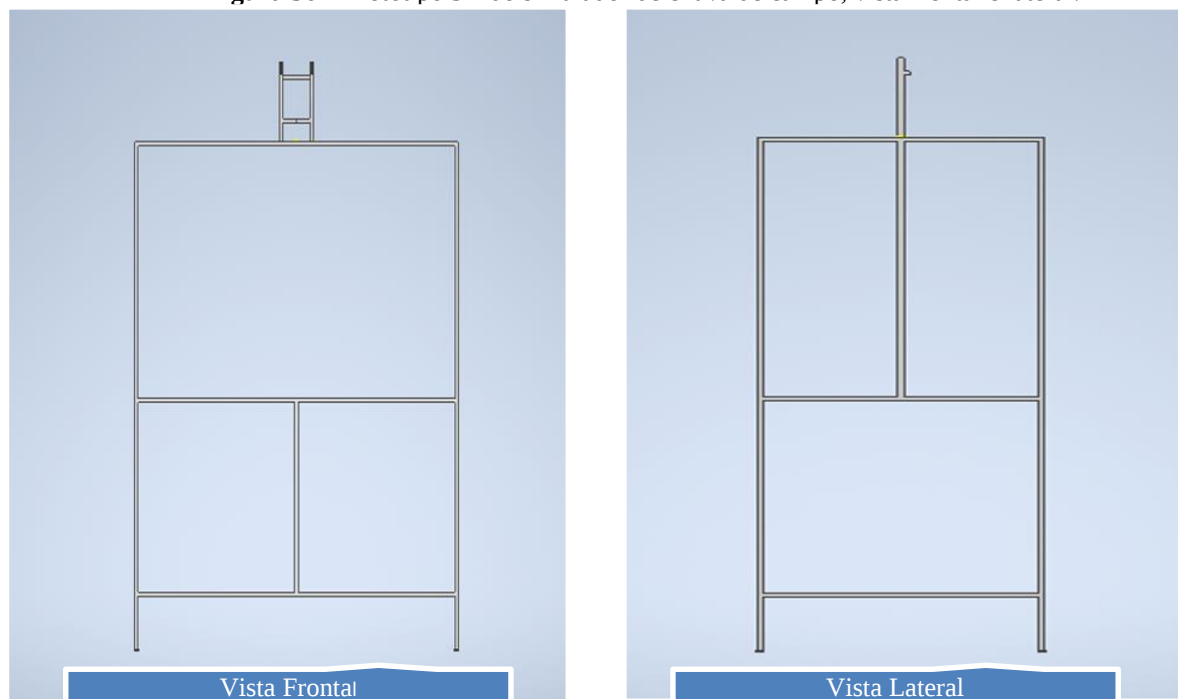
Figura 35 – Protótipo 3D do simulador de chuva de laboratório, isométrica



Fonte: Autor (2023).

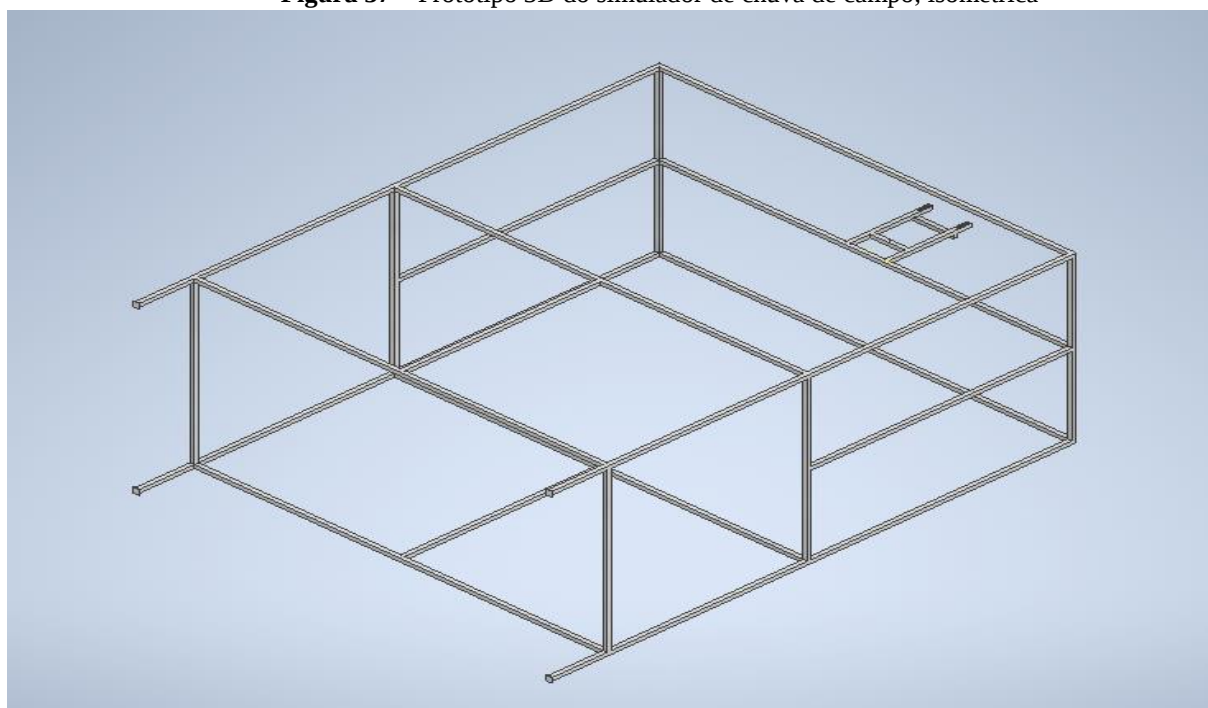
² Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

Figura 36 – Protótipo 3D do simulador de chuva de campo, vista frontal e lateral.



Fonte: Compilação do autor³.

Figura 37 – Protótipo 3D do simulador de chuva de campo, isométrica

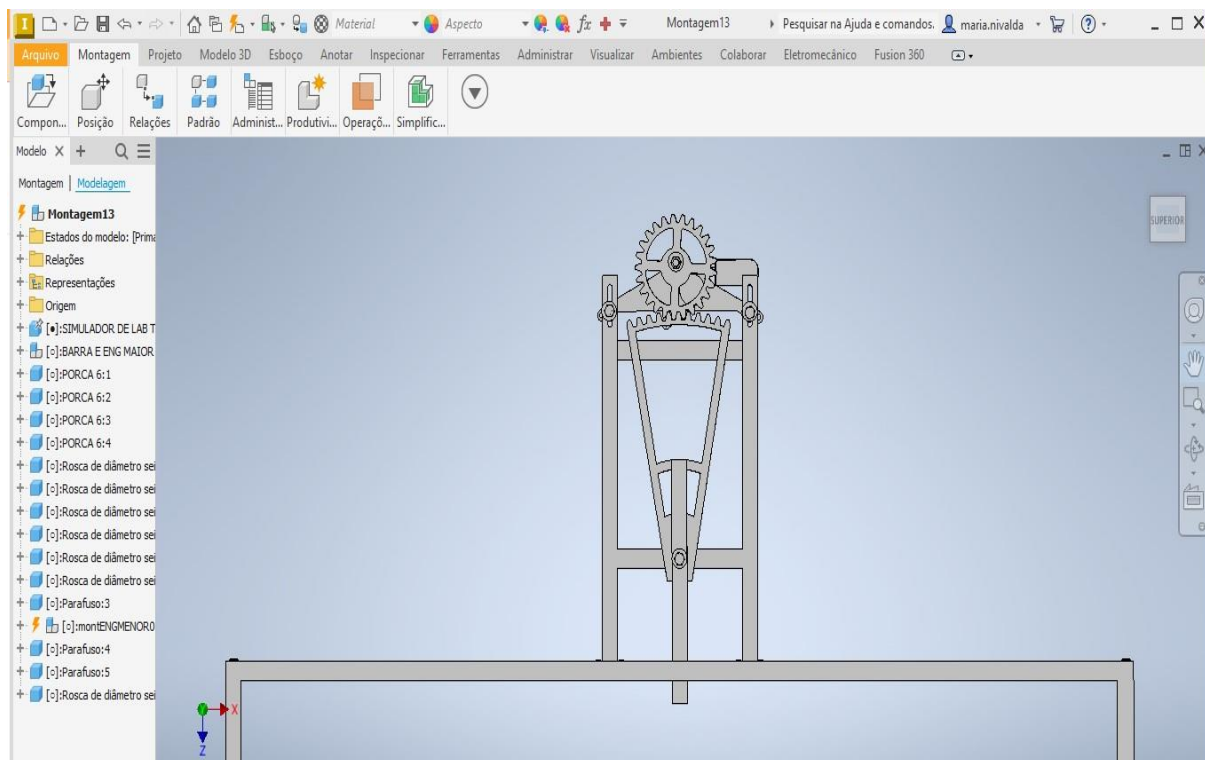


Fonte: Autor (2023).

³ Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

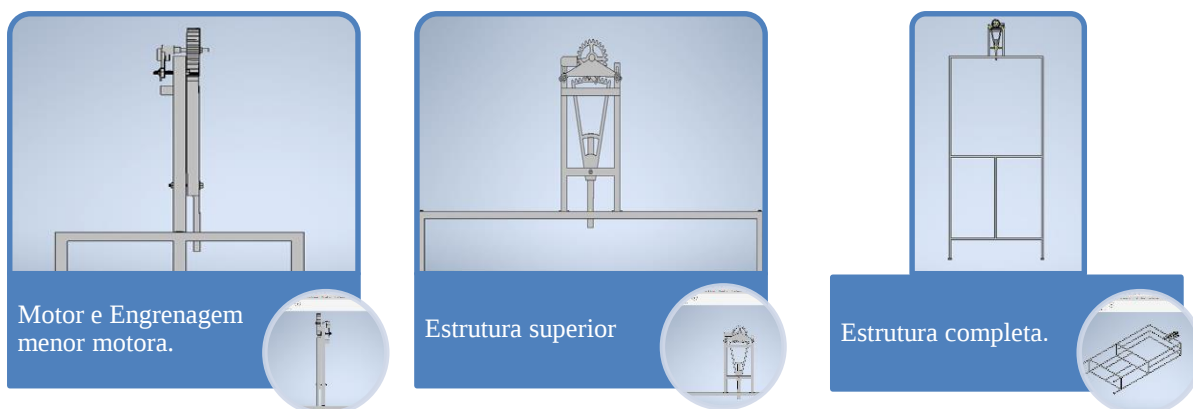
Após os desenhos 3D construídos, fez-se a montagem virtual (Figura 38, 39, 40 e 41) para assim passar para a etapa de fabricação e construção na forma presencial.

Figura 38 – Montagem do mecanismo no simulador de chuva de laboratório.



Fonte: Autor (2023).

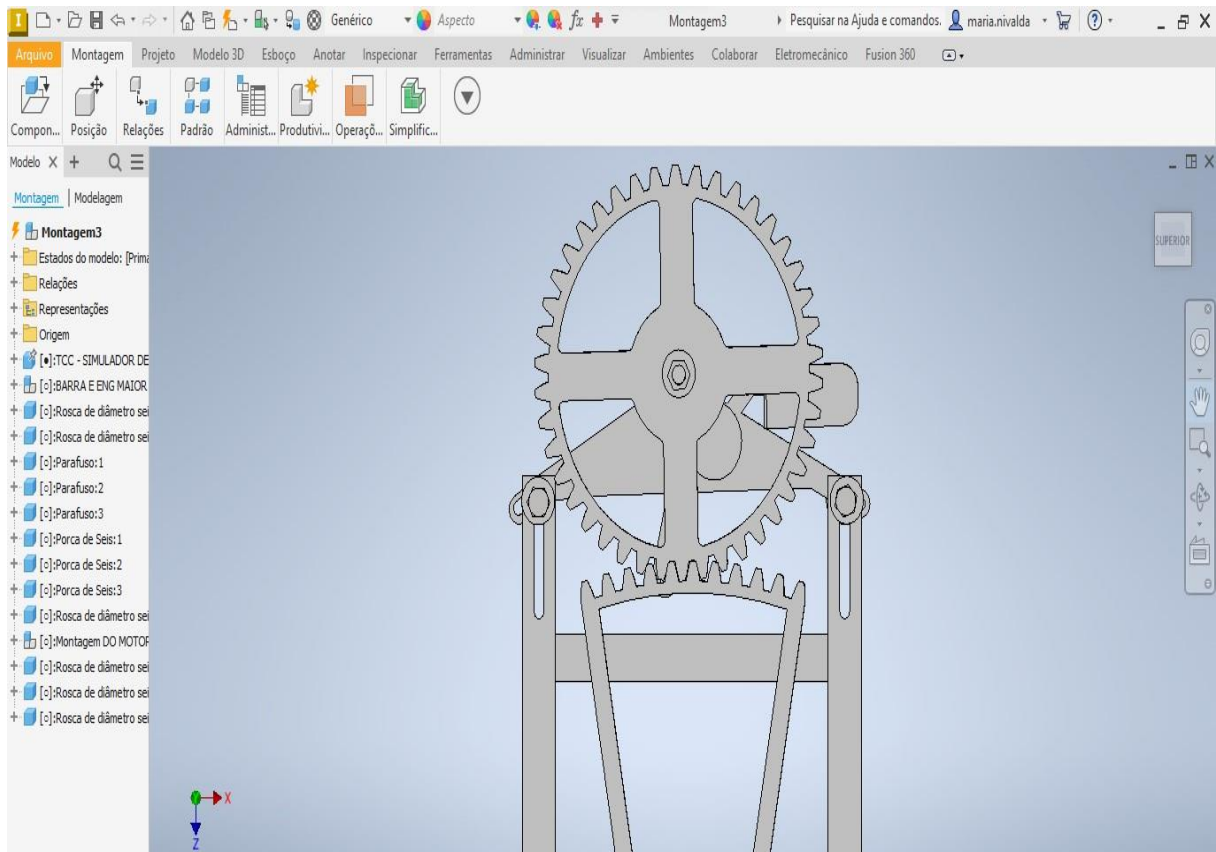
Figura 39 – Etapas de montagem do mecanismo no simulador de chuva de laboratório.



Fonte: Compilação do autor⁴.

⁴ Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

Figura 40 – Montagem do mecanismo no simulador de chuva de campo.



Fonte: Autor (2023).

Figura 41 – Etapas de montagem do mecanismo no simulador de chuva de campo.



Fonte: Compilação do autor⁵.

⁵ Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

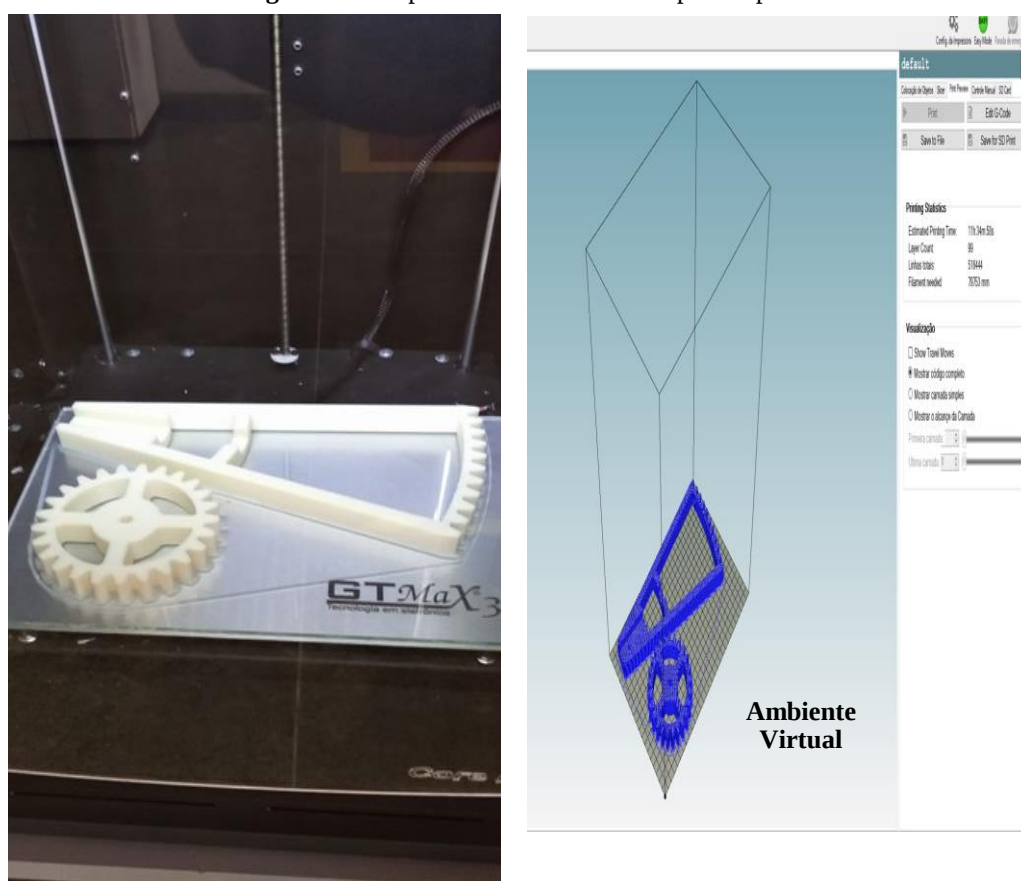
3.3 FABRICAÇÃO E CONSTRUÇÃO

3.3.1 Impressora 3D

Com os desenhos técnicos concluídos iniciou-se a impressão do mecanismo para o simulador de chuva de laboratório pela impressora 3D, Figura 44. O equipamento constrói objetos tridimensionais sólidos a partir de um arquivo digital. Os mecanismos criados surgiram por meio do processo aditivo, em que existem deposição de sucessivas camadas de um determinado matéria. Neste caso, o material utilizado foi o Acrilonitrilo Butadieno Estireno (ABS), Figura 45, é um polímero à base de petróleo. É o mesmo plástico usado em partes de automóveis e eletrodomésticos. É um material barato e resistente a altas temperaturas.

Portanto, os protótipos dos pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos foram criados, e para uma melhor visualização deste processo observe a Figura 42.

Figura 42 – Impressão dos mecanismos pela impressora 3D.

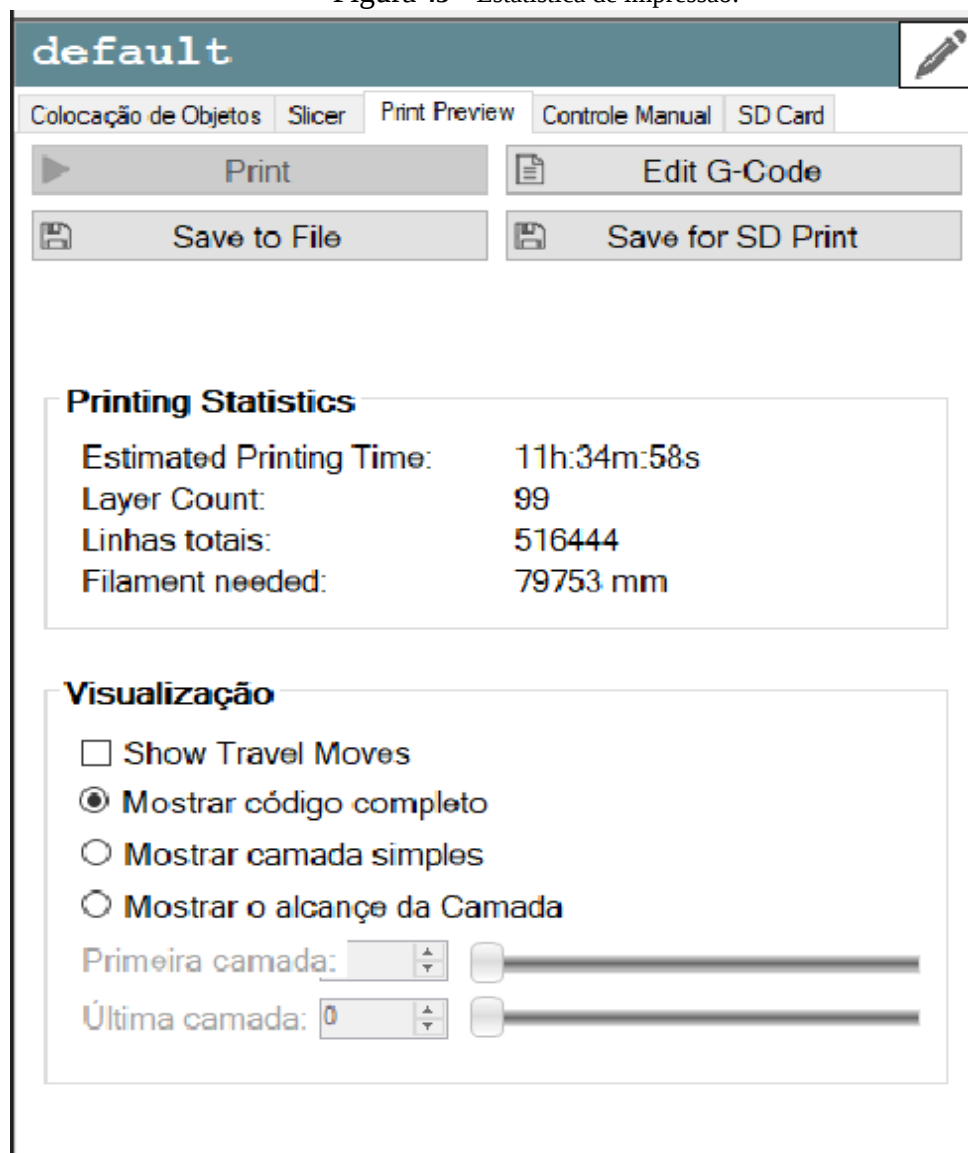


Fonte: Compilação do autor⁶.

⁶ Montagem a partir de imagens geradas pela própria autora, (2023).

Nesta primeira etapa pela estatística de impressão o tempo estimado de impressão foi de 11h:34min:58s, com uma contagem contabilizada de 99 camadas, correspondente a 516444 linhas. A quantidade de filamento necessário ou ABS utilizados chegou a 79753 mm como ilustrado Figura 43 e na Tabela 5.

Figura 43 – Estatística de impressão.



Fonte: Autor (2023).

A estatística de impressão foi feita no computador do galpão de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Oeste da Bahia.

Tabela 5 – Materiais de fabricação dos mecanismos

MATERIAS UTILIZADOS	QUANT/ ESPECIFICAÇÃO
Impressora 3d	GTmax 3b core h4
Acrilonitrilo butadieno estireno (ABS)	79753

Fonte: Autor (2023).

Figura 44 – Impressora 3D.

Fonte: (GTMax3D, 2014?).

Figura 45 – ABS.

Fonte: (GTMax3D, 2014).

3.3.2 Estrutura: fabricação e construção

A estrutura dos sistemas de simuladores de chuva deste projeto é formada por tubos de metalon quadrados. Este nome é dado aos tubos fabricados em aço carbono concentrado. O Tubo Metalon possui uma boa durabilidade, além de ser muito resistente, (ACOMAI, 2022).

Um motivo da escolha deste material está na resistência do aço carbono, uma vez que o Tubo Metalon é extremamente versátil e pode ser aplicado em diversos projetos, como por exemplo na construção de simuladores de chuva com estrutura mais resistentes, além de apresentar no mercado um menor custo. Outro motivo da escolha deste material seria o reaproveitamento da estrutura do simulador antigo. Diante disso, a Figura 46, mostra as barras de metalon com dimensões de 20x20 mm de tubo quadrado.

Figura 46 – Tubos quadrados de metalon.



Fonte: Autor (2023).

Para confecção da estrutura onde as engrenagens são fixadas, passou-se por várias etapas. Na primeira, fez-se as medidas das barras com uma trena e depois as marcações ao centro para dividir as barras, e assim obter duas barras com um tamanho de 39,5 cm. Após dividir as barras com um arco serra, uma vez que a barra estava fixada no torno morsa de bancada pegou a outra barra inteira de 79 cm e fez outra marcação no meio com uma distância de 8,25 cm para cada lado, e assim foi posicionado as barras menores em cima da barra inteira com uma distância de 16,5 cm entre elas, neste momento fez uso da ferramenta punção, com o

objetivo de gerar marcações para realização dos furos na barra maior, com 6 mm de diâmetro, para encaixar os parafusos entre a barra maior e as menores.

As ferramentas utilizadas nessa etapa estão apresentadas na Figura 47.

Figura 47 – Ferramentas utilizadas na primeira etapa de fabricação.

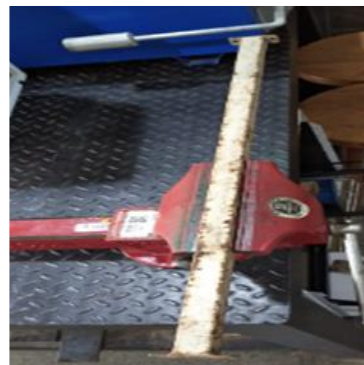
Trena



Arco de Serra



Torno Morsa de Bancada



Ponteiro para martletes



Furadeira de bancada



Esmeril de bancada



Fonte: Compilação do autor⁷.

A segunda etapa de fabricação foi a soldagem da barra menor com as duas barras cortadas na primeira etapa. E em seguida usou o torno morsa de bancada para fazer o furo onde será encaixado a engrenagem movida maior. Na Figura 48, é possível verificar este processo de soldagem que visa a união localizada destes materiais.

⁷ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

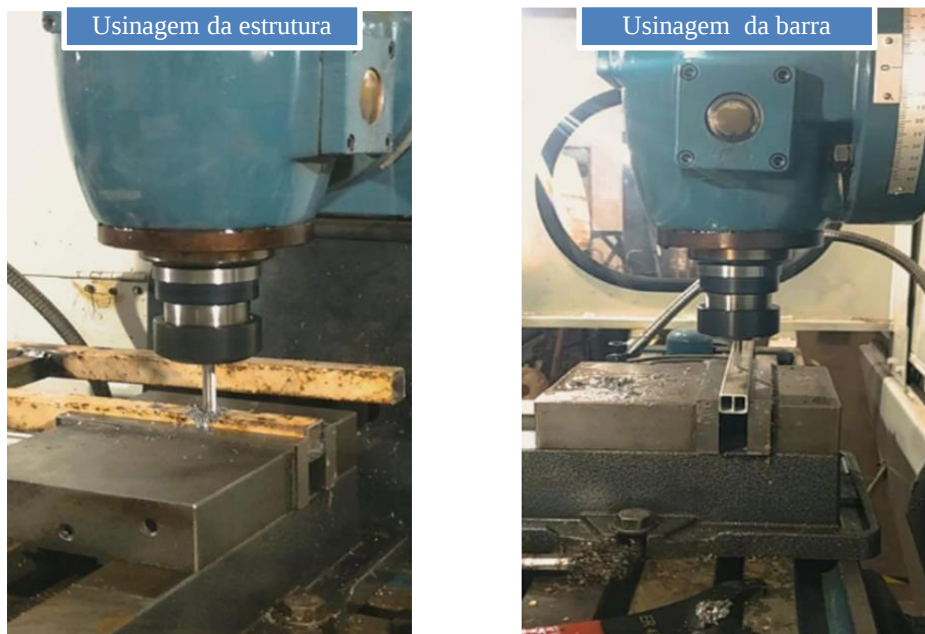
Figura 48 – Segunda etapa do processo usando o método de soldagem



Fonte: Autor (2023).

Na terceira etapa, iniciou-se o processo de usinagem das duas barras para criar um furo oblongo que seria responsável pelo encaixe do motor na estrutura, o diâmetro dos oblongos foram de 6 mm. Além de usinar a estrutura, também foi necessário usinar a barra de metalon como encaixe da engrenagem maior movida, e assim esta etapa foi finalizada. Para uma melhor representação observe a Figura 49 que aborda este processo.

Figura 49 – Terceira etapa processo de usinagem



Fonte: Compilação do autor⁸.

⁸ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

Ambos os processos de usinagem foram feitos pela máquina fresadora. Após isso, para a última etapa, foi feito novamente, um processo de soldagem da barra localizada atrás das barras da estrutura, este processo utilizou uma máquina de solda inversora ESAB. Diante disso, segue-se imagem da estrutura completa após todas as etapas de processos de fabricação (Figura 50) e a Tabela 7 com todas as ferramentas utilizadas.

Figura 50 – Estrutura do simulador de chuva de laboratório



Fonte: Autor (2023).

Tabela 6 – Equipamentos utilizados na etapa de fabricação

FERRAMENTA/EQUIPAMENTO	QUANTIDADE
Arco de serra	1
Torna Morsa de bancada	1
Furadeira de bancada	1
Esmeril de bancada	1
ESAB Máquina de solda inversora	1
Paquímetro Universal	1
Ponteiro para Marteleto	1
Esquadro profissional	1
Jogo de chave L hexagonal	1
Broca de aço	1

Fonte: Autor (2023).

A Figura 51, aborda a representação das ferramentas e equipamentos utilizados na etapa de fabricação.

Figura 51 – Equipamentos utilizados na última etapa de fabricação

Fresa



Máquina de Solda inversora



Paquímetro Universal



Jogo de L hexagonal



Broca de Aço



Esquadro profissional



Fonte: Compilação do autor⁹.

Após todas as etapas finalizadas a estrutura dos mecanismos foi concluída. Em seguida montou na estrutura o motor limpador traseiro Gol Fox Polo Golf 2008 a 2014, de marca Volkswagen para verificar se estava tudo conforme o planejado. Todos estes processos desde a impressão 3D, retirada das medidas, usinagem, soldagem e primeira montagem da estrutura foram realizados no Laboratório Didático de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Oeste da Bahia, no Centro Multidisciplinar de Bom Jesus da Lapa. Em outro ambiente, agora no Centro do Instituto Federal Baiano, fez-se a desmontagem desta peça superior como é possível visualizar na Figura 52.

⁹ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

Figura 52 – Desmontagem da estrutura superior.

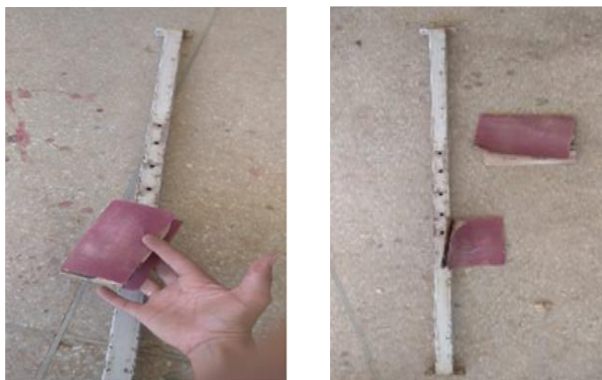


Fonte: Autor (2023).

Na desmontagem utilizou as seguintes ferramentas: Três chaves combinada de número 10 e 12 e uma chave allen de número 12.

A primeira etapa após a desmontagem foi a de lixamento da estrutura, ou seja, com uma lixa fina fez-se o polimento da superfície para realizar a pintura. Observe na Figura 53.

Figura 53 – Lixamento.



Fonte: Compilação do autor¹⁰.

A pintura de toda a estrutura ocorreu na segunda etapa após a desmontagem. Para isso utilizou-se a tinta Brasilux (Figura 54), que é uma tinta automotiva de cor branco com excelente aderência as superfícies e uma boa resistência as intempéries. E o compressor de ar direto cujo objetivo é aplicar a tinta de forma uniforme e eficiente. Na montagem abaixo é possível visualizar a parte descrita acima.

¹⁰ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

Figura 54 – Processo de pintura.



Fonte: Compilação do autor¹¹.

A secagem de cada parte da estrutura ocorreu na terceira etapa como é possível visualizar nas na Figura 55.

Figura 55 – Processo de secagem.



Fonte: Compilação do autor¹²

¹¹ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

¹² Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

3.3.3 Montagem

A montagem da estrutura fixada nos mecanismos ocorreu depois da lixamento, pintura e secagem. Os equipamentos utilizados estão descritos na Tabela 7 e a estrutura final na Figura 56.

Figura 56 – Estrutura.



Fonte: Autor (2023).

Tabela 7 – Equipamentos utilizados na montagem.

EQUIPAMENTO	Quantidade	Tamanho	Diâmetro
		(cm)	(mm)
Parafuso	4	2	6
Parafuso	4	4	6
Arruelas	16		
Porcas	8 (Normal)		

Fonte: Autor (2023).

No Instituto Federal Baiano, campus de Bom Jesus da Lapa, foi montado o novo simulador de chuva. A sua estrutura é de tubo quadrado de metalon com aço carbono concentrado. As dimensões variam de acordo com o tipo de simulador, para o de laboratório o vão livre é de 1,2 m de comprimento e 0,40 m de largura. E o de campo o vão corresponde a 2 m de comprimento e 1m de largura. O simulador de laboratório contém um bico oscilante VeeJet 80.100 acoplado a engrenagem cilíndrica de dentes retos motora que recebe a potência gerada pelo motor e permitir seu movimento em um ângulo de 30°C.

Trabalhando com sucção afogada. Um par de engrenagens cilíndricas de dentes retos envolventes. Um motor de limpador traseiro gerando a potência necessária para o movimento dos mecanismos em um ângulo adequado. E um manômetro analógico que permite operar em

diferentes pressões de serviço, possibilitando a variação na intensidade de precipitação, uniformidade de distribuição e diâmetro de gota.

3. 4 TESTE DE EFICIÊNCIA

Para realizar o teste de uniformidade de Christiansen ou CUC, fez-se a calibragem do simulador de chuva em um ambiente fechado para impedir qualquer ação do vento. A Figura 57, aborda este teste, com 25 recipientes distribuídos a 0,25 m, compondo uma área de 1m² com 0,2 m² de sobra para cada lado.

Figura 57 - Teste de uniformidade de Christiansen.



Fonte: Compilação do autor¹³.

Existem diversos tipos de bicos e a diferença entre eles é a numeração, para o teste de uniformidade foram utilizados numeração de 80.10, 80.50, 80.100, após esse teste, todos os dados foram substituídos na (Equação 16):

¹³ Montagem a partir de imagens capturadas pela própria autora, (2023).

$$CUC = 100 \left(1 - \sum_{i=1}^n |Q - \bar{Q}| / nQ \right) \quad (16)$$

Onde:

CUC = Coeficiente de uniformidade de Christiansen, em %;

Q = Vazão coletada em cada gotejador, em L h⁻¹;

$\bar{Q}$ = Média das vazões coletadas de todos os gotejadores, em L h⁻¹;

n = Número de gotejadores analisados.

Christiansen (1942) foi o primeiro pesquisador a estudar a uniformidade de distribuição em aspersão, quantificando-a através de um índice estatístico; denominado coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC). Diante disso, para uma melhor compreensão sobre a classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen, observe a (Tabela 8).

Tabela 8- Classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen.

Classificação	CUC
	%
Excelente	> 90
Bom	80 - 90
Razoável	70 - 80
Ruim	60 - 70
Inaceitável	< 60

Fonte: Bernardo, Soares e Mantovani, 2006.

4. RESULTADO E DISCURSSÃO

4.1 Uniformidade da distribuição de chuva

O simulador de chuva constituído de um mecanismo da família dos sistemas articulados nos testes da uniformidade de distribuição de chuva apresenta classificação do coeficiente de uniformidade de Christiansen razoável. Entre tais parâmetros estabelecidos, permitem avaliar uma não uniformidade de distribuição de água no sistema quando a irrigação não se apresenta igual em todas parcelas da área molhada.

A tabela 9 e a tabela 10 abordam os resultados obtidos das lâminas durante o teste na primeira repetição e na segunda repetição. Diante destes resultados nota-se um baixo valor de uniformidade de distribuição (UD) em ambos os resultados. Portanto, indica perda excessiva de água.

Tabela 9 – Uniformidade de distribuição na primeira repetição

REPETIÇÃO 01	Lâmina				
	(mm)				
	98,5	103,6	100,4	98,9	94,1
	73,3	76,0	76,1	75,5	71,1
	74,3	76,0	76,8	103,0	70,5
	72,1	75,5	75,1	70,5	67,2
	101,6	100,4	99,9	95,5	81,4

Fonte: Autor (2023).

Tabela 10 – Uniformidade de distribuição na segunda repetição

REPETIÇÃO 02	Lâmina				
	(mm)				
	98,8	103,4	104,8	105,2	101,3
	73,9	78,0	77,8	78,8	74,2
	80,2	78,8	80,6	110,4	75,3
	75,7	79,0	80,0	75,5	73,0
	105,2	108,9	108,6	106,8	93,2

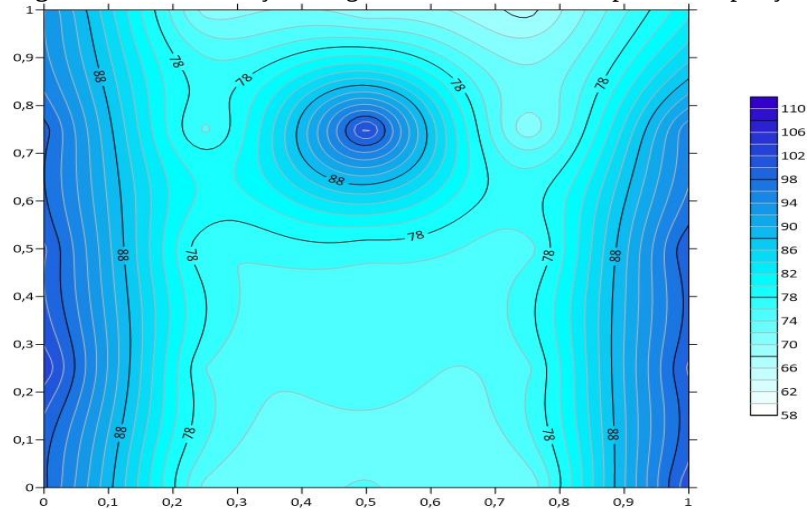
Fonte: Autor (2023).

Para sistema de irrigação por aspersão como os simuladores de chuva é recomendável uma alta uniformidade de distribuição de água, com UD superior a 80%. Na tabela 9 e a tabela 10 este valor não é alcançado, uma vez que, obtém-se uniformidade de distribuição razoável.

O Coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), é diretamente ligado a uniformidade de distribuição. Diante disso, nota-se na Figura 58, um gráfico representando um resultado de CUC insatisfatório, ou seja, uma razoável uniformidade da água distribuída, segundo as informações da tabela (Tabela 8). Pois, a concentração de água nas extremidades e

em uma pequena parte do centro da área experimental é maior e nas regiões intermediária ao centro e a extremidade é menor. A cor azul escuro representa uma maior concentração de água e azul claro uma menor. Portanto, estes dados representam um fator crítico de não homogeneidade do volume de água como é possível visualizar abaixo.

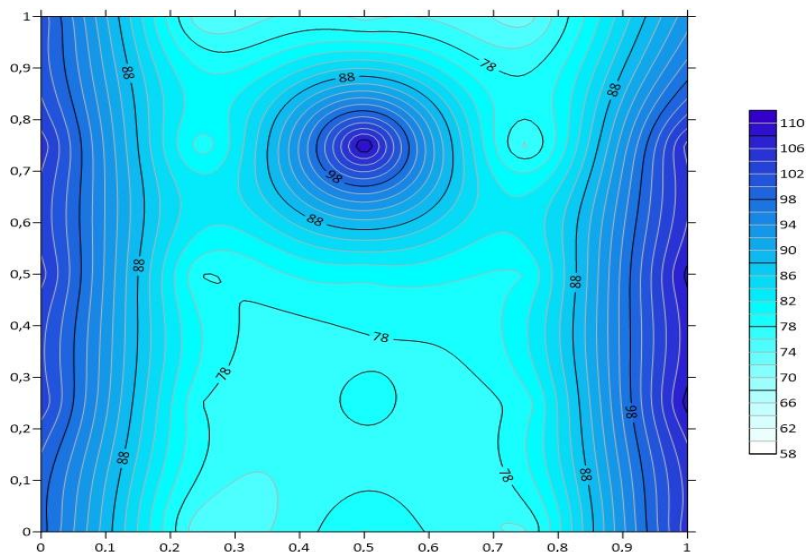
Figura 58 – Concentração de água na área de ensaio na primeira repetição.



Fonte: Autor (2023).

Os resultados da segunda repetição se encontram representados por um gráfico através da Figura 59, quando comparado com a repetição anterior resulta em uma distribuição ainda razoável, porém com uma concentração intermediária entre o centro e a extremidade um pouco mais homogêneo e uma concentração de água nas extremidades e centro, levemente menor.

Figura 59 – Concentração de água na área de ensaio na segunda repetição



Fonte: Autor (2023).

Diante dos resultados de CUC e UC não satisfazer os parâmetros estabelecidos por Christiansen. Nota-se que, o simulador de chuva composto por um mecanismo com sistema articulado indica problema de distribuição da irrigação. Uma vez que, para a economia e produção, torna-se um sistema mais caro, com redução à produção da cultura.

Porém os resultados de uniformidade de Christiansen (CUC), para o simulador de chuva constituído de mecanismo de um par de engrenagem cilíndrica de dentes retos, com bico oscilante VeeJte 80.100 utilizado na área de 1 m^2 de comprimento com sobra de $0,20\text{ m}^2$ e $0,40\text{ m}^2$ de largura apresentou percentual médio de 87%. Portanto, segundo a (Tabela 8) o coeficiente de uniformidade de Christiansen, consta como boa. Sua aplicação foi trabalhada com uma intensidade de 90 mm h^{-1} a uma pressão de 5 m. c. a.

As Figuras 60 e 61 aborda resultados gráficos da água distribuída por igual na área de ensaio. Neste simulador atual fez duas repetições. Na primeira, obtém um UC dentro dos parâmetros e um CUC, também. Em comparação com a segunda repetição, o valor do Coeficiente de distribuição da segunda repetição é mais homogêneo em maior área, isto é devido o mecanismo utilizado, uma vez que, apresenta uma velocidade constante sem paradas intermitentes no final do curso, atingindo assim uma maior área experimental. Os dados das repetições dos valores das lâminas se encontram nas Tabelas 11 e 12.

Tabela 11 – Uniformidade de distribuição na primeira repetição do SC atual.

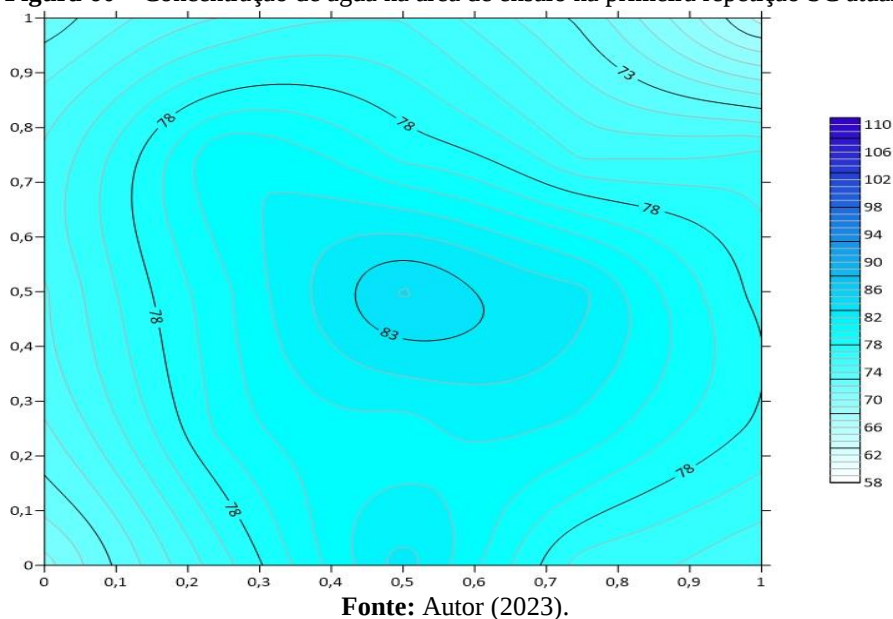
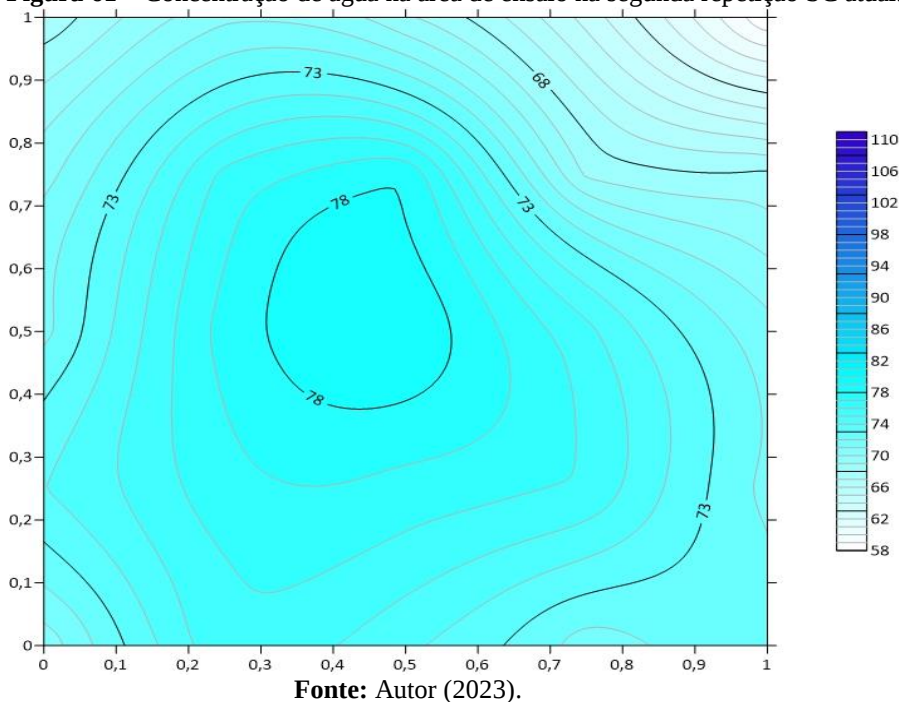
REPETIÇÃO 01	Lâmina				
	(mm)				
	70,6	73,9	74,9	75,2	72,3
	76,6	79,4	79,8	81,0	75,0
	82,4	80,5	84,1	78,7	75,9
	76,5	80,7	82,2	75,8	72,7
	75,1	77,8	77,6	76,3	66,6

Fonte: Autor (2023).

Tabela 12 – Uniformidade de distribuição na segunda repetição do SC atual.

REPETIÇÃO 02	Lâmina				
	(mm)				
	70,3	74,0	71,7	70,6	67,2
	75,8	76,6	77,4	76,3	70,8
	74,2	76,6	78,8	77,8	69,2
	71,5	75,8	75,3	68,8	64,6
	72,5	71,7	71,4	68,2	58,1

Fonte: Autor (2023).

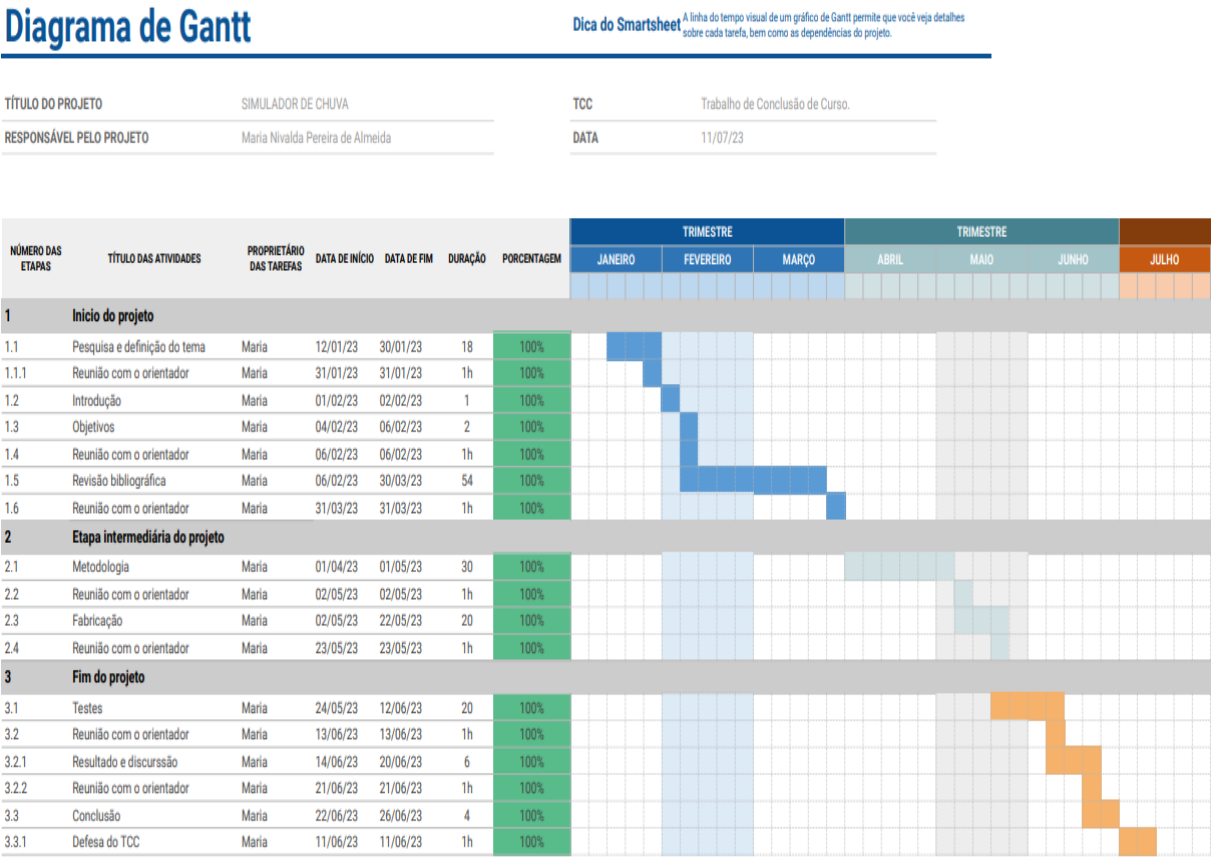
Figura 60 – Concentração de água na área de ensaio na primeira repetição SC atual.**Figura 61** – Concentração de água na área de ensaio na segunda repetição SC atual.

Logo, o resultado obtido do simulador de chuva atual afirma um desempenho satisfatório, diferente do sistema antigo. Pois, alguns pesquisadores apontam que o funcionamento do simulador de chuva deve apresentar energia cinética similar a um evento chuvoso natural acima de 75% (GOMES et al., 2020). Portanto, Montebeller et al. (2001) afirmam que valores de CUC acima de 80% são aceitáveis para a uniformidade de distribuição em simuladores de chuva.

5. CRONOGRAMA

O diagrama de Gantt é uma ferramenta visual de acompanhamento e de gerenciamento de cronograma de projetos. Na Figura 62 aborda esta representação desde o início da escolha do tema, referencial teórico ou geração de conceitos, protótipo, fabricação, montagem e testes que se encontram na metodologia, até os resultados, discussão e conclusão. Além disso, é possível identificar quais tarefas são paralelas e quais são independentes, bem como classificar os processos necessários para um bom andamento do projeto.

Figura 62 – Diagrama de Gantt.



Fonte: Autor (2023).

6. CONCLUSÃO

A proposta de construir um simulador de chuva de laboratório e de ensaio de campo foi realizada com sucesso, utilizando tubos de metalon fabricados de aço carbono concentrado e material ABS.

O resultado obtido com o projeto foi satisfatório, pois o dimensionamento correto dos pares de engrenagens cilíndricas de dentes retos apontou-se uma distribuição uniforme da água aplicada por aspersão na área experimental segundo os testes baseado no método de Christiansen. Visto que, teve resultados de CUC acima de 85% para culturas sensíveis e de raízes rasas, entre 75% e 83% para culturas com sistema radicular de média profundidade, e acima de 70% para casos de sistema radiculares profundos. Pois, para culturas com profundidade média do sistema radicular recomendam-se valores entre 82% a 88% para CUC.

Como trabalhos futuros sugiro a confecção de um sistema de simulador de chuva de campo com uma estrutura superior maior para permitir uma melhor abrangência da área experimental e assim, melhores resultados de uniformidade da água na superfície.

REFERÊNCIAS

- ACOMAIS. Tubometalon: Tudo sobre os tubos industriais nos formatos quadrado e retangular. Acomais.com.br. [S.I] [2022]. Disponível em: <https://acomais.com.br/tubo-metalon-saiba-tudo/>. Acesso em: 12 de junho de 2023.
- ALVES SOBRINHO, TEODORICO; FERREIRA, PAULO A.; PRUSKI, FERNANDO F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 6, p. 337-344, 2002.
- ARAGÃO, RICARDO DE et al. Estimativa dos parâmetros do modelo distribuído WESP com dados da bacia experimental de Sumé-PB. 2000.
- BASTOS, CEZAR AUGUSTO BURKERT. Estudo geotécnico sobre a erodibilidade de solos residuais não saturados. 1999.
- BELLINASSO, TARCISIO BARCELLOS; SCHNEIDER, VANIA ELISABETE. Perdas de solo para condição da parcela de wischmeier: estimativa para diferentes tipos de solo do estado do Rio Grande Do Sul. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 11, p. 22709-22717, 2019.
- BENITO RUEDA, E. et al. Descripción y puesta a punto de un simulador de lluvia de campo para estudios de escorrentía superficial y erosión del suelo. 2001.
- BERNARDO, A. S.; SOARES A. A.; MANTOVANI, E. C. Irrigação e drenagem. Viçosa: Ed. UFV, 2006.
- BEZERRA, SANDRO AUGUSTO; CANTALICE, JOSÉ RAMON BARROS. Erosão entre sulcos em diferentes condições de cobertura do solo, sob cultivo da cana-de-açúcar. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 30, p. 565-573, 2006.
- BUDYNAS, R. G.; NISBETT, J. K. Elementos de Maquinas de Shigley: Projeto de Engenharia Mecânica. 8. ed. Porto Alegre: Amgh, 2011.
- CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba. EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Solos do Nordeste. Unidade de execução de Pesquisa e Desenvolvimento de Recife, 2014, p. 8. Disponível em: Acesso em: 04 de junho de 2022.
- COMMANDEUR, PAUL R. Soil erosion studies using rainfall simulation on forest harvested areas in British Columbia. In: *Proceeding of the international symposium on Erosion, Debris Flows and Environment in Mountain Regions*. IAHS publication. 1992. p. 21-23.
- CARVALHO, J. C. Condição dos agregados e da constituição microbiológica de solos submetidos a diferentes usos e manejos agrícolas em Selverínia. Campinas, Universidade Estadual de Campinas, 2006. 97p. 2006. Tese de Doutorado. Tese de Mestrado.
- COSSOL, ELEMAR ANTONINO; LIMA, Vladimir Silva De. Erosão entressulcos sob diferentes tipos de preparo e manejo do solo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 2003, 38.1:117-124.
- COSTA, Anderson Porto. Prototipagem e desenvolvimento de um aplicativo para dimensionamento de engrenagens cilíndricas de dentes retos. 2019.
- COSTA, TAIARA SOUZA et al. Estimativa do balanço hídrico climatológico e classificação climática para o município de Bom Jesus da Lapa-BA. *Revista Ifes Ciência*, v. 5, n. 2, p. 208-216, 2019.
- COVERT, ASHLEY; JORDAN, PETER. A portable rainfall simulator: techniques for understanding the effects of rainfall on soil erodibility. *Streamline Watershed Management Bulletin*, v. 13, n. 1, p. 5-9, 2009.
- CHRISTIANSEN, E. J. Irrigation by sprinkler. Berkeley: University of California, 1942. 124p. (Bulletin, 670).
- DE SOUSA, FILIPE. LIMITES DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: uma revisão! *Revista Craibeiras de Agroecologia*, v. 4, n. 2, 2019.

DOS SANTOS, JOSÉ YURE GOMES; SANTOS, CELSO AUGUSTO GUIMARÃES; DA SILVA, Richarde Marques. Perdas de água e solo utilizando chuva simulada em diferentes coberturas superficiais e condições de umidade no Semiárido Paraibano. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, p. 217-228, 2012.

DUARTE, C.C.; NÓBREGA, R. S.; COUTINHO, R. Q. Análise climatológica e dos eventos extremos de chuva no município do Ipojuca, pernambuco. *Revista de Geografia (UFPE)* vV. 32, nNo. 2, 2015.

ELLISON, W. D. Soil erosion studies- part II: soil detachment hazard by raindrop splash. *Agricultural Engineering*, St. Joseph, v. 28, n. 5, p. 197-201, may, 1947b.

FADUL, Júlia Cavalcanti et al. Estudo de processos erosivos com a utilização do simulador de chuvas. SEMOC-Semana de Mobilização Científica-Reforma Universitária Que Universidade o Brasil Quer? 2004.

FERTIG, Bruno Lessmann. Estudo experimental da cementação sólida em engrenagens cilíndricas de dentes retos (módulo 2) de aço SAE 8620. 2021.

FIGUEREDO, E. E. (1988). Scale effects and land use change impacts in sediment yield modeling in a semi-arid region of Brazil. Ph. D Thesis, Department of Civil Engineering, University of Newcastle upon tyne, Newcastle, Uk.

FONSECA, CAIO SILVA. Erosão hídrica em neossolos regolíticos do Estado de Alagoas sob diferentes taxas de cobertura morta. 2019.

FLORES, PAULO; CLARO, JOSÉ CARLOS PIMENTA. Cinemática de mecanismos 1: introdução ao estudo de mecanismos. 2005

GOMES, C.; SANTOS, M. A. L.; LIMA, S. F.; SANTOS, I. G. O.; CARVALHO, T. N. A.; SANTOS, V. R.; ALVES, E. S. Calibração de um sistema de chuva simulada por diâmetro da gota pelo método da Farinha e coeficiente de uniformidade. *Ciência Agrícola*, Rio Largo, v. 18, n. 3, p. 43-47, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv6n8-519>. Acesso em: 16 jun. 2023.

GTmax3D. Catálogo virtual H4 pdf. [A.I] [2014?]. Disponível em: < https://www.gtmax3d.com.br/imprensa-3d-pro/gtmax3d-core-h4?gclid=EAIaIQobChMIgMflwIvN_wIVcTbUAR13agyKEAAYASAAEgL4pfD_BwE>. Acesso em: 5 de junho de 2023.

ISIDORO, J. M. G. P.; SILVEIRA, A.; LIMA, B. O. Development of a large-scale rainfall simulator for urban hydrology research Eng. Sanit. Ambient, v.27, n.1, p. 169-173, jan/fev. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220200365>. Acesso em: 20 maio. 2023

LIMA, LUAN ALVES. Variabilidade espacial de atributos do solo em Sistema de terraços em região Semiárida. 2018.

MABIE. HAMILTON.H. M111 m Mecanismos I Hamilton H. Mabie [e] Fred W. Ocvirk; tradução de Edival Ponciano de Carvalho. -- 2. ed. - Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 1980.

MOODY, JOHN A. et al. Linking runoff response to burn severity after a wildfire. *Hydrological processes: An International Journal*, v. 22, n. 13, p. 2063-2074, 2008.

MONTENEGRO, A. A. A.; LOPES, I.; ALMEIDA, T. A. B.; LIMA, J. L. M. P.; MONTENEGRO, H. G. L. A.; ARAÚJO, B. G. Impacto de métodos naturais para conservação de água e solo no Semiárido Brasileiro. *FAVE Sección Ciencias Agrarias*, vol. 19, n° 2, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.14409/fa.v19i2.9749>. Acesso em: 25 nov. 2022.

MEYER, L.D. Rain falls simulators for soil erosion research. In: LAL, R. (Ed). *Soil Erosion Research Methods*. Delray Beach: St. Lucie Press. 1994, p. 83-103.

MONTEBELLER, Claudinei A. et al. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 5, p. 1-5, 2001.

MONTEBELLER C. A.; CARVALHOS D. F.; SOBRINHOS A. T.; NUNES A. C. S.; RUBIOS E. Avaliação hidráulica e um simulador de chuvas pendular. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.5, n.1, p.1-5, 2001.

NETO, MANUELLA VIEIRA BARBOSA et al. Degradação do solo por erosão em área vulnerável à desertificação no semiárido pernambucano. *Os Desafios da Geografia Física na Fronteira do Conhecimento*, v. 1, p. 4406-4416, 2017.

NORTON, R. L. Projeto de máquinas: uma abordagem integrada. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

PALL, R.; DICKINSON, W. T.; REALS, D.; MCGIRR, R. Development and calibration of a rainfall simulator. *Canadian Agricultural Engineering*. Vol. 25. n. S. F. 181 – 187, 1983.

PONCIANO, VANESSA DE FÁTIMA GRAH, DE SIQUEIRA GAMA, L. M., & SILVA, M. R. K.S. Desenvolvimento de um simulador de chuva pendular portátil. *Revista Ciência Agrícola*, v. 19, n. 1, p. 17-24, 2021.

PORTO, EVERALDO ROCHA ET AL. Agricultura bioassalina: desafios e alternativas para o uso de águas salobras e salinas no semiárido brasileiro. 2019.

POSSAMAI, EDIVAN JOSÉ et al. Adoption of the no-tillage system in Paraná State: A (re) view. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 46, 2022.

SANTOS, C. A.G. (1994). Runoff-erosion Process Modeling and Determination of Model Parameters. M.Sc. Dissertation, Department of Civil Engineering, Ehime University, Japan.

SANTOS, T. E. M. Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semiárido pernambucano. 2006. Tese de Doutorado. MSc. Thesis, Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, Brasil.

SANTOS, T. E. M. (2006). Avaliação de técnicas de conservação de água e solo em bacia experimental do semi-árido Pernambucano. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 69p.

SANTOS, T. E. M. (2010). Dinâmica espacial e temporal de umidade em bacia Experimental do semi-árido Pernambucano. Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 83p.

SANTOS, C. G. DOS. Desenvolvimento de um sistema de controle automático para simulador de chuvas. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), 2015).

SANTOS, CÉSAR GABRIEL DOS et al. Sistematização de conhecimento para qualificação de pontas aspersoras para simuladores de chuva. 2017. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Maria.

SENA, J. P. O.; RIBEIRO, G. N. Eventos extremos de precipitação no sertão paraibano: Variação espaço-temporal. *Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável*, v. V.12, n. Nº 4, p. 748-755, 2017.DOI: <http://dx.doi.org/10.18378/rvads.v12i4.4938>.

SILVA, Maria Luana Oliveira et al. Áreas degradadas no Semiárido: Causas, situação e alternativas de recuperação. *Ciências Rurais em Foco* Volume 3, p. 22, 2021.

SILVA, J. J. Da.; Bezerra, S. A.; Ribeiro, P. R.; Barros, A. P. S. De M.; Silva, E. De L.; Pereira, R. A. Determinação das Médias dos Diâmetros das Gotas de um Simulador de Chuvas para servir de Ferramenta para Pesquisas Científicas Relacionadas à Erosão Hídrica Utilizado o Método da Farinha de Trigo. XXXV Congresso Brasileiro de Ciência d Solo, 2015.

SOUZA, M.D. Desenvolvimento e utilização de um simulador de chuvas para estudos de atributos físicos e químicos do solo relacionados a impactos ambientais. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 20p.

SOUZA, S. F.J.; SIQUEIRA, E, Q. Development and Calibration of a Rainfall Simulator for Urban Hydrology Research. 12th International Conferences on Urban Drainage. Porto Alegre-Brail, 11- 16 September. 2011.

SPOHR, RENATO BEPPLER et al. Desenvolvimento e validação de um simulador de chuvas portátil. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 20, n. 2, p. 411-417, 2015.

REZENDE, R.; FRIZZONE, J. A.; GONÇALVES, A. C. A.; FREITAS, P. S. L. Influência do espaçamento entre aspersores na uniformidade de distribuição de água acima e abaixo da superfície do solo. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v. 2, n. 3. Campina Grande, PB, DEAg/UFPB. 1998. p.257-261.

RIBEIRO, BRUNO TEIXEIRA. Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um Cambissolo. 2006. Tese de Doutorado. Dissertação de mestrado. Lavras: UFLA.