

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

César Gabriel dos Santos

**SISTEMATIZAÇÃO DE CONHECIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO
DE PONTAS ASPERSORAS PARA SIMULADORES DE CHUVA**

Santa Maria, RS
2017

César Gabriel dos Santos

**SISTEMATIZAÇÃO DE CONHECIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO DE PONTAS
ASPERSORAS PARA SIMULADORES DE CHUVA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola.**

Orientador: Leonardo Nabaes Romano, Dr. Eng. Mec.

Santa Maria, RS
2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Santos, César Gabriel dos
Sistematização de conhecimento para qualificação de
pontas aspersoras para simuladores de chuva / César
Gabriel dos Santos.- 2017.
170 p.; 30 cm

Orientador: Leonardo Nabaes Romano
Tese (doutorado) - Universidade Federal de Santa
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós
Graduação em Engenharia Agrícola, RS, 2017

1. Ponta aspersora 2. Chuva simulada 3. Modelagem de
Processos I. Romano, Leonardo Nabaes II. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a César Gabriel dos Santos. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

E-mail: cesarhz@hotmail.com

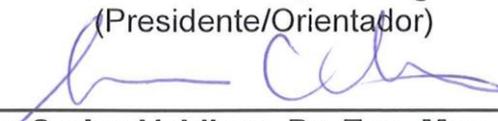
César Gabriel dos Santos

**SISTEMATIZAÇÃO DE CONHECIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO DE
PONTAS ASPERSORAS PARA SIMULADORES DE CHUVA**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração Mecanização Agrícola, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor em Engenharia Agrícola**.

Aprovado em 15 de dezembro de 2017

Leonardo Nabaes Romano, Dr. Eng. Mec. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



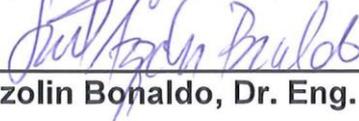
Antônio Carlos Valdiero, Dr. Eng. Mec. (UNIJUI)



Alexandre Russini, Dr. Eng. Agr. (UNIPAMPA)



Alexandre Aparecido Buenos, Dr. Eng. Mec. (UFSM)



Saul Azzolin Bonaldo, Dr. Eng. Agr. (UFSM)

Santa Maria, RS
2017

A DEUS

Aos meus pais Graciolino Silva dos Santos e Devanir Vanzan dos Santos

A minha irmã Bruna Karine dos Santos

A minha noiva Ana Eloisa Muller Sipp

Expresso especialmente a minha gratidão a:

- Meu orientador Professor Leonardo Nabaes Romano, pelas horas dedicadas na orientação e ensinamentos sobre projeto. Por ter acreditado no meu potencial e motivando em seguir os estudos em projetos.
- Meu colega e amigo Saul Azzolin Bonaldo, por toda ajuda disponibilizada.
- Ao Professor Jean Paolo Gomes Minella pelas valiosas contribuições na realização dos experimentos.
- Aos Professores Inácio da Fontoura Limberger, Carlos Eduardo de Souza, Carlos Eduardo Guex Falcão, Alexandre Buenos e demais professores da Engenharia Mecânica pela amizade e acolhimento na Universidade Federal de Santa Maria.
- Aos colegas do laboratório LPST (Laboratório de Projeto de Sistemas Técnicos), especialmente Álvaro Ricardo Augustin, André Kinalski Bender, Gilmar Fernando Vogel, Giuliani Facco, José Carlos Lorentz Aita, Luíza Manfio Imig, Maikel Schmitt, Marianna Dutra, Willian Belinazzo e demais colegas que passaram pelo LPST, incluindo meu amigo Luis Fernando Nicolini.
- Ao Colégio Técnico Industrial de Santa Maria - CTISM/UFSM pelo espaço disponibilizado para a realização dos experimentos juntamente a todos que tornaram possível a realização da coleta de dados experimentais.
- Aos Professores Reimar Carlesso e Mirta Teresinha Petry pelas valiosas contribuições na avaliação da eficiência de sistemas aspersores.
- A Luciana Nunes de Oliveira, secretaria do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGEA) pela assistência nos assuntos institucionais.
- Aos meus colegas professores da Universidade Federal de Santa Maria Campus Cachoeira do Sul, Lucas Delongui, Rogério Brittes da Silva, Anderson dal Molin, Juan Galvarino Cerda Balcazar, Alejandro Ruiz Padillo, Alessandro Onofre Rigão, Paulo Carteri Coradi, Cristiane Cauduro Gastaldini e demais professores pelo acolhimento e motivação para conclusão deste trabalho.
- Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento do projeto até o presente momento.

RESUMO

SISTEMATIZAÇÃO DE CONHECIMENTO PARA QUALIFICAÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS PARA SIMULADORES DE CHUVA

AUTOR: César Gabriel dos Santos
ORIENTADOR: Leonardo Nabaes Romano, Dr. Eng. Mec.

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 na 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 ambiente controlado. Os diferentes requisitos para a geração de chuva simulada tornam complexo o projeto de um modelo genérico de simulador de chuva, sendo a fase de seleção da ponta aspersora uma das mais importantes. Desta forma, a seleção é baseada na consulta a catálogos técnicos, recomendações de fabricantes ou adotam em seus projetos modelos de pontas que foram validadas em outras concepções de simuladores de chuva. Com isso, a tese tem como objetivo sistematizar o conhecimento do processo de qualificação de pontas aspersoras para a geração de chuva simulada. A metodologia para realização do projeto foi estruturada em duas etapas: (i) materiais e métodos experimentais, onde foram realizadas em laboratório análises experimentais de três modelos de pontas aspersoras, variando a altura e pressão para analisar o coeficiente de uniformidade da área molhada de 1 m² e 0,36 m². Utilizando um disdrômetro foi determinado o tamanho da gota, intensidade, velocidade de queda e energia cinética das diferentes chuvas simuladas geradas. O conjunto de informações geradas na etapa experimental permitiu identificar informações das entradas, saídas, mecanismos e controles que devem estar presentes no modelo de qualificação. (ii) o processo foi modelado utilizando o IDEF0, que consiste numa representação gráfica de blocos ligados por setas que indicam o fluxo do processo sendo organizados de uma forma clara e sistemática. Com a análise experimental foi verificado que para a área de 1 m², seis combinações foram classificadas com um índice de uniformidade bom ou excelente, já para a área de 0,36 m², onze combinações foram classificadas em excelente ou bom. Os resultados do disdrômetro indicam que a energia cinética das chuvas simuladas geradas pelas três pontas aspersoras não é similar as chuvas naturais para as mesmas intensidades. Com relação ao modelo, com a elaboração da árvore de nós foi definido doze pontos-chaves do processo, bem como a definição de quatro níveis de detalhamento do modelo. O modelo é constituído por cinquenta e nove atividades organizadas nos doze nós. Conclui-se que, os melhores índices de uniformidade da área molhada foram obtidos na área de 0,36 m². Verificou-se que, as gotas geradas pelas pontas aspersoras analisadas não reproduzem a energia cinética da chuva natural para a mesma intensidade. O modelo desenvolvido representa o processo de qualificação de forma clara e sistemática contemplando os aspectos importantes na qualificação de um aspersor para o projeto de simulador de chuva.

Palavras-chave: Ponta aspersora; Chuva simulada; Modelagem de Processos

ABSTRACT

KNOWLEDGE SYSTEMS FOR QUALIFICATION OF SPRAYING POINTS FOR RAIN SIMULATORS

AUTHOR: CÉSAR GABRIEL DOS SANTOS
ADVISOR: LEONARDO NABAES ROMANO, DR. ENG. MEC

In agriculture, water acts in all physiological processes, biochemical and also in the thermal regulation of crops. Excess water in the form of rainfall generates losses of agricultural production, mainly due to the effects of water erosion, runoff and the removal of phytosanitary products after their application. In this sense, they are used as rain simulators to perform agricultural experiments simulating as characteristics of natural rainfall in a controlled environment. The different requirements for a simulated rainfall generation make complex the design of a generic model of rain simulator, with the selection phase of the sprinkler tip being one of the most important. In this way, the selection and dissemination in the consultation of technical catalogs, recommendations of manufacturers or adopt in their projects models of tips that have been validated in other conceptions of rain simulators. With this, it is what aims to systematize the knowledge of the tip qualification process for a simulated rainfall generation. A methodology for the realization of the project was structured in two stages: (i) experimental materials and methods, where they are carried out in the laboratory, analyzes experiments of three models of nozzle bridges, varying a height and pressure for the uniformity coefficient analyzer of the wet area of 1 m² and 0.36 m². Using a disdrometer was determined on the drop size, intensity, fall velocity and kinetic energy of the different simulated rainfall generated. The set of information generated in the experimental stage allowed to identify the information of inputs, outputs, mechanisms and controls that are not available. (ii) The process was modeled using IDEF0, which consists of graphical representation of blocks connected by arrows that indicate the process flow in organization in a clear and systematic way. With an experimental analysis to verify for an area of 1 m², six combinations were classified with a good or excellent uniformity index, already for an area of 0.36 m², eleven combinations were classified as excellent or good. The results of the disdrometer indicate that the kinetic energy of the simulated rains generated by the three sprinkler tips are not similar to natural rains for their same origins. Regarding the model, with a US Source elaboration was defined twelve key points of the process, as well as a definition of four levels of detail of the model. The model consists of fifty-nine activities organized in the twelve nodes. It was concluded that the best wetness indexes of the wet area were obtained in the area of 0.36 m². It has been found that as droplets generated by the sprinkler tips analyzed do not reproduce the kinetic energy of natural rainfall for the same person. The developed model represents the qualification process in a clear and systematic way contemplating the important aspects in the qualification of a nozzle for the rain simulator project.

Keywords: Nozzle spray; Simulated rain; Process Modeling

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Conceito de simulador de chuva com disco perfurado rotacional.....	32
Figura 2 - Conceito de simulador de chuva com disco perfurador rotacional.....	33
Figura 3 - Conceito de simulador de chuva para grandes áreas.....	33
Figura 4 - Conceito de simulador de chuva de laboratório.....	34
Figura 5 - (a) Conceito do tipo empuxo. (b) Primeiro conceito de simulador de chuva com braços rotativos do tipo empuxo.....	35
Figura 6 - Patente de simulador de chuva portátil - BR 102015009204-0 A2.....	36
Figura 7 - Processo de desintegração de um filme líquido.....	39
Figura 8 - Diagrama esquemático para a fragmentação de um jato de fluido.....	39
Figura 9 - Componentes de um bico aspersor.....	42
Figura 10 - Sistema de codificação do produto.....	44
Figura 11 - Principais tipos de padrões de pulverização.....	44
Figura 12 - Tipos padrão de pulverização.....	45
Figura 13 - Tipos de pontas aspersoras: (a) indução de ar Venturi; (b) leque plano de faixa estendida; (c) leque plano com pré-orifício; (d) com defletores e (e) aplicações especializadas.....	47
Figura 14 - Ano de publicação dos coeficientes de uniformidade.....	49
Figura 15 - Disdrômetro Parsivel 2 OTT.....	53
Figura 16 - Aspersor do tipo jato-placa.....	55
Figura 17 - Bancada experimental para estudo da formação de gotas.....	55
Figura 18 - Etapas das diretrizes para ensaio de erosão dos solos com simulador de chuvas.....	56
Figura 19 - Patente de invenção US 2007/0069047 A1.....	59
Figura 20 - Patente de modelo de utilidade MU 9101260-0 U2.....	59
Figura 21 - Registro de desenho industrial US D484,411 S.....	60
Figura 22 - Mapa global do depósito das patentes de “spray nozzles”.....	62
Figura 23 - Patentes depositadas de 1935 – 2016.....	63
Figura 24 - Caminho de migração para melhoria do PDP.....	65
Figura 25 - Representação de diagrama, mapa e modelo de processo.....	66
Figura 26 - Exemplo de representação utilizando BPMN.....	68
Figura 27 - Exemplo de representação utilizando fluxograma.....	68
Figura 28 - Exemplo de representação utilizando EPC.....	69
Figura 29 - Exemplo de representação utilizando UML.....	70
Figura 30 - Exemplo de representação de mapeamento de fluxo de valor.....	71
Figura 31 - Exemplo de representação de mapeamento de processo por IDEF0.....	72
Figura 32 - Estrutura de representação do IDEF0.....	73
Figura 33 - Modelagem da cadeia produtiva do biodiesel utilizando IDEF0.....	74
Figura 34 - Modelagem do processo de projeto e construção utilizando IDEF0.....	74

Figura 35 - Processo, macrofase, fases e saídas de referência para o PDMA.	76
Figura 36 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Informacional.	77
Figura 37 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Conceitual.	77
Figura 38 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Preliminar.	78
Figura 39 - Esquema macro da bancada experimental.	82
Figura 40 - Esquema detalhado da bancada experimental.	83
Figura 41 - Mecanismo utilizado para controle da pressão.	84
Figura 42 - Montagem da bancada experimental.	84
Figura 43 - Vista isométrica da bancada experimental utilizada para identificar a uniformidade.	85
Figura 44 - Distribuição dos coletores e do ponta aspersora.	86
Figura 45 - Demonstrativo da área utilizada para calcular a uniformidade de distribuição.	87
Figura 46 - Esquema de posicionamento do disdrômetro.	88
Figura 47 - Tela do programa computacional OTT ASDO.	89
Figura 48 - Estrutura da árvore de nós do processo IDEF0.	92
Figura 49 - Modelo gráfico utilizado para representar o processo.	93
Figura 50 - Ordem de apresentação do modelo proposto.	95
Figura 51 - Árvore de nós da proposta de modelo.	106
Figura 52 - Processo nível A.0 – Qualificar aspersor para simulador de chuva.	107
Figura 53 - Processo nível A.0 expandido.	108
Figura 54 - Processo nível A.1 – Selecionar mecanismo aspersor.	110
Figura 55 - Processo nível A.2 – Selecionar fonte de água.	111
Figura 56 - Processo nível A.3 – Caracterizar chuva simulada gerada.	113
Figura 57 - Processo nível A.3.1 – Medir uniformidade da chuva simulada gerada.	114
Figura 58 - Processo nível A.3.1.1 – Preparar bancada para medir uniformidade da chuva simulada.	116
Figura 59 - Processo nível A.3.1.2 – Configurar a geração da chuva simulada.	119
Figura 60 - Processo nível A.3.1.3 – Coletar dados da uniformidade.	120
Figura 61 - Processo nível A.3.2 – Parametrizar gotas de chuva simulada.	122
Figura 62 - Processo nível A.3.2.1 – Preparar bancada experimental para parametrizar as gotas de chuva simulada gerada.	125
Figura 63 - Processo nível A.3.2.2 – Coletar dados dos parâmetros das gotas.	127
Figura 64 - Visão macro do modelo de qualificação.	133

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação do tamanho das gotas ASABE 572.1	43
Quadro 2 - Pontas aspersoras selecionados.....	80
Quadro 3 - Combinação experimental adotado.....	81
Quadro 4 - Modelo de planilha para organização dos dados.	87
Quadro 5 - Planilha modelo para anotação dos valores medidos pelo disdrômetro.	90
Quadro 6 - Planilha modelo para anotação dos valores calculados da energia cinética.	91
Quadro 7 - Tipos de conexões entre os processos.	93
Quadro 8 - Grau de aceitação do CUC para a área de 1 m ²	98
Quadro 9 - Grau de aceitação do CUC para a área de 0,36 m ²	99
Quadro 10 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 50 kPa.	101
Quadro 11 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 100 kPa.	101
Quadro 12 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 150 kPa.	101
Quadro 13 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 50 kPa.	101
Quadro 14 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 100 kPa.	102
Quadro 15 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 150 kPa.	102
Quadro 16 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 50 kPa.	102
Quadro 17 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 100 kPa.	102
Quadro 18 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 150 kPa.	103
Quadro 19 - Valores de energia cinética medidos pelo disdrômetro e calculados pelas equações matemáticas.	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BPMN	<i>Business Process Model and Notation</i>
CUA	Coeficiente de Uniformidade Absoluto
CUBH	Coeficiente de Uniformidade de Benami e Hore
CUC	Coeficiente de Chistiansen
CUD	Coeficiente de Uniformidade de Distribuição
CUE	Coeficiente de Uniformidade Estatístico
CUH	Coeficiente de Uniformidade de Hart
DMV	Diâmetro Médio Volumétrico
EPC	<i>Event-driven Process Chain</i>
HDD	<i>Hard Disk Drive</i>
IDEF	<i>Integration Definition</i>
IDEF0	<i>Function Modeling</i>
LASER	<i>Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation</i>
LPI	Lei da Propriedade Industrial
ME	Modelo Específico
MR	Modelo de Referência
MRM	Modelo de Produtos Mecatrônicos
MR-PDMA	Modelo de Referência para o Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas
MT	Mapeamento Tecnológico
P1	Aspersor 1
P2	Aspersor 2
P3	Aspersor 3
PARSIVEL	<i>Particle Size Velocity</i>
PDMA	Processo de Desenvolvimento de Máquinas Agrícolas
PDP	Processo de Desenvolvimento de Produto
SM	Simulador de Chuva
UML	<i>Unified Modeling Language</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	21
1.1	QUESTÃO DE PESQUISA.....	25
1.2	OBJETIVOS	25
	1.2.1 Objetivo geral	25
	1.2.2 Objetivos específicos	25
1.3	CONTRIBUIÇÕES DA TESE	26
1.4	ESTRUTURA DA TESE	26
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	29
2.1	PRINCÍPIOS GERAIS DA CHUVA.....	29
	2.1.1 Simuladores de chuva	31
	2.1.2 Formação de gotas	38
	2.1.3 Bicos aspersores	41
	2.1.4 Padrões de aspersão	44
	2.1.5 Seleção de pontas aspersoras	48
	2.1.6 Avaliação de sistemas aspersores	48
	2.1.7 Medição da energia cinética das gotas de chuva	52
2.2	FORMALIZAÇÃO DE PROCEDIMENOS PARA ESTUDOS COM SIMULADORES DE CHUVA	54
	2.2.1 Metodologia para estudos de sistemas aspersores	54
	2.2.2 Protocolo para estudos de erosão dos solos utilizando Simulador de chuvas	56
2.3	PROPRIEDADE INDUSTRIAL	57
	2.3.1 Mapeamento tecnológico de pontas aspersoras	61
2.4	MODELAGEM DE PROCESSOS.....	63
	2.4.1 Mapeamento utilizando BPMN	67
	2.4.2 Mapeamento utilizando fluxogramas.	68
	2.4.3 Mapeamento utilizando EPC.	69
	2.4.4 Mapeamento utilizando UML	70
	2.4.5 Mapeamento utilizando <i>Value Stream Mapping</i>.	70
	2.4.6 Mapeamento utilizando IDEF.	71
	2.4.7 Processos de Desenvolvimento de Produtos	75
3	METODOLOGIA	79
3.1	MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS.....	79
	3.1.1 Planejamento experimental	79
	3.1.2 Descrição da bancada experimental	82
	3.1.3 Identificação da uniformidade da área molhada	85
	3.1.4 Parametrização das gotas de chuva geradas	88
3.2	ESTRUTURA DE REPRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	91
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	97
4.1	ANALISE EXPERIMENTAL.....	97

4.1.1	Uniformidade de distribuição da chuva simulada nas condições planejadas	97
4.1.2	Caracterização das gotas de chuva simulada utilizando disdrômetro	100
4.2	MODELO DO PROCESSO PARA QUALIFICAÇÃO DE ASPERSOR PARA SIMULADOR DE CHUVA.	105
4.3	CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO PROPOSTO.	129
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	135
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137
	ANEXO A – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS TEEJET	153
	ANEXO B – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS SPRAYING SYSTEMS PARA ÁREA TOTAL	154
	ANEXO C – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS SPRAYING SYSTEMS PARA APLICAÇÕES ESPECIAIS.	155
	ANEXO D – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS SPRAYING SYSTEMS PARA FERTILIZANTES LÍQUIDOS	156
	ANEXO E – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS JACTO.	157
	ANEXO F – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO DISDRÔMETRO OTT PARSIVEL.	158
	ANEXO G – QUADRO DE DESEMPENHO DAS PONTAS B1/4 HH-SS 14.5SQ E B1/8 HH-SS 3.6SQ.	159
	ANEXO H – QUADRO DE DESEMPENHO DA PONTA B1/4T-SS+TG-SS6..	160
	APENDICE A – PROTOCOLO PARA ENSAIO DE EROSIÃO DOS SOLOS UTILIZANDO SIMULADOR DE CHUVA.	163
	APENDICE B – VALORES DE CUC DAS 162 UNIDADES EXPERIMENTAIS	167

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as condições climáticas e ambientais favorecem às práticas agrícolas em grande parte do território. A estimativa da área cultivada de grãos para a safra de 2015/16 é de 58.529 mil hectares, um aumento de 1,03% com relação à safra de 2014/15 (CONAB, 2016).

Em muitos países a água consumida na agricultura pode atingir 70% do volume total de água disponível em seu território, sendo importante no ciclo de desenvolvimento da cultura (TUNDISI, 2008). Na cultura da soja, por exemplo, a água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em todos os processos fisiológicos e bioquímicos e também na sua regulação térmica. A necessidade de água na cultura aumenta com o seu desenvolvimento, atingindo o ápice durante a floração-enchimento de grãos (EMBRAPA, 2014).

As atividades agrícolas intensivas podem ocasionar diversos problemas, dentre eles, a erosão acelerada do solo, que afeta a capacidade produtiva do solo, ocasionando redução de sua porosidade, capacidade de retenção e infiltração de água, resultando em um aumento do escoamento superficial, transporte de sedimentos e degradação dos recursos hídricos (DURÃES; FILHO; OLIVEIRA, 2016), além de gerar grandes problemas financeiros e social em todo o mundo (LIMA et al., 2015).

A erosão hídrica é um processo que ocorre em três etapas: (a) desprendimento das partículas do solo; (b) transporte dos sedimentos; e (c) a deposição deste material em outro ponto. Sendo este o principal agente responsável pelo desprendimento das partículas é o impacto das gotas da chuva, dependente da energia cinética com que as gotas atingem a superfície (COLARES, 2016).

A água é um dos agentes que acelera o processo de erosão, agindo para separar as partículas e os agregados, é o principal meio de contaminação de mananciais de águas superficiais devido ao transporte de sedimentos e de produtos químicos (LIMA et al., 2015).

A erosão do solo é um dos processos de degradação ambiental mais impactante, no qual o seu mapeamento e sua avaliação resulta em uma importante ferramenta para a atividade de manejo e gestão dos recursos naturais, permitindo aos

gestores implementar políticas de uso e ocupação do solo de forma sustentável (DURÃES; FILHO; OLIVEIRA, 2016).

Desta forma, é importante ter à disposição informações especializadas sobre o comportamento do solo (DURÃES; FILHO; OLIVEIRA, 2016). Porém, devido às limitações ou escassez de disponibilidade de informações históricas de eventos pluviométricos, os pesquisadores têm utilizados sistemas técnicos, denominados de simuladores de chuva para gerar precipitações de chuva. Os simuladores de chuva aplicam água com possibilidade de controlar a intensidade da precipitação, o tamanho e a velocidade de impacto das gotas sobre a parcela do solo em estudo (MONTEBELLER et al., 2001).

A obtenção de dados de chuva com base nos registros pluviográficos é um processo de elevado custo além de demandar um período de tempo maior para a coleta dos dados. Com isso são utilizados diversos métodos para determinar, dentre os diversos parâmetros, a energia cinética das gotas de chuva: equações matemáticas, método da farinha de trigo, sistemas ópticos, gravação de imagem e disdrômetro (COLARES, 2016).

As gotas de chuvas têm sido intensivamente estudadas para o entendimento de suas dinâmicas e características com o propósito de avaliar, principalmente, os efeitos nas partículas de solo, especialmente erosividade (FERREIRA, 2010).

Neste contexto, verifica-se que a utilização de simuladores de chuva atua como uma importante ferramenta para acelerar a obtenção dos resultados e possibilitando estudar as chuvas com as mais diferentes características.

A pesquisa em laboratório por meio de simuladores de chuva permite o detalhamento e a reprodução de forma controlada de eventos complexos como é a chuva, onde é necessário obter tamanho de gota, energia cinética e uniformidade similares as chuvas naturais, além da rápida obtenção dos dados (ABRANTES; LIMA; MONTENEGRO, 2015).

Em função das diferentes concepções existentes, torna-se complexo o projeto de um modelo genérico de simulador de chuva, devido a variação da área da parcela, intensidade mínima e máxima e energia cinética da gota de chuva artificial (SANTOS, 2015). De uma forma geral, os simuladores de chuva são constituídos por uma fonte de fornecimento de água (rio, lago, açude ou um reservatório), sistema de recalque da água, tubos e conexões, estrutura de suporte e mecanismo formador de gotas. O mecanismo formador de gotas é um dos elementos mais importantes em um projeto

de simulador de chuva, pois é ele quem vai caracterizar o sistema como sendo um simulador de chuva e não um sistema de pulverização de água.

Da mesma forma que em um sistema de pulverização, o fluido não deve ser simplesmente pulverizado, mas aplicado. Em um simulador de chuva a água também não deve ser pulverizada sobre a área de estudo, mas aplicada, isso acarreta em utilizar um sistema aspersor (ponta) que permita gerar gotas com a característica o mais próximo possível da chuva natural.

Neste contexto, tão complexa quanto o desenvolvimento de um simulador de chuva é a seleção do mecanismo responsável pela formação das gotas. Segundo Morin; Goldberg; Seginer, (1967) e Imig; Santos; Romano, (2016), os sistemas formadores de gotas utilizados em simuladores de chuva podem ser classificados em dois grupos. O primeiro grupo corresponde aos sistemas gotejadores e o segundo grupo correspondem aos sistemas aspersores. Os modelos de simuladores de chuva desenvolvidos por Meyer e McCune (1958), Wilcox et al. (1986), Sangüesa et al. (2010) adotam como princípio de solução pontas aspersoras, já, as concepções apresentadas por Aoki e Sereno (2006) e Chevone et al. (1984) adotam como princípio de solução sistemas gotejadores, tais como discos perfurados que formam gotas de chuva simulada, porém este princípio de solução é basicamente utilizado em projetos de simuladores de chuva cujas as parcelas são menores que 1 m².

A utilização de um sistema aspersor como princípio de solução para formação de gotas proporciona ao pesquisador a variação da pressão no sistema, permitindo a geração de chuvas simuladas com diferentes faixas de intensidades, além de apresentar menor custo de construção e permitir áreas das parcelas maiores que 1 m². Verifica-se na literatura os projetos e utilização de simuladores de chuva adotam distintos modelos de pontas aspersoras, depreende-se desta forma que não há um consenso sobre qual modelo atende plenamente os requisitos para geração de chuva simulada.

A seleção do modelo de pontas aspersoras é uma etapa fundamental em um projeto de simulador de chuva sendo que estes podem ser abordados como projetos especiais. Desta forma, nos catálogos dos fabricantes de pontas aspersoras verifica-se a presença de informações parciais a respeito das características que uma gota de chuva simulada deve apresentar, tamanho de gota, intensidade da precipitação, energia cinética e uniformidade da distribuição.

Neste contexto, na fase de seleção da ponta aspersora, verifica-se a necessidade da realização de experimentos para determinar se o modelo da ponta aspersora selecionada, para ser utilizada no simulador de chuva, gera gotas com as características da chuva natural. A realização de estudos experimentais requer tempo, planejamento, estrutura física e recursos financeiros a fim de permitir coletar os dados.

Desta forma, com o objetivo de reduzir o tempo e o custo da projeção de um simulador de chuva, os projetistas adotam modelos de pontas aspersoras já empregadas em outras concepções de simuladores de chuva. Porém, há que se destacar que os modelos de pontas utilizados em outros projetos de simuladores de chuva foram avaliados e selecionados para atender as características específicas daquelas condições experimentais (área da parcela, uniformidade, energia cinética, tamanho da gota, velocidade de queda, intensidade da precipitação), e que poderão não ser as mesmas dos estudos a serem realizados pelo pesquisador.

A seleção de um modelo de ponta aspersora que não atende as necessidades do estudo a ser realizado pode gerar gotas de chuva com características diferentes da chuva natural e, conseqüentemente, gerar resultados que não representam a realidade.

No contexto apresentado, verifica-se que o projetista encontra dificuldades na fase de seleção de sistemas aspersores durante o projeto de um simulador de chuvas. Não sendo possível a utilização dos modelos da literatura, o projetista, por meio das especificações técnicas apresentadas, seleciona um modelo de ponta que atenda aos requisitos estabelecidos. Com isso, pode ser selecionado uma ponta, porém, não há garantias de que o modelo selecionado atenda aos requisitos estabelecidos no projeto.

Em virtude da grande quantidade de trabalhos que abordam os estudos com a utilização de simuladores de chuva, no ano de 2011 ocorreu o “*Internacional Rainfall Simulator Workshop*”, contando com a participação de pesquisadores de mais de 10 países. Nesta ocasião, verificou-se a necessidade de um conjunto de procedimentos que auxiliassem os projetistas para a padronização dos projetos e estudos com simuladores de chuva e, desta forma, proporcionar resultados que permitam a comparação dos experimentos realizados por diferentes concepções e em diferentes regiões (KIBET et al., 2014).

A modelagem do processo, apesar de trabalhosa e complexa, permite explicitar contribuições fundamentais, tanto para as empresas quanto à academia, uma vez

que, permite a compreensão das informações do ciclo de vida do projeto, emprego de métodos e ferramentas de auxílio a sua realização, estabelecendo uma visão detalhada e integrada do trabalho e ser realizado.

Neste sentido, explicita-se a importância da elaboração de um modelo que permitam selecionar e verificar o atendimento do sistema aspersor aos requisitos do projeto do simulador de chuva.

1.1 QUESTÃO DE PESQUISA

A formulação do problema consiste em apresentar de forma clara, explícita, compreensível e operacional, qual é a dificuldade que se pretende resolver, limitando sua abrangência, (GERHARDT; SILVEIRA, 2009), e sendo possível de solução por meio de um processo científico (LAKATOS; MARCONI, 2003).

Desta forma, a questão de pesquisa é:

Como qualificar um sistema aspersor para ser utilizado em simuladores de chuva considerando os parâmetros requeridos para a geração da chuva – tamanho de gota, intensidade da precipitação, energia cinética e uniformidade da distribuição?

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Sistematizar o conhecimento do processo de qualificação de pontas aspersoras para a geração de chuva simulada.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são as atividades parciais que contribuem para o alcance do objetivo geral do projeto de pesquisa, sendo definidos os seguintes objetivos específicos:

- Identificar os índices de uniformidade da área molhada de diferentes chuvas simuladas geradas por pontas aspersoras distintas;

- Parametrizar as gotas de chuva geradas por diferentes pontas aspersoras utilizadas em simuladores de chuva;
- Estabelecer as diretrizes para a modelagem do processo;
- Elaborar um modelo consolidado de qualificação de pontas aspersoras.

1.3 CONTRIBUIÇÕES DA TESE

No estudo bibliográfico realizado ficou explícito que nos projetos de simuladores de chuva a etapa de seleção do mecanismo formador de gotas é uma atividade que depende da experiência do pesquisador na área, da utilização de sistemas já utilizados em outros projetos ou de utilizar os modelos recomendados pelos fabricantes, restando a incógnita se realmente o mecanismo selecionado atende aos requisitos estabelecidos no projeto do simulador de chuva.

Em função do problema de pesquisa apresentado, espera-se poder contribuir não só com a proposta de um modelo para o processo de qualificação de aspersor para simuladores de chuva, mas também para o ensino e aprendizagem do processo de geração de chuva simulada, permitindo a sua condução de maneira mais efetiva, possibilitando o avanço nos campos de conhecimento destacados ao longo do projeto de pesquisa.

Espera-se que a proposta de modelo auxilie os projetistas na qualificação de aspersores, ou seja, analisar se um determinado aspersor é capaz de reproduzir as características de uma determinada chuva natural de forma controlada para a realização dos mais diversos estudos que utilizam simuladores de chuva, seja de erosão hídrica, escoamento superficial, infiltração de água no solo e ou persistência de produtos fitossanitários.

1.4 ESTRUTURA DA TESE

A tese está estruturada em cinco capítulos, conforme descritos a seguir.

O capítulo 1 aborda o tema, contexto e foco da pesquisa, apresenta a definição da questão de pesquisa, os objetivos gerais e específicos e as contribuições da tese.

O capítulo 2 aborda a revisão da literatura, apresentando os princípios gerais da chuva, simuladores de chuva, formação de gotas, pontas aspersoras, padrões de aspersão, seleção de pontas aspersoras, avaliação de sistemas aspersores e

medição da energia cinética das gotas de chuva. Neste capítulo também são apresentados conceitos relacionados a propriedade industrial, por meio de patentes de invenção, modelo de utilidade e desenho industrial, sendo apresentado o mapeamento das patentes de pontas aspersoras. Finalizando o capítulo 2 é apresentado a fundamentação teórica a respeito da modelagem de processos bem como os principais métodos utilizados.

O capítulo 3 aborda a metodologia, sendo estruturada em materiais e métodos experimentais, onde é apresentado o planejamento adotado para realização dos experimentos, a descrição detalhada da bancada, como foi realizado a identificação da uniformidade e a parametrização das gotas de chuva simulada gerada. Sendo também abordado neste capítulo, a estrutura de representação do modelo de qualificação de pontas aspersoras para simuladores de chuva.

No capítulo 4 são apresentados os resultados decorrentes da análise experimental e a apresentação do modelo utilizando o IDEF0. O modelo é apresentado do maior nível para o menor, sendo tecidos comentários em cada um dos níveis propostos.

Finalizando a tese, o capítulo 5 apresenta as considerações finais acerca dos objetivos declarados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No capítulo de revisão bibliográfica é apresentada a fundamentação teórica dos assuntos relacionados à proposta da tese. Primeiramente são apresentados os princípios gerais da chuva, contextualizou os simuladores de chuva, a formação de gotas, os pontas aspersoras, os padrões de aspersão, a seleção de pontas aspersoras, a avaliação de sistemas aspersores e a metodologia para estudos de sistemas aspersores.

2.1 PRINCÍPIOS GERAIS DA CHUVA

Segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET, 2016), a chuva pode ser definida como o resultado da condensação da água na atmosfera que precipita em direção ao solo quando as gotas superam as correntes verticais de ar. Os meteorologistas classificam as gotas de chuva em cinco categorias: muito pequenas (diâmetro inferior a 0,85 mm), pequenas (até 1,4 mm), médias (até 3,2 mm), grandes (até 5,1 mm) e muito grandes (acima de 5,1 mm).

A chuva pode ser natural, artificial ou simulada. O processo de geração de chuva artificial é quando as nuvens apresentam uma quantidade de núcleos de condensação insuficientes para gerar gotas e formar a chuva natural. Com isso, ocorre um processo denominado de semeadura das nuvens, que consiste na introdução de núcleos de condensação (iodeto de prata e gás carbônico congelado) nas nuvens. A semeadura pode ser realizada utilizando aviões que aplicam determinados produtos ou a partir do solo pela produção de fumaça de iodeto de prata (INMET, 2016).

A chuva simulada é realizada pelos simuladores de chuva, que são equipamentos preparados para produzir chuva de intensidade controlada sobre superfície de solo com algum tipo de cobertura vegetal, ou quando essa cobertura for inexistente (GUIMARÃES; LEAL, 2013). Depreende-se, portanto, que a chuva simulada pode ser definida como a geração de gotas de água utilizando sistemas técnicos que permitem reproduzir de forma controlada as características da chuva natural.

Um fluido pulverizado é diferente de um fluido aplicado. Uma pulverização é caracterizada como um processo físico-mecânico de transformação de uma substância líquida em partículas ou gotas, enquanto que a aplicação é caracterizada

como a deposição de gotas sobre um alvo desejado, com tamanho e densidade adequadas ao objetivo proposto (ANDEF, 2010).

Segundo Ribeiro (2006), as principais características que a chuva apresenta são: tamanho de gotas, intensidade de precipitação e energia cinética. O tamanho das gotas e a distribuição temporal das chuvas são as principais características relacionadas diretamente com a energia cinética da chuva. No processo erosivo dos solos, o poder de erosão da chuva não depende somente da quantidade da precipitação, mas também da intensidade, das características físicas e da distribuição do tamanho das gotas que vão interferir na energia de impacto das gotas no solo (LIMA et al., 2014).

O método mais antigo conhecido para determinação do tamanho de gotas é o método da farinha proposto por Hudson (1964). Esse método consiste na relação entre o peso dos nódulos formados pelo impacto das gotas na farinha quando secos e o diâmetro das gotas.

Diversos trabalhos foram realizados para verificar o tamanho médio das gotas de chuva em diversos países. Na Nigéria o tamanho médio está entre 2,25 e 2,50 mm (LAL, 1998), em Hong Kong está próximo de 2,23 mm e para chuvas de intensidades menores que 20 mm h⁻¹ o diâmetro fica menor que 2,23 mm, para intensidades em torno de 60 mm h⁻¹ o diâmetro das gotas fica próximo a 3 mm (JAYAWARDENA; REZAUR, 2000). No estado do Paraná foi relatado chuva com diâmetro próximo a 4,53 mm (ROTH; HENKLAIN; FARIAS, 1985).

As chuvas erosivas geralmente apresentam valores de energia cinética superior a 3,6 MJ h⁻¹ (DE MARIA, 1994), sendo que a energia cinética pode ser calculada por duas principais equações: a Equação 1, proposta por Wischmeier e Smith (1958) e a Equação 2, proposta por Wagner e Massambani (1988).

$$EC = 0,119 + 0,0873 \log_{10} I \quad (1)$$

$$EC = 0,153 + 0,0645 \log_{10} I \quad (2)$$

Onde:

EC¹ = Energia cinética, MJ h⁻¹;

I = Intensidade da precipitação, mm h⁻¹.

¹ As equações para estimar a energia cinética fornecem o valor em diferentes unidades de medida, estando relacionada com os dados de entrada e os fatores de conversão presentes nas equações. Desta forma, ao longo do trabalho as equações para estimar o valor da energia cinética podem apresentar diferentes unidades de medida.

Além da determinação da energia cinética pelas equações matemáticas, são utilizados diversos métodos e equipamentos comerciais, como o método da farinha, utilização do disdrômetro, método da mancha, termográfica por infravermelho e outros (LIMA et al., 2014).

Segundo Oliveira (2009), a chuva pode ser considerada como uma das maiores responsáveis pelas perdas e degradação acelerada dos depósitos de fungicidas sobre vegetais, atuando na diluição, redistribuição e remoção. Os fatores mais importantes que afetam a relação entre a chuva e os agrotóxicos são a intensidade, a quantidade, o intervalo de tempo entre a aplicação e a chuva, a formulação utilizada, sua solubilidade em água e o tipo de cultura (OLIVEIRA, 2009).

2.1.1 Simuladores de chuva

Os simuladores de chuva foram desenvolvidos na década de 1930 nos Estados Unidos com o objetivo principal de realizar estudos sobre o comportamento dos solos. Porém, a falta de dados sobre energia cinética, tamanho e impacto das gotas sobre a superfície limitou os estudos em comparação da intensidade e uniformidade entre chuva simulada e natural (ALVES SOBRINHO, 1997).

Segundo Montebeller et al. (2001), os simuladores de chuva são equipamentos nos quais a água é aplicada por um mecanismo aspersor, podendo ser controlada a intensidade de precipitação, o tamanho e a velocidade de impacto das gotas sobre a parcela do solo onde se deseja estudar.

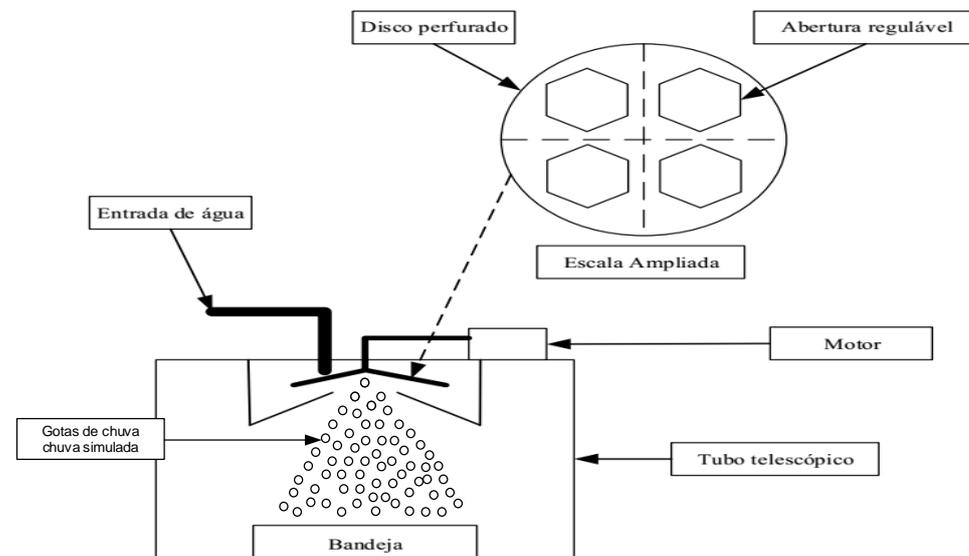
Os simuladores de chuva podem ser compostos por quatro principais partes, linhas de bico, suportes dos tubos, quadro estrutural e sistema de fornecimento de água (WILSON et al., 2014). Porém, com o avanço da eletrônica embarcada, atualmente os simuladores de chuva podem apresentar uma quinta parte, um sistema de controle e geração automatizado, conforme apresentado por Santos (2015).

Existe uma grande quantidade de trabalhos na literatura que abordam o projeto, construção e operação de simuladores de chuva. Isso ocorre por que praticamente não existem fornecedores comerciais, sendo tratados como projetos especiais (FAO, 2016).

Desta forma, os pesquisadores buscam desenvolver os simuladores de chuva para atender às necessidades específicas dos experimentos a serem realizados, analisando os conceitos anteriormente desenvolvidos.

Na Figura 1 é apresentado o conceito de 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 minuto², respectivamente 30 e 12, a uma pressão de 48 kPa. O conceito apresenta um disco com aberturas. Este mecanismo permite, por meio de sua rotação, controlar a intensidade de chuva simulada.

Figura 1 - Conceito de simulador de chuva com disco perfurado rotacional.



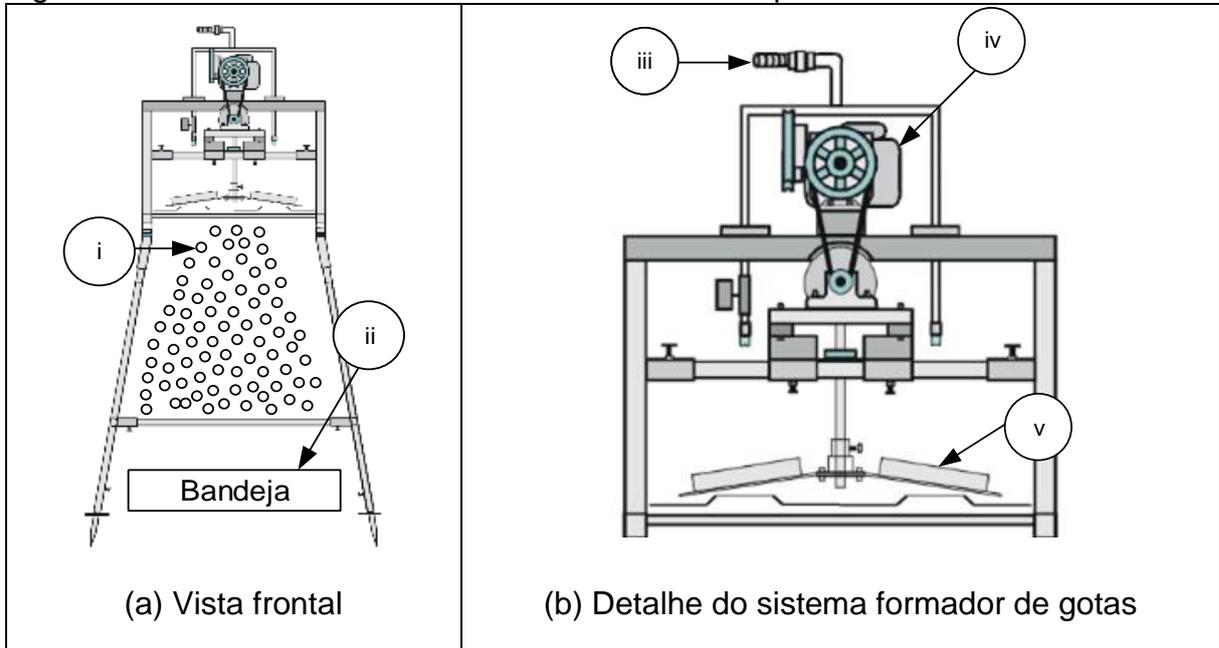
Fonte: Adaptado de Pall et. al., (1983).

O conceito desenvolvido por Alves Sobrinho; Ferreira; Pruski, (2002) é apresentado na Figura 2. Este conceito consiste em um simulador de chuva portátil que permite a realização de estudos em parcelas menores que 1 m². Este conceito foi avaliado utilizando os aspersores do tipo 80-100 e 80-150 fabricados pela *Spraying Systems*, sendo posicionados a 2 m de altura e operando a uma pressão de trabalho de 35,6 kPa. Na Figura 2a, é possível verificar no detalhe “i” as gotas de chuva simulada geradas no experimento e no detalhe “ii” a posição da bandeja ou como o simulador de chuva é portátil, a posição do solo perante o simulador de chuva. Na Figura 2b, o detalhe “iii” consiste na entrada da água no sistema, o detalhe “iv” representa o motor elétrico que tem a função de rotacionar o disco perfurado e o

² 1 galão por minuto corresponde a 0,27 metros cúbicos por hora.

detalhe “v” representa o disco perfurado. Conforme a variação da rotação do disco, é possível obter diferentes características de chuva simulada.

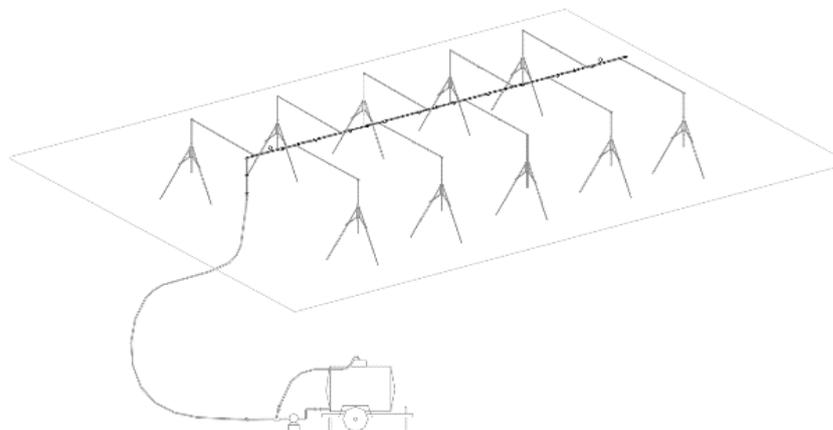
Figura 2 - Conceito de simulador de chuva com disco perfurador rotacional.



Fonte: Alves Sobrinho; Ferreira; Pruski, (2002).

Posteriormente, Ortuya (2004) desenvolveu um simulador de chuva para realizar estudos de erosão hídrica com diferentes intensidades. O conceito desenvolvido (Figura 3) é composto por dez aspersores montados em uma estrutura metálica que permite ajustar a altura entre 1,2 m e 2,5 m, sendo que a pressão de trabalho no sistema varia de 70 kPa até 130 kPa.

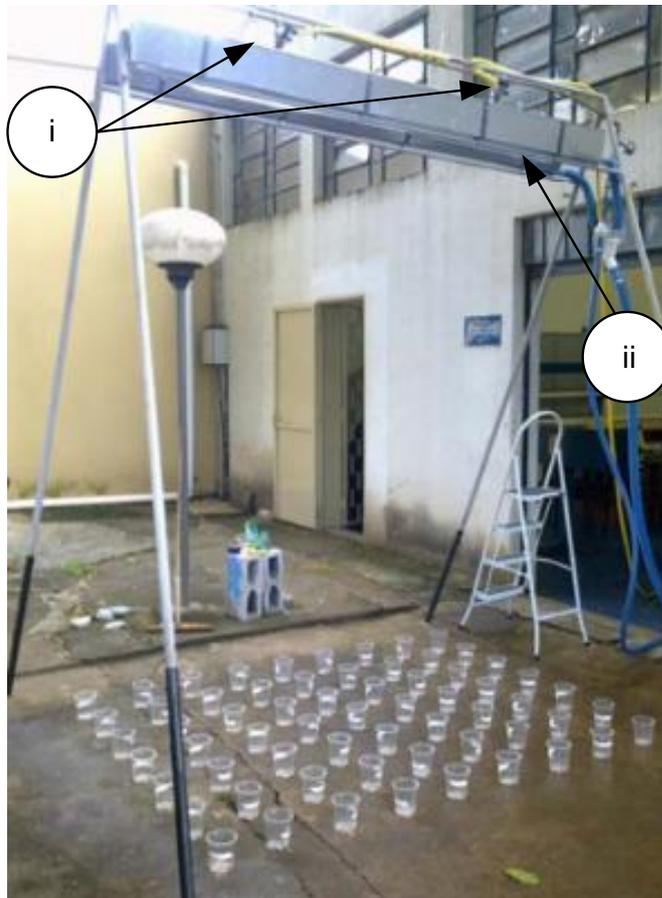
Figura 3 - Conceito de simulador de chuva para grandes áreas.



Fonte: Adaptado de Ortuya (2004).

Dentre os diversos conceitos de simuladores de chuva, Souza e Siqueira (2011) desenvolveram um simulador de chuva (Figura 4) para realizar estudos sobre o comportamento da hidrologia em regiões urbanas. O conceito desenvolvido é composto por dois aspersores do tipo Fulljet ½SSH40 (detalhe “i”), sendo que os aspersores atuam com um movimento oscilatório pendular. 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 e também 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 4 - Conceito de simulador de chuva de laboratório.

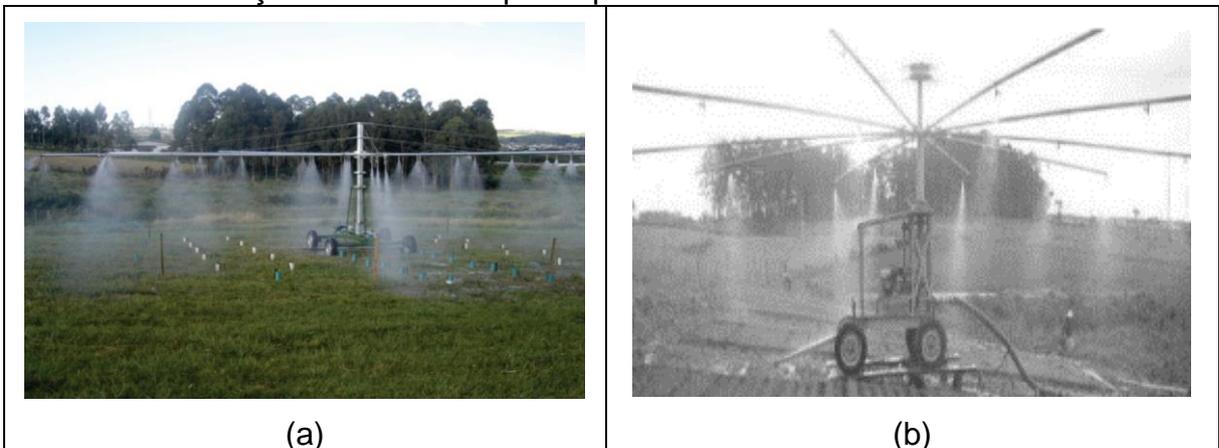


Fonte: Souza e Siqueira, (2011).

Os simuladores de chuvas são utilizados em laboratório, onde geralmente apresentam menores tamanhos de parcela (entre 0,5 m² chegando até 2 m²), ou em campo onde geralmente permitem estudos em áreas das parcelas maiores que 10 m².

Na Figura 5a, é apresentado o conceito de simulador de chuva desenvolvido por Bertol, I; Bertol, C; Barbosa, (2012), sendo equipado com 30 aspersores do tipo 80-100 fabricado pela *Spraying Systems*, operando com pressões de 36 kPa, 45kPa, 54 kPa e 73 kPa e é movido hidráulicamente por empuxo. Esta característica está presente no conceito desenvolvido por Swanson (1965), conforme apresentado na Figura 5b. Esta concepção de simulador de chuva utiliza mais de uma ponta aspersora para gerar chuva simulada, com isso é importante que o projetista observe a melhor distância entre as pontas com o objetivo de maximizar a uniformidade de distribuição.

Figura 5 - (a) Conceito do tipo empuxo. (b) Primeiro conceito de simulador de chuva com braços rotativos do tipo empuxo.

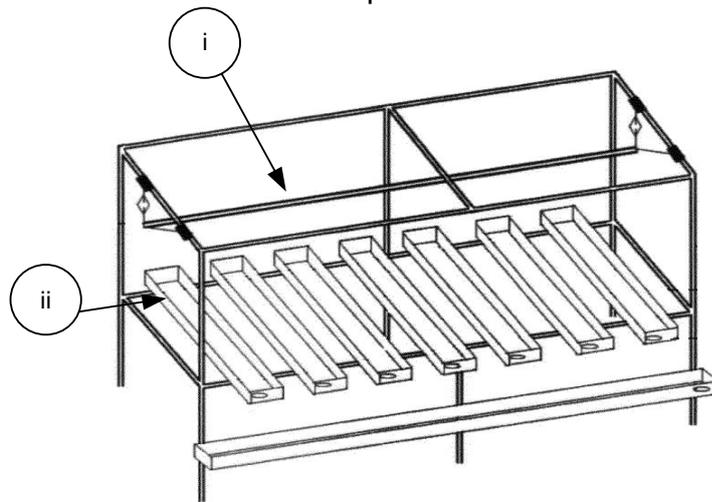


Fonte: (a) Bertol, I; Bertol, C; Barbosa, (2012); (b) Swanson (1965).

Além dos trabalhos publicados na literatura sobre simuladores de chuva, Brandelero e Modolo (2015) patentearam uma concepção de simulador de chuva portátil (BR 102015009204-0 A2), conforme apresentado na Figura 6, com o objetivo de realizar estudos de erosão e deslizamento de solos.

A concepção tem a possibilidade de variar o tamanho da gota e a intensidade por meio da utilização de diferentes tipos de aspersores e pressões da água no sistema. Onde o detalhe “i” é posicionado um ou mais sistemas aspersores. Permite também a regulagem da angulosidade dos recipientes armazenadores do solo (detalhe “ii”) o que permite ao pesquisador realizar diferentes estudos comparando diferentes ângulos de inclinação do solo e de tipos de cobertura.

Figura 6 - Patente de simulador de chuva portátil - BR 102015009204-0 A2.



Fonte: Adaptado de Brandelero e Modolo (2015).

Os simuladores de chuva são utilizados na realização de diversos experimentos, em laboratório ou em campo. Na literatura, a utilização de simuladores de chuva para estudos sobre erosão hídrica e perdas de solo é apresentado por Carvalho D. F. et al. (2012), Santos (2006), Brandão et al. (2007), Oliveira (2007), Falcão (2009), Marques (2013) e Volk e Cogo (2014), sendo que Silva (2011) destaca que a erosão do solo é causada principalmente por gotas com diâmetros maiores que 2 mm. Em escoamento superficial é apresentado por Spohr et al. (2009), Carvalho D. F. et al. (2012), Alencar (2013), Oliveira et al. (2013), Lima et al. (2015) e Reis (2015). Em persistência de produtos fitossanitários é apresentado por Bastiani et al. (2000), Pedrinho Junior et al. (2002), Oliveira (2009), e Souza et al. (2011). E, em estudos de Infiltração de água no solo realizado por Paes Junior (2013).

A utilização de simuladores de chuva apresenta vantagens e desvantagens. Segundo a FAO (2016), a principal vantagem da utilização de simuladores de chuva é a capacidade de se tomar muitas medidas em um curto espaço de tempo sem ter que esperar por chuvas naturais e possibilidade de trabalhar com chuva constante, o que elimina a variabilidade dos valores. As principais desvantagens são: elevado custo para fabricação de concepções para realizar estudos em parcelas maiores que 100m²; em utilização para estudos de escoamento e erosão em pequenas parcelas não podem ser extrapoladas para condições de campo e suscetíveis de serem afetadas por ventos.

Em um projeto de simulador de chuva é desejável que todas as características sejam reproduzidas o mais fielmente possível. Entretanto, na prática isso não ocorre perfeitamente. Desta forma, segundo a FAO (2016), as principais características que um simulador de chuva deve apresentar são:

- Tamanho de gota: as gotas de chuva variam de gotas de névoa até um diâmetro máximo de 6 ou 7 mm, porém o diâmetro médio fica na faixa de 2 e 3 mm e varia com a intensidade;
- A distribuição das gotas: em tempestades tropicais a proporção de gotas com maior diâmetro é maior que para climas temperados onde ocorrem principalmente gotas pequenas e médias;
- Velocidade de queda: a velocidade terminal das gotas é em função do tamanho da gota, podendo atingir até 9 m s^{-1} ;
- Energia cinética: a energia cinética das gotas é em função da velocidade e altura de queda, muitas vezes é utilizada como parâmetro para validação de um simulador de chuva, devido a energia cinética estar relacionada com a capacidade de causar erosão;
- Intensidade da chuva: a intensidade ou precipitação da chuva pode variar na chuva natural, mas em simuladores de chuva é usual a determinação de um valor ou faixa de intensidade que o simulador vai operar;
- Uniformidade de distribuição: corresponde a uniformidade de distribuição das gotas sobre a parcela experimental. Neste critério, são usualmente adotados os coeficientes de uniformidades para quantificar.

Wilson et al. (2014) sistematizou as características mais importantes e organizou na forma de dez requisitos importantes para o desenvolvimento de um projeto ideal de Simulador de Chuva, sempre buscando aproximar os valores aos das chuvas naturais, sendo eles: tamanho de gota, velocidade da gota, intensidade uniforme, aplicação contínua, ângulo de impacto vertical, reprodução da duração e intensidade, capacidade de realizar os experimentos em condições de ventos e altas temperaturas, área molhada representativa, portabilidade e baixo custo.

Porém, o mesmo autor ainda afirma que o projeto se torna complexo para atender todos os requisitos, desta forma recomenda-se atender os requisitos ligados a reproduzir as características da gota gerada com a gota de chuva natural.

Para Meyer e Harmon (1979), os simuladores devem reproduzir as características de gotas de diâmetro médio, velocidade de impacto, precipitações com energia cinética e distribuição uniforme sobre a parcela experimental o mais próximo das chuvas naturais.

A pressão utilizada em simuladores de chuva varia entre 34,5 e 140 kPa, sendo que a pressão determina principalmente o diâmetro das gotas e a intensidade de chuva simulada. A principal desvantagem de utilização de simuladores de chuva com sistemas aspersores é que o diâmetro das gotas para altas pressões e, conseqüentemente, altas intensidades, tende a apresentar menores dimensões, e desta forma não reproduz fielmente os valores equivalentes da chuva natural (SANTOS, 2011).

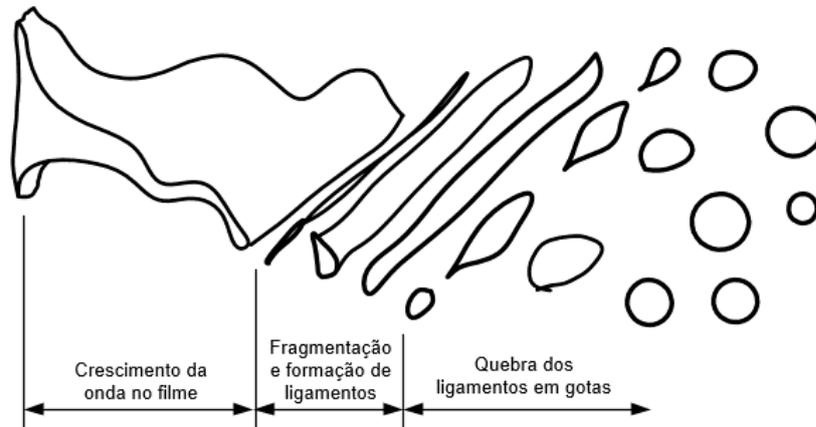
2.1.2 Formação de gotas

A transformação de líquidos em gotículas é de grande importância em diversos processos industriais, na agricultura, meteorologia e medicina. Podendo ser encontrada em diversos sistemas técnicos, tais como sistemas para irrigação de jardins, sistemas de irrigação por pivô central, chuveiros, pulverizadores de produtos químicos, injeção de combustíveis em veículos, entre outras aplicações (LACAVA et al., 2009).

A atomização de um fluido consiste em aumentar a área superficial do líquido. Nesse processo, um jato é desintegrado pela energia cinética do próprio fluido ou pela exposição a uma corrente de ar ou gás de alta velocidade ou pela influência da energia mecânica externa aplicada por meio de dispositivos rotativos (LACAVA et al., 2009).

A fragmentação do jato em gotículas ocorre quando a magnitude da força de perturbação exceder a força de tensão superficial do fluido. Neste processo, são produzidas muitas gotas com diâmetros maiores que apresentam instabilidade e posteriormente são rompidas em pequenas gotículas (LACAVA et al., 2009). Na Figura 7 é ilustrado o esquema proposto que representa a desintegração de um filme líquido que vai diminuindo sua espessura à medida em que vai se deslocando através de um gás.

Figura 7 - Processo de desintegração de um filme líquido.

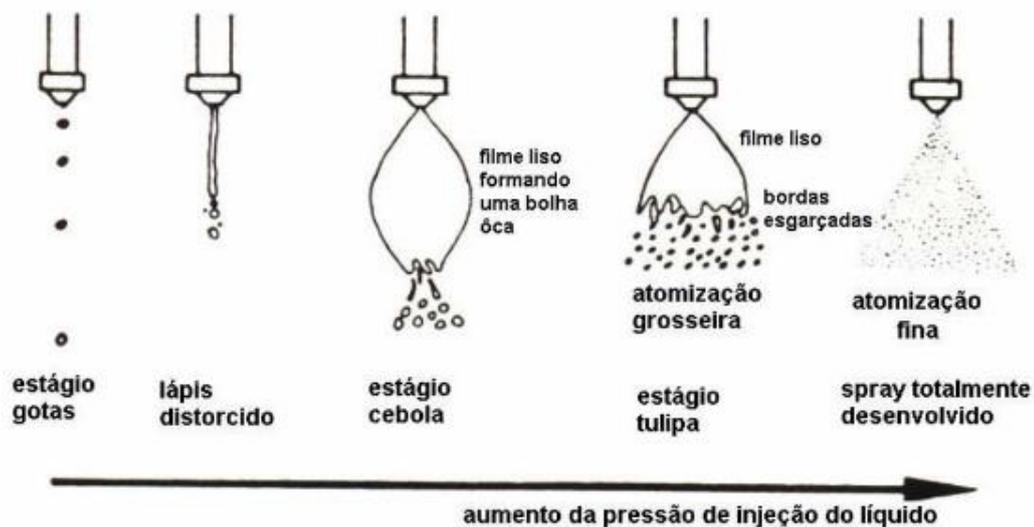


Fonte: Adaptado de Dombrowski e Johns (1963).

O desenvolvimento do jato do fluido e o crescimento das perturbações que ocasionam a desintegração e conseqüentemente formação das gotículas são importantes para determinar a distribuição do tamanho das gotas e formato. Essas características dependem da geometria interna do aspersor, das propriedades do meio onde o fluido é aplicado e das propriedades físicas do líquido a ser pulverizado (LACAVA et al., 2009).

No processo de pulverização necessita-se de alta velocidade relativa entre o líquido no ponto de saída do orifício do aspersor e o ar do meio vizinho. O processo é constituído por vários estágios que apresentam diferentes comportamentos conforme ocorre o aumento da pressão do fluido (Figura 8).

Figura 8 - Diagrama esquemático para a fragmentação de um jato de fluido.



Fonte: Adaptado de Dombrowski e Johns (1963).

O primeiro estágio é denominado de “estágio gotas”. Neste estágio, o líquido goteja pelo orifício de saída do aspersor. O segundo estágio é denominado de “estágio lápis distorcido”, no qual o líquido apresenta uma leve distorção do jato ao deixar o aspersor. O terceiro estágio é denominado de “estágio cebola”, onde no ponto de saída do aspersor o líquido forma um cone sendo contraído pelas forças de tensão superficial. O quarto estágio é denominado de “estágio tulipa”, no qual o cone se abre e assume o formato de uma tulipa que termina de forma desigual, então o fluído é fragmentado em gotas de maior diâmetro. O quinto e último estágio é denominado de “estágio de atomização”, onde a superfície curva se desfaz formando um jato cônico e, à medida que o jato se expande a espessura diminui, tornando-se instável, o que gera o rompimento e desintegração do jato em gotas e posteriormente em gotículas (LACAVA et al., 2009).

As gotas de chuva natural apresentam diâmetros consideravelmente grandes, maiores que 2,5 mm podendo chegar a 4 mm. Neste caso, o estágio mais adequado para formação de gotas de chuva simulada estaria próximo ao estágio de tulipa, onde a pressão não é tão alta a ponto de pulverizar a água e nem tão baixa a ponto de não formar uma pulverização grosseira.

Considerando que as gotas formadas por um aspersor, independentemente de seu tipo, são constituídas por um universo de gotas que apresentam grande variabilidade de diâmetros, a aplicação de tratamentos estatísticos torna-se indispensável, sendo que a grande maioria dos aspersores utilizados na engenharia raramente tem distribuição de diâmetros muito uniforme (CARVALHO JÚNIOR et al., 2011). Porém Lefebvre (1989) comenta que as gotas de uma pulverização onde não teve perturbações tendem a apresentar uma distribuição estatística similar a distribuição normal (Gaussiana).

Outra importante característica de um fluído pulverizado é a sua velocidade, sendo que os fenômenos de transferência de massa e quantidade de movimento estão ligados a velocidade dos corpos em movimento, onde existem milhares de milhões de gotículas fluindo, cada um com seu diâmetro e velocidades distintas (CARVALHO JÚNIOR et al., 2011).

As características do processo de pulverização estão relacionadas com as propriedades que o fluído apresenta: densidade, viscosidade³ e tensão superficial. A vazão de um aspersor varia com a raiz quadrada da densidade do líquido. A tensão superficial representa a força que resiste a formação de uma nova área superficial, sendo que a energia requerida para pulverizar é igual a tensão superficial multiplicada pelo aumento da área superficial do líquido. A viscosidade afeta a distribuição do tamanho de gotas, a vazão mássica e o formato do fluído pulverizado, sendo que o aumento da viscosidade reduz o número de Reynolds⁴ impedindo o desenvolvimento da instabilidade natural. Um aumento da viscosidade do fluído tem efeito sobre a qualidade da pulverização devido as perdas viscosas serem grandes, o que por sua vez gera menor energia disponível para a pulverização (LACAVA et al., 2009).

2.1.3 Bicos aspersores

Os bicos aspersores ou bicos hidráulicos são os principais elementos de um sistema de pulverização, sendo responsáveis por regular a vazão e formar gotas ou, em sistemas que apresentam um mecanismo para controle automático da vazão, tendo os bicos aspersores unicamente a função de formar gotas (MATUO, 1990).

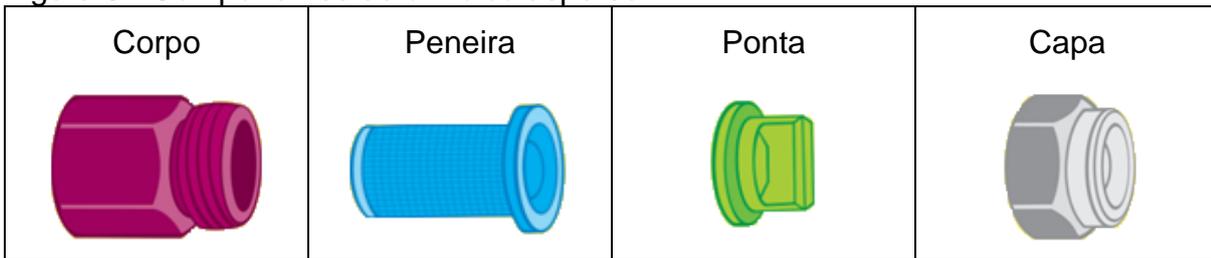
A pulverização difere da aplicação, sendo que a pulverização corresponde ao processo físico mecânico de transformação de uma substância líquida em partículas ou gotas; já a aplicação corresponde a deposição das gotas sobre um alvo desejado, com tamanho e densidade adequadas ao objetivo proposto (ANDEF, 2010).

Popularmente, as pontas são chamadas de bicos, porém o que se chama genericamente de bico é um conjunto de peças montadas no final do circuito hidráulico, sendo composto principalmente por corpo, peneira, ponta e capa, conforme apresentado na Figura 9 (CHRISTOFOLETTI, 1999; ANDEF, 2010).

³ Segundo Komori (2012), viscosidade está relacionada com a dificuldade que o fluído apresenta em escoar. Quanto maior a viscosidade, maior a resistência do fluído ao escoamento.

⁴ O número de Reynolds é um número adimensional utilizado para determinar o regime de escoamento de um determinado fluído, podendo este ser classificado como regime laminar ou turbulento.

Figura 9 - Componentes de um bico aspersor.



Fonte: Adaptado ANDEF (2010).

Cada modelo de ponta apresenta características que o diferencia dos demais, desde espectro de tamanho de gotas, largura e padrões de deposição. Em uma pulverização, o mecanismo formador de gotas não gera gotas com um único tamanho. Desta forma, para classificar a pulverização em fina, média ou grossa é considerado o Diâmetro Médio Volumétrico – DMV (ANDEF, 2010).

O DMV é medido em milímetros e é o diâmetro de gota que divide a massa das gotas em duas partes de forma que a soma dos volumes das gotas menor que o DMV seja igual à soma dos volumes das gotas de diâmetro maior que o DMV (FAGGION; ANTUNIASSI, 2003; SPRAYING SYSTEMS, 2016).

Neste contexto, segundo ANDEF (2010), as gotas podem ser classificadas em três categorias: Gotas grandes, onde apresentam gotas maiores que 400 micrometros; Gotas médias, onde apresentam gotas entre 200 e 400 micrometros e Gotas pequenas, onde apresentam gotas menores que 200 micrometros. Porém, a Spraying Systems (2016) apresenta uma classificação das gotas em quatro categorias: Muito pequena, corresponde a uma névoa com diâmetro entre 10 e 100 micrometros; Pequena, corresponde a uma chuva leve com diâmetro entre 100 e 500 micrometros; Média, corresponde a uma chuva moderada com diâmetro entre 500 e 1000 micrometros e Grande que corresponde a um diâmetro de gotas entre 1000 e 5000 micrometros.

A Sociedade Americana de Engenheiros Agrícolas e Biológicos (ASABE), por meio da normativa 572.1 classifica o tamanho das gotas geradas pelos sistemas aspersores. No Quadro 1 é apresentada a classificação conforme o tamanho de gota, que vai desde muito fina até ultra grossa (ASABE, 2009).

Quadro 1 - Classificação do tamanho das gotas ASABE 572.1.

Categoria da Gota	Símbolo	Código Cor	DMV ¹
Muito fina	MF	VERMELHO	< 145
Fina	F	LARANJA	145 – 225
Média	M	AMARELO	226 – 325
Grossa	G	AZUL	326 – 400
Muito grossa	MG	VERDE	401 – 500
Extremamente grossa	EG	BRANCO	501 – 650
Ultra grosso	UG	PRETO	> 650

¹DMV = Diâmetro Médio Volumétrico (50%), medido em micrometros.

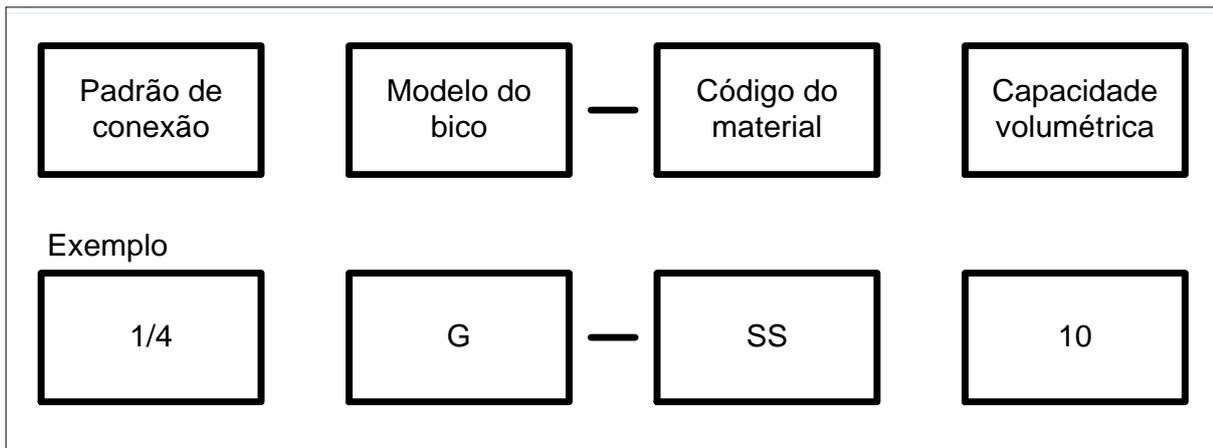
Fonte: Adaptado ASABE (2009).

No mercado existe uma grande variedade de modelos de pontas de pulverização. Com isso, as organizações adotam diferentes sistemas de codificação para auxiliar na gestão de seus produtos. O sistema de codificação é um componente fundamental para a gerência de estoques e sistemas de administração de materiais, uma vez que seria difícil encontrar, controlar e rastrear um item sem código (NARA et al., 2013).

Atualmente os sistemas de codificação mais utilizados pelas indústrias são: (a) Sistema alfabético, sendo composto por um conjunto de letras do alfabeto, porém apresenta uma limitação quanto ao número de itens; (b) Sistema alfanumérico, consiste na combinação de números e letras permitindo um maior número de itens se comparado com o sistema alfabético; (c) Sistema numérico e decimal, é o mais utilizado pelas empresas, devido à grande possibilidade de variações (DIAS, 1993).

Desta forma, o sistema de codificação adotado permite identificar um conjunto de informações relativas ao produto. O sistema de codificação adotado atualmente pela Spraying Systems (2016), consiste no sistema alfanumérico conforme apresentado na Figura 10. O sistema de codificação permite verificar informações relativas ao padrão de conexão, ao modelo da ponta aspersora, tipo de material e capacidade volumétrica.

Figura 10 - Sistema de codificação do produto.



Fonte: Spraying Systems (2016).

2.1.4 Padrões de aspersão

Os diferentes padrões de pulverização são formados devido os aspersores apresentarem diferentes padrões construtivos. De uma forma geral, os aspersores apresentam três padrões: o padrão de pulverização tipo leque (Figura 11a) que apresenta uma forma elíptica, a maior deposição do fluido ocorre no centro e se dissipa em direção as extremidades; o padrão cone vazio (Figura 11b) que apresenta uma forma de anel circular que permite uma aplicação especializada ou dirigida, este tipo geralmente apresenta gotas muito finas e o padrão cone cheio (Figura 11c) que apresenta uma forma circular totalmente preenchido pela aplicação do fluido (TEEJET, 2011).

Figura 11 - Principais tipos de padrões de pulverização.

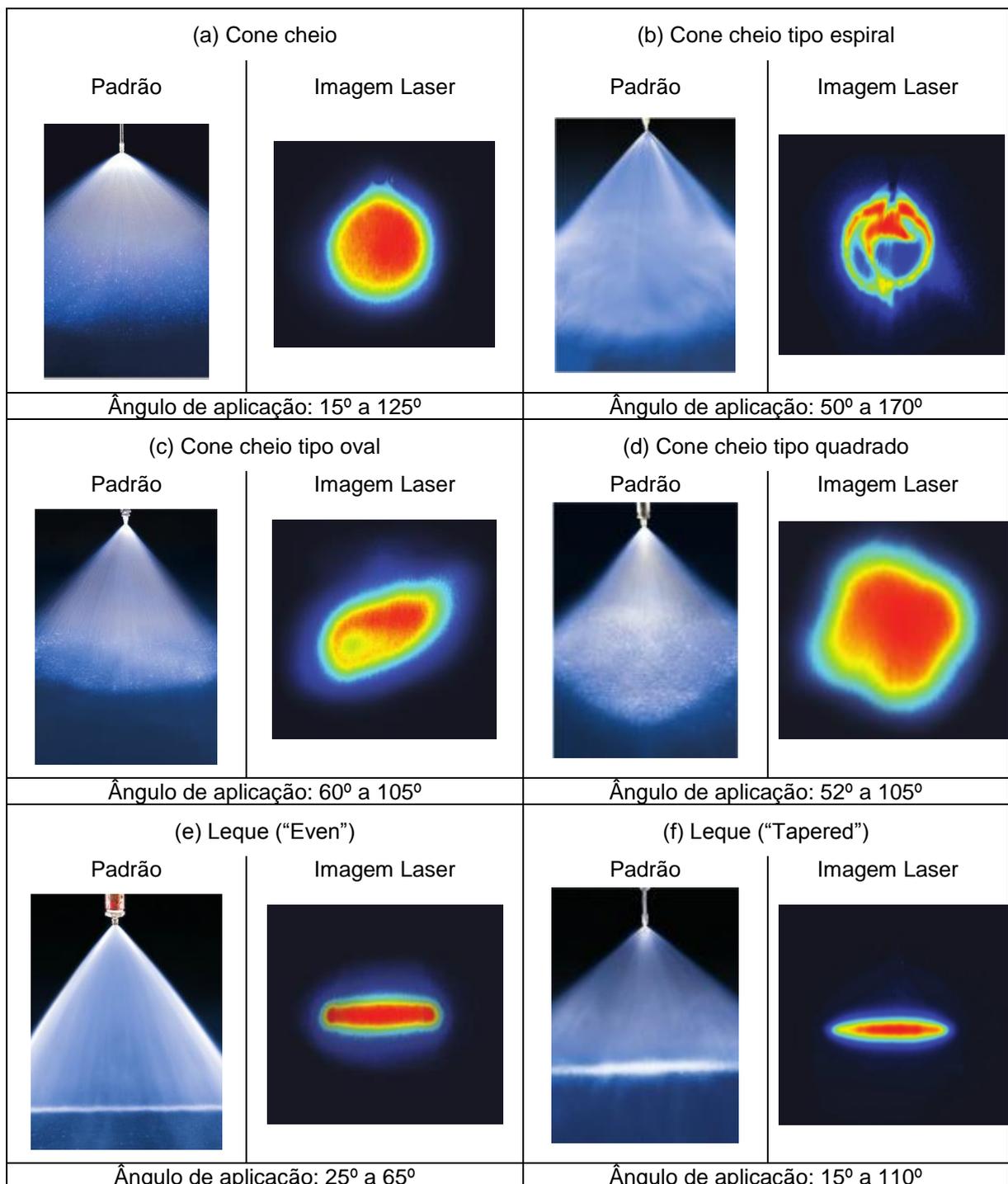


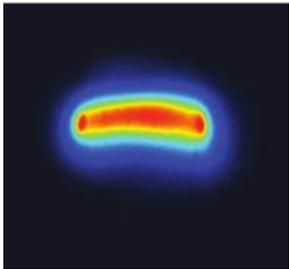
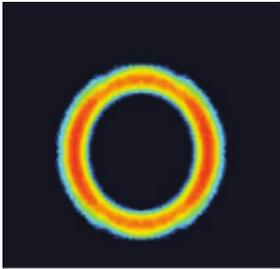
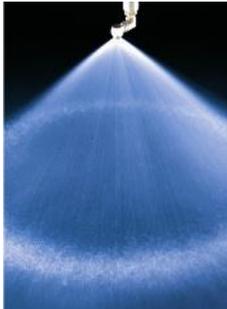
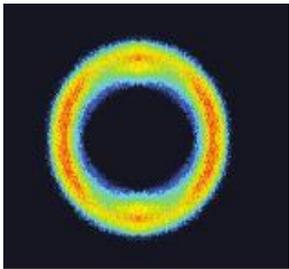
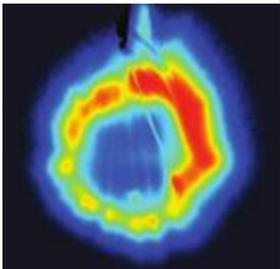
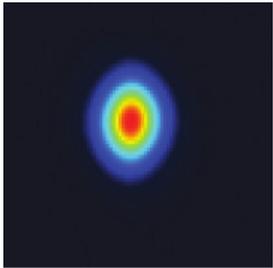
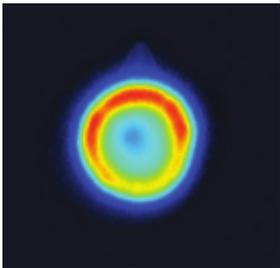
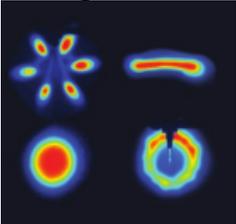
Fonte: (TEEJET, 2011).

Ainda é possível verificar a presença de outros padrões derivados dos três principais. A Figura 12 apresenta diferentes padrões disponíveis em aspersores comerciais, sendo que cada padrão apresenta uma determinada faixa do ângulo de pulverização.

Figura 12 - Tipos padrão de pulverização.

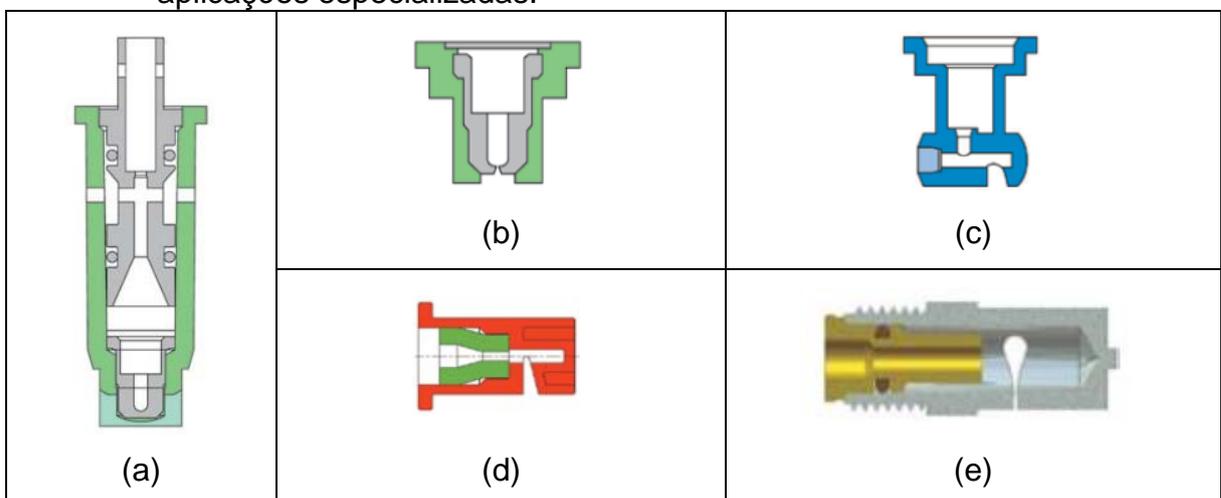
Continua



(g) Leque ("Deflected")		(h) Cone vazio ("Whirlchamber")	
Padrão	Imagem Laser	Padrão	Imagem Laser
			
Ângulo de aplicação: 15° a 150°		Ângulo de aplicação: 40° a 165°	
(i) Cone vazio ("Deflected")		(j) Cone vazio ("Spiral")	
Padrão	Imagem Laser	Padrão	Imagem Laser
			
Ângulo de aplicação: 100° a 180°		Ângulo de aplicação: 50° a 180°	
(k) Jato sólido		(l) Atomização	
Padrão	Imagem Laser	Padrão	Imagem Laser
			
Ângulo de aplicação: 0°		Ângulo de aplicação: 35° a 165°	
(m) Atomização especiais		Imagem Laser	
Padrão			
			
Ângulo de aplicação: 18° a 360°			

Atualmente, no mercado estão disponíveis cinco tipos de pontas aspersoras, cada uma apresenta características que permitem melhor desempenho em aplicações específicas. Segundo seus fabricantes (TEEJET, 2006; PEUMAX, 2017; entre outros), o primeiro tipo define pontas com indução de ar Venturi (Figura 13a). Nestes tipos o sistema aspira o ar para dentro do corpo do aspersor, onde se mistura com o fluido que está sendo aplicado. A mistura resultante cria um padrão de pulverização de água com ar em baixas pressões, sendo composto por gotas grandes, cheias de ar e apresentando poucas gotas pequenas. O segundo tipo são as pontas de leque plano de faixa estendida (Figura 13b), sendo amplamente utilizada por gerar excelente distribuição em uma grande faixa de pressão de trabalho, sendo que a melhor cobertura, segundo os fabricantes, é obtida utilizando maiores pressões de trabalho. O terceiro tipo, pontas de leque plano com pré-orifício (Figura 13c). Neste caso, a pressão de trabalho é reduzida no seu interior, produzindo gotas com diâmetros maiores do que os das pontas convencionais de leque plano. O pré-orifício restringe a quantidade de fluido na entrada da ponta e cria uma redução da pressão. O quarto tipo são as pontas com defletores (Figura 13d), que produzem um padrão de jato plano com um grande ângulo. Neste tipo, a variação da pressão de trabalho gera um maior efeito na largura do leque do que em pontas do tipo leque plano. O quinto tipo são as pontas para aplicações especializadas (Figura 13e), devido a existência de muitas variações, sua escolha naturalmente vai depender de suas aplicações. São as pontas desenvolvidas para projetos e aplicações especiais.

Figura 13 - Tipos de pontas aspersoras: (a) indução de ar Venturi; (b) leque plano de faixa estendida; (c) leque plano com pré-orifício; (d) com defletores e (e) aplicações especializadas.



Fonte: Adaptado de TEEJET (2006).

2.1.5 Seleção de pontas aspersoras

Comercialmente, para a linha agrícola está disponível uma grande variedade de tipos de pontas aspersoras, com diferentes tamanhos, capacidades e materiais, sendo que cada ponta aspersora é projetada para ter máximo desempenho considerando o que está sendo pulverizado e como será pulverizado (TEEJET, 2006).

Para auxiliar na escolha da ponta mais adequada, a TEEJET (2006) apresenta uma série de questões à serem respondidas: “o que está pulverizando?”; “Como está pulverizando?”; “Qual é a sua tolerância à deriva?”; “Qual é o peso da calda que vai aplicar?”; “Qual é a faixa de pressão do pulverizador?”; “Qual é o espaçamento entre as pontas na barra?”; “Qual é a altura adequada da barra?”; “Qual é o melhor material para as pontas?”.

As respostas dos questionamentos juntamente com um quadro de seleção disponível pelo fabricante (ANEXO A), auxiliam na seleção do modelo de ponta mais adequado.

A *Spraying Systems* apresenta um guia de seleção de pontas aspersoras para área total (ANEXO B), para aplicações especiais (ANEXO C) e para fertilizantes líquidos (ANEXO D). A seleção é realizada considerando o tipo de produto a ser aplicado, o estágio da cultura (pós-emergência), se é de contato ou sistêmico, se a aplicação é no solo e o gerenciamento da deriva. Da mesma forma, a Jacto também apresenta um guia para seleção de pontas pulverizadores (ANEXO E), este guia leva em consideração os mesmos parâmetros apresentados no guia de seleção da *Spraying Systems*.

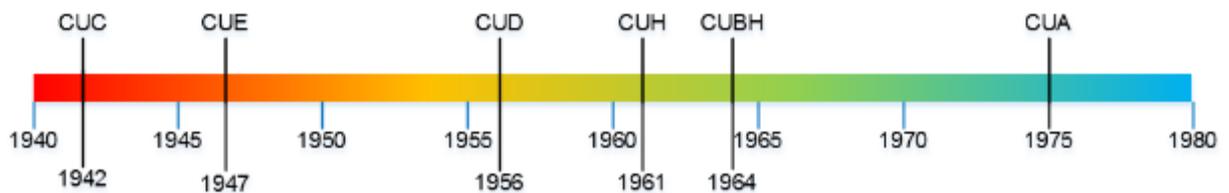
2.1.6 Avaliação de sistemas aspersores

A avaliação consiste em submeter o sistema aspersor a um conjunto de técnicas que permite quantificar o seu desempenho. Segundo Cunha et al. (2009), o desempenho de qualquer método de irrigação pode ser medido utilizando parâmetros de uniformidade e de eficiência da água aplicada pelo sistema aspersor.

Muitos coeficientes são usados para expressar a variabilidade de distribuição da água aplicada por um ou mais sistemas aspersores. Na Figura 14 são apresentados os coeficientes propostos ao longo dos anos, o primeiro coeficiente foi proposto por Christiansen (1942), CUC (Equação 3), e adota o desvio médio absoluto

como medida de dispersão. Desde então diversos coeficientes foram propostos, Coeficiente de Uniformidade Estatístico – CUE, Equação 4 (WILCOX; SWAILES, 1947), o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição – CUD, Equação 5 (CRIDDLE et al., 1956), Coeficiente de Uniformidade de Hart – CUH, Equação 6 (HART, 1961), Coeficiente de Uniformidade de Benami e Hore – CUBH, Equação 7 (BENAMI; HORE, 1964). Coeficiente de Uniformidade Absoluto – CUA, Equação 8 (KARMELI; KELLER, 1975).

Figura 14 - Ano de publicação dos coeficientes de uniformidade.



Fonte: Autor.

$$CUC = 100 \left\{ 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |x_i - x_{méd}|}{n \cdot x_{méd}} \right\} \quad (3)$$

Sendo:

CUC = Coeficiente de Uniformidade de Christiansen em %

x_i = valores medidos no coletor

$x_{méd}$ = média geral dos valores

n = tamanho da amostra

$$CUE = 100 \left(1 - \frac{S_d}{x_{méd}} \right) \quad (4)$$

Sendo:

CUE = Coeficiente de Uniformidade Estatístico em %

S_d = desvio padrão dos valores

$x_{méd}$ = média geral dos valores

$$CUD = 100 \left(\frac{x_{25}}{x_{méd}} \right) \quad (5)$$

Sendo:

CUD = Coeficiente de Uniformidade de Distribuição em %

x_{25} = média dos 25% do total de coletores, com as menores precipitações

$$CUH = 100 \left\{ 1 - \sqrt{\frac{2}{\pi} \left(\frac{S_d}{x_{méd}} \right)} \right\} \quad (6)$$

Sendo:

CUH = Coeficiente de Uniformidade de Hart %

Sd = desvio padrão dos valores

Xméd = média geral dos valores

$$CUBH = 166 \frac{N_A}{N_B} \left[\frac{2 T_B + D_B M_B}{2 T_A + D_A M_A} \right] \quad (7)$$

Sendo:

CUBH = Coeficiente de Uniformidade de Benami e Hore em %

Ma = média do grupo de dados de precipitação acima da média geral

Mb = média do grupo de dados de precipitação abaixo da média geral

Da = diferença entre o número de dados de precipitação abaixo e acima de Ma

Db = diferença entre o número de dados de precipitação abaixo e acima de Mb

Na = número de dados de precipitação acima da média geral

$$CUA = 50 \left[\frac{x_{25}}{x_{méd}} + \frac{x_{méd}}{x_{12,5}} \right] \quad (8)$$

Sendo:

CUA = Coeficiente de Uniformidade Absoluto %

X25 = média dos 25% do total de coletores, com as menores precipitações

X12,5 = média dos 12,5% do total de coletores, com as maiores precipitações

Xméd = média geral dos valores

Na literatura, diversos trabalhos abordam a utilização de um ou mais coeficientes para avaliar a uniformidade de sistemas de irrigação ou de projetos de simulador de chuva. Em desenvolvimento de simuladores de chuva o CUC foi utilizado por Pall et al. (1983); Souza e Siqueira (2011); Alves Sobrinho; Ferreira; Pruski, (2002) para avaliar a uniformidade da chuva simulada gerada pelas concepções desenvolvidas.

Em sistemas de irrigação, diversos estudos têm sido realizados considerando um ou mais coeficientes. Os estudos que utilizaram um coeficiente foram realizados por Borssoi et al. (2012), que utilizou o CUC para avaliar a uniformidade de distribuição

de um conjunto de irrigação, operando em quatro diferentes pressões. Dentre eles, pode-se citar Faria et al. (2012), que utilizou o CUC para avaliar a influência do vento na distribuição de água aplicada por aspersor. Faria et al. (2013), que utilizou o CUC para avaliar a distribuição de água em diferentes condições de vento e espaçamento entre aspersores. Prado (2016) que utilizou o CUC para avaliar a uniformidade de distribuição de água de um aspersor médio utilizando diferentes tamanhos de bocais e pressões de serviço.

Melo Filho (2015) e Martins et al. (2015) utilizaram o CUC e CUD respectivamente para avaliar a uniformidade da irrigação de um sistema aspersor na cultura da cana-de-açúcar e para avaliar a uniformidade de distribuição de um modelo de aspersor operando em seis diferentes pressões, com o objetivo de fornecer recomendações de regulagens do modelo avaliado.

Os estudos que utilizaram mais de dois coeficientes foram realizados por Martins et al. (2011), que utilizou o CUC, o CUD e o CUE para avaliar, em campo, o comportamento de cinco projetos de irrigação por aspersão. Tamagi (2012) utilizou os coeficientes CUC, CUD e CUE para estudar a variabilidade espacial da uniformidade da água aplicada por sistemas fixos de irrigação por aspersão, e Rocha et al. (1999) utilizaram o CUC, CUE, CUD, CUH e UDH para avaliar o efeito de diferentes níveis de uniformidade de distribuição superficial de água em irrigação convencional na superfície e no perfil do solo.

O CUC é o coeficiente mais conhecido e o mais utilizado devido a sua simplicidade, isto pode ser verificado nos trabalhos citados anteriormente onde o CUC está presente em todos, sendo que por convenção, 80% representam em geral o seu valor mínimo aceitável (ROCHA et al., 1999), porém, com o objetivo de permitir um melhor agrupamento da classificação do CUC, Mantovani (2001) definiu uma classificação conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Grau de aceitação para os valores de CUC.

Nível	CUC (%)
Excelente	Maior que 90
Bom	80 – 90
Razoável	70 – 80
Ruim	60 – 70
Inaceitável	Menor que 60

Fonte: Mantovani (2001).

Para classificar os valores do CUE e do CUD, a ASAE (1996) define os critérios conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Grau de aceitação para os valores de CUE e CUD.

Nível	CUE (%)	CUD (%)
Excelente	100 – 95	100 – 90
Bom	90 – 85	90 – 75
Normal	80 – 75	75 – 62
Ruim	70 – 65	62 – 52
Inaceitável	Menor que 60	Menor que 50

Fonte: Adaptado ASAE (1996).

2.1.7 Medição da energia cinética das gotas de chuva

A medição da energia cinética, bem como o tamanho e a velocidade de queda das gotas, é um importante indicador para determinação da erosividade do solo, visto que a partir do valor da energia cinética é possível avaliar o potencial erosivo da chuva (FERREIRA, 2010; COLARES, 2016).

Em função da importância da medição, diversas formas têm sido utilizadas, entre elas: método da farinha de trigo, imersão ao óleo, métodos fotográficos, papel filtro, aparelhos ópticos ou radares meteorológicos. Apesar de simples, estes métodos são demorados e com precisão limitada e não fornecem a velocidade de queda das gotas de forma direta. Com isso a determinação da energia cinética consiste na utilização das propriedades físicas das gotas: velocidade, tamanho e distribuição das gotas de chuva (COLARES, 2016).

A utilização do método da farinha foi realizada por Carvalho, M. F. et al. (2012), que utilizou nos experimentos pressões de 20 kPa, 40 kPa e 60 kPa, uma altura de 1,98 m e configurou no simulador precipitações de 38 a 420 mm h⁻¹. O autor destacou que apesar deste método ser trabalhoso, ele se apresenta uma importante alternativa, visto que não exige sofisticados equipamentos para seu emprego. O método da farinha consiste em coletar as gotas de água em bandejas contendo uma camada de farinha de trigo, que por meio do contato da água com a farinha formam-se grânulos que serão secos e separados em diferentes tamanhos. Este método foi descrito por Hudson (1964).

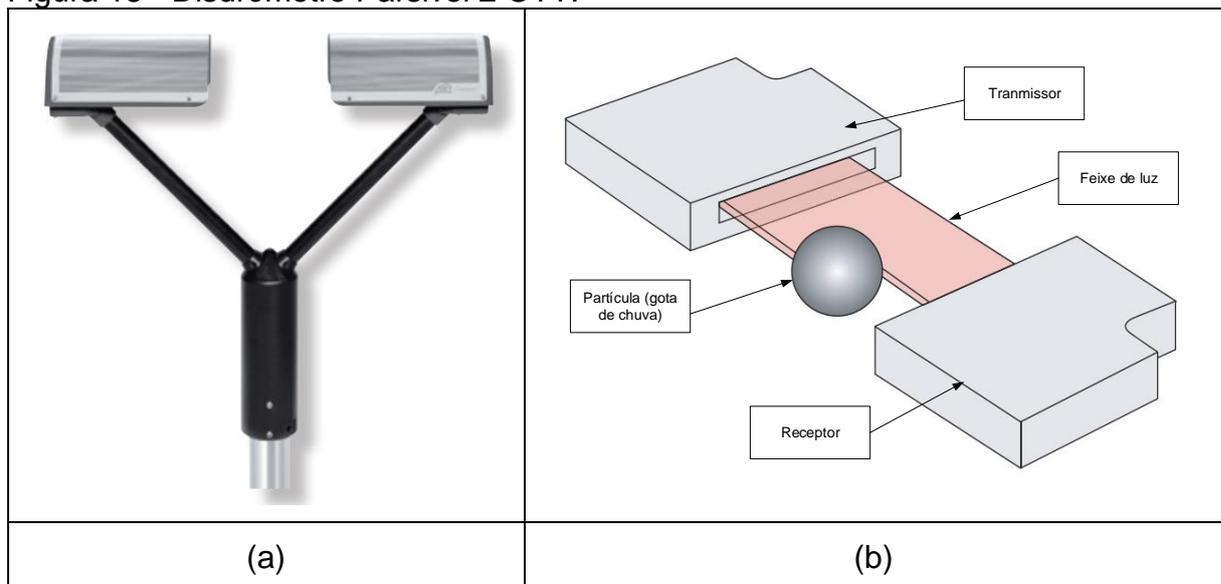
Seja para as condições de chuva natural, chuva simulada ou na irrigação por aspersão, as gotas de água apresentam diferentes tamanhos, e com isso alcançam

deferentes valores de velocidade de queda fazendo com que a superfície do solo fique exposta ao impacto dessas gotas com diferentes valores de energia cinética (FERREIRA, 2010).

Na busca por resultados mais precisos e métodos confiáveis, recentemente tem sido utilizado os disdrômetros para realização da medição da enérgica cinética das gotas, bem como velocidade de queda, tamanho e intensidade.

Um dos modelos de disdrômetro mais utilizado é o OTT Parsivel⁵ (Figura 15a), que consiste de um dispositivo óptico a LASER, tendo capacidade para medir o tamanho das gotas e a velocidade em 32 classes . O disdrômetro apresenta um feixe de luz horizontal onde o sensor converte o feixe de luz em um sinal elétrico (Figura 15b).

Figura 15 - Disdrômetro Parsivel 2 OTT.



Fonte: Adaptado OTT (2017).

O disdrômetro OTT Parsivel foi utilizado por Colares (2016) para caracterizar chuva simulada em um túnel de vento. O autor realizou a caracterização consideração alturas de 0,85 m e 1,25 m entre o mecanismo aspersor e o ponto de medição do disdrômetro e três pressões da água no sistema, 100 kPa, 150 kPa e 200 kPa, sendo que para cada combinação foram realizadas três repetições. Como resultado, Colares

⁵ Parsivel significa *PAR*ticle *Size* e *VEL*ocity.

(2016) verificou que o disdrômetro apresentou melhores resultado quando comparado com os outros métodos utilizados.

Já, Ramon et al. (2017) utilizaram um disdrômetro do tipo OTT Parsivel para realizar a medição da energia cinética e intensidade das chuvas naturais ocorridas na região sul do Brasil, e com isso comparar os resultados obtidos com os valores de energia cinética resultantes da aplicação de equações matemáticas considerando a mesma intensidade de precipitação medida pelo disdrômetro, e com isso determinaram por meio de modelos matemáticos a estimativa de erosão. Por meio deste procedimento, Ramon et al. (2017) verificou que o disdrômetro apresentou resultados coerentes com os dados calculados matematicamente.

2.2 FORMALIZAÇÃO DE PROCEDIMENOS PARA ESTUDOS COM SIMULADORES DE CHUVA

Na literatura, como já apresentado na seção 2.1, diversos trabalhos abordam o projeto e utilização de simuladores de chuva para os diferentes tipos de experimentos. Porém, publicações que abordam metodologias, diretrizes, normativas ou guias de orientação relacionadas a sistemas aspersores ainda são escassas ou são propostas particulares de um caso experimental, sendo estas descritos na sequência.

2.2.1 Metodologia para estudos de sistemas aspersores

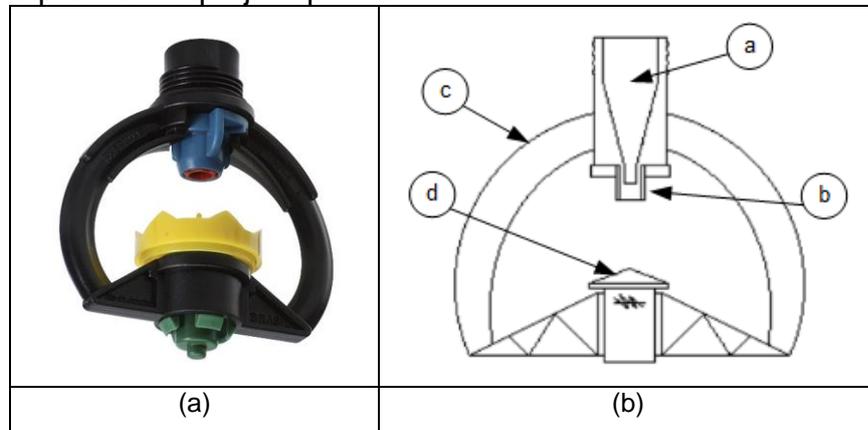
Devido à necessidade da realização de estudos em aspersores do tipo jato-placa, a proposta de metodologia de Silva e Silveira Neto (2006) tem o objetivo de realizar a quantificação de espectro de gotas formadas em sistemas de aspersão do tipo jato-placa. A metodologia proposta é derivada do trabalho de Silva (2002) e teve uma versão adaptada em Silva (2011), intitulada de formação de gotas em aspersores.

A Figura 16 apresenta um aspersor desse tipo, sendo que a Figura 16a ilustra o modelo de aspersor comercial *Asfix AF4* comercializado pela FABRIMAR, sendo este modelo de aspersor utilizado principalmente em pivô central.

Na Figura 16b, são apresentados os principais componentes desse tipo de aspersor, o item (a) corresponde ao bocal cônico, (b) camisa para o jato, (c) suporte para a placa e (d) a placa do tipo convexa. Em função da presença dessa placa que

pode ser côncava ou convexa e apresentar diferentes ranhuras é que esse tipo de aspersor recebe o nome de jato-placa.

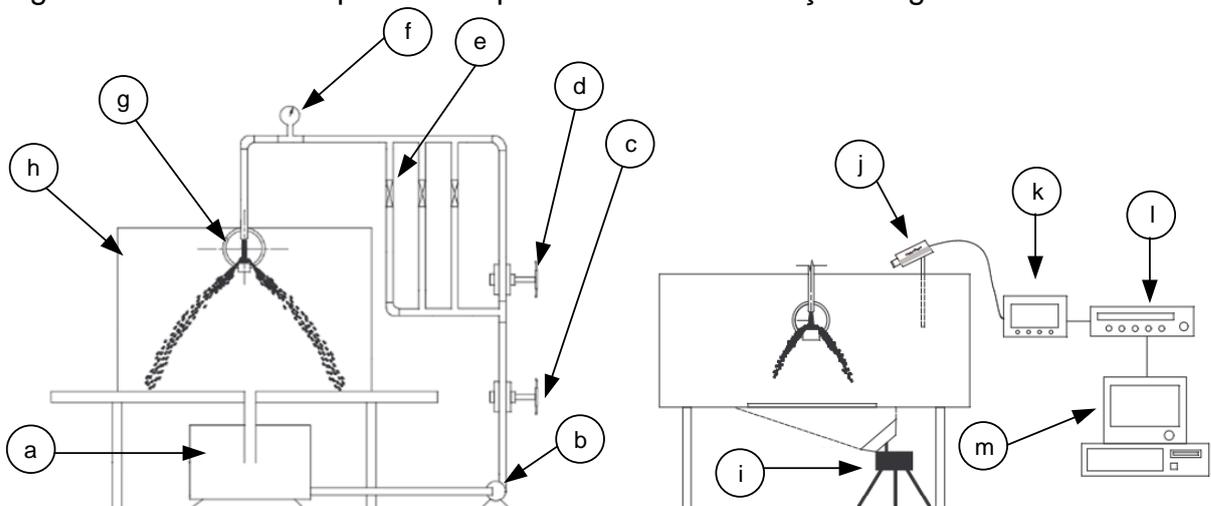
Figura 16 - Aspersor do tipo jato-placa.



Fonte: (a) FABRIMAR, (2017); (b) Oliveira, C. S. D.; Gomide; Oliveira, S. A. G. (2000).

A metodologia de estudo de Silva e Silveira Neto (2006) corresponde a uma bancada para investigação experimental (Figura 17) da formação de gotas em aspersores do tipo jato-placa. As principais partes da bancada são: (a) reservatório de água; (b) bomba hidráulica; (c) válvula; (d) válvula de controle; (e) câmara coletora de água; (f) manômetro; (g) sistema de aspersão do tipo jato-placa; (h) sistema de proteção; (i) lâmpada; (j) câmera filmadora de alta velocidade; (k) monitor da câmera filmadora; (l) vídeo; (m) computador com placa de aquisição de imagens.

Figura 17 - Bancada experimental para estudo da formação de gotas



Fonte: Adaptado de Silva e Silveira Neto (2006).

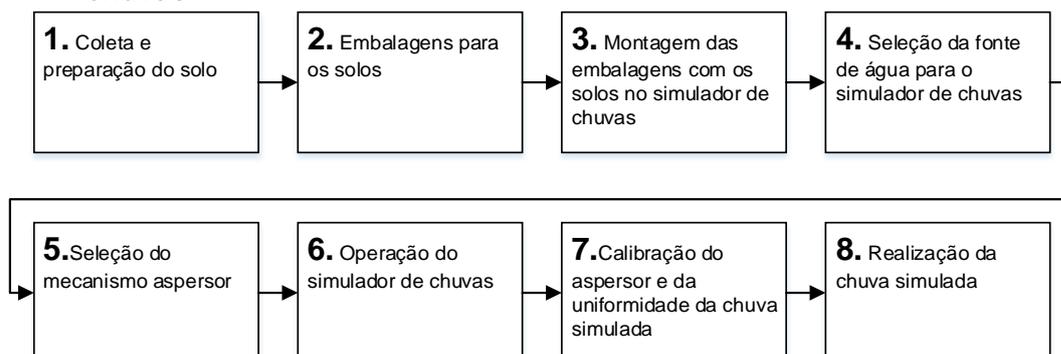
A metodologia utiliza um processo de filmagem para registrar as imagens do espectro de gotas geradas na bancada experimental proposta e desta forma caracterizar o espectro de gotas formado. Silva (2002; 2011) concluiu que a metodologia utilizada permitiu um estudo detalhado do processo de formação de gotas em aspersores do tipo jato-placa, com determinação e análise da influência das variáveis pré-estabelecidas para o tamanho médio das gotas. E Silva e Silveira Neto (2006) concluíram com este procedimento experimental que o aumento do diâmetro de saída do aspersor resulta no aumento do diâmetro médio das gotas, enquanto que o aumento na vazão da água no sistema resulta na diminuição do tamanho médio das gotas.

2.2.2 Protocolo para estudos de erosão dos solos utilizando Simulador de chuvas

Em um contexto geral, os projetos de simuladores são desenvolvidos de forma única, atendendo aos requisitos de cada pesquisador e às condições de estudos. Isso acaba gerando uma grande variedade de concepções de simuladores de chuva, tornando difícil a comparação entre os resultados obtidos nas diferentes regiões e países (KIBET et al., 2014).

Desta forma, buscando padronizar os estudos de erosão dos solos utilizando simuladores de chuva na América do Norte, Kibet et al., (2014) apresentou um protocolo para auxiliar projetistas e pesquisadores. Este protocolo é organizado em oito etapas (Figura 18), onde cada uma delas é composta por um conjunto de atividades.

Figura 18 - Etapas das diretrizes para ensaio de erosão dos solos com simulador de chuvas.



Fonte: Adaptado de Kibet et al. (2014).

A descrição das oito etapas do protocolo é apresentada no Apêndice A. Porém, em função da questão de pesquisa declarada, destaca-se a etapa cinco, sendo está relacionada com o processo de seleção do mecanismo aspersor. Esta etapa consiste na escolha entre quatro modelos de pontas aspersoras comerciais, devendo ser observado os valores de pressão e vazão recomendado pelo fabricante.

Kibet et al. (2014) destaca que a utilização de simuladores de chuva tem um papel fundamental para compreender cada vez mais o fenômeno da erosão e escoamento dos solos, além de destacar que a utilização de um protocolo padronizado vai permitir a comparação dos dados entre os pesquisadores.

2.3 PROPRIEDADE INDUSTRIAL

Uma patente é um eficaz instrumento que permite aos empresários obter exclusividade no uso de um novo produto ou processo, alcançar uma posição tecnológica e empresarial privilegiada no mercado e obter lucros por meio da exploração direta ou concessão de licenças (INPI, 2013).

De acordo com o Ato Normativo 127, item 15.1.2, que regula a Lei de Propriedade Industrial (LPI) 9.279/96, o relatório descritivo de um pedido de patente deve apresentar um conjunto de informações que permita descrever, de forma clara, concisa e precisa, a solução técnica proposta para um problema técnico existente além de descrever as vantagens da invenção a ser protegida em relação ao estado da técnica.

Segundo o Instituto Nacional da Propriedade Industrial, INPI (2013), a Patente é um direito exclusivo concedido pelo Estado relativamente a uma invenção ou modelo de utilidade, que atende ao requisito de novidade, que envolva uma atividade inventiva e é suscetível de aplicação industrial. É importante compreender que invenção é diferente de inovação, a invenção é uma solução técnica de um problema técnico, já a inovação se refere a capacidade de transformar uma invenção em um produto ou processo negociável (INPI, 2013).

De uma forma geral, no Brasil o prazo de vigência de uma patente de invenção é de 20 anos e de uma patente de modelo de utilidade é de 15 anos contadas a partir da data do depósito (INPI, 2013).

Nesse contexto, as empresas fabricantes de sistemas aspersores buscam proteger o investimento realizado na pesquisa e desenvolvimento de seus produtos e

o mecanismo adotado são as patentes de invenção, modelo de utilidade ou desenho industrial.

Um pedido de patente pode ser estruturado considerando os seguintes itens: título; campo da invenção; descrição do estado da técnica; objetivo; descrição das figuras; descrição detalhada da invenção; reivindicações; resumo e figuras. Esta estrutura não é uma regra fixa, serve como orientação geral (DIAS e ALMEIDA, 2013).

Na Figura 19 é apresentado um modelo de patente de invenção de uma ponta aspersora. Na Figura 19a é ilustrado a primeira página da patente, contendo informações relativas ao inventor, país onde foi depositado, códigos, data e outras informações relativas a patente.

Na Figura 19b e Figura 19c são apresentados os principais desenhos, onde o objeto da invenção permite a pulverização por múltiplos orifícios e tem por objetivo proporcionar uma distribuição da pulverização mais completa e uniforme e sua concepção é relativamente simples o que permite que o custo de fabricação seja menor (BOLMAN e PAULSEN, 2007).

Além da patente de invenção outra forma que as empresas utilizam para proteger seus produtos são as patentes de modelo de utilidade que é considerado o objeto de uso prático, suscetível de aplicação industrial que apresente nova forma ou disposição envolvendo ato inventivo que resulte em melhoria funcional no seu uso ou em sua fabricação (INPI, 2013).

Na Figura 20 é apresentado uma patente de modelo de utilidade intitulada de disposição introduzida em uma mini ponta atomizadora para nebulização de líquidos. A Figura 20a ilustra a primeira página da patente de modelo de utilidade que tem por objetivo produzir névoa a partir de misturas de ar e líquido, a disposição construtiva apresentada nas Figura 20b e Figura 20c permite atomizar gotas de água com diferentes viscosidades e densidades, permitindo desta forma a geração de névoa com gotas muito finas, além de que segundo Barros (2011), a ponta objeto de patente de modelo de utilidade é a menor ponta disponível no mercado.

Figura 19 - Patente de invenção US 2007/0069047 A1.

US 2007/0069047 A1

(19) **United States**
Patent Application Publication (35) Pub. No.: **US 2007/0069047 A1**
Bolman et al. (41) Pub. Date: **Mar. 29, 2007**

(54) **MULTIPLE DISCHARGE ORIFICE SPRAY NOZZLE**

(75) Inventors: **Bart R. Bolman**, Monticello, IL (US); **Gary Paulsen**, Itasca, IL (US)

Correspondence Address: **LEVING VOHT & MAYER, LTD**
 TWO PRESIDENTIAL PLAZA, SUITE 4900
 180 NORTH STEVENSON AVENUE
 CHICAGO, IL 60601-4731 (US)

(73) Assignee: **Spraying Systems Co.**, Wheaton, IL

(21) Appl. No.: **01/824,891**
 (22) Filed: **Sep. 21, 2006**

Related U.S. Application Data

(60) Provisional application No. 60/720,191, filed on Sep. 23, 2005.

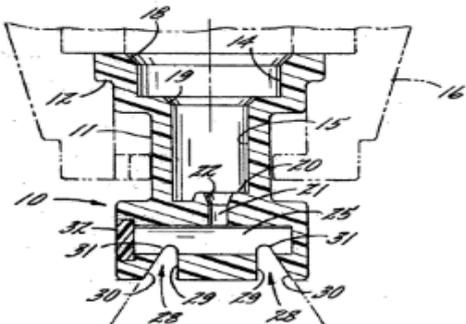
Publication Classification

(51) Int. Cl. **B05B 7/06 (2006.01)**
B05B 7/26 (2006.01)
B05B 7/24 (2006.01)
B05B 7/08 (2006.01)

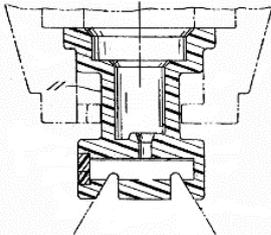
(52) U.S. Cl. **296427, 296432, 296436, 296424, 296427**

ABSTRACT

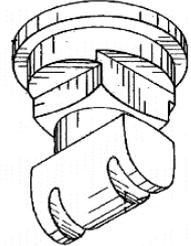
A spray tip for discharging a controlled liquid spray distribution is provided. The spray tip includes a spray tip body having an inlet end for connection to a pressurized liquid supply. The spray tip body includes a first fluid chamber having a first longitudinal axis and a second fluid chamber in fluid communication with the first fluid chamber and having a second longitudinal axis that extends transversely relative to the first longitudinal axis. A pair of discharge orifices are formed in the spray tip body. Each discharge orifice has a downstream side with a deflector surface for directing liquid discharging from the chamber. Each discharge orifice intersects the second fluid chamber adjacent a respective end thereof so as to define a pocket extending downstream of the deflector surface.



(a) Patente de invenção de ponta aspersora



(b) Vista em corte



(c) Vista isométrica

Fonte: Adaptado de Bolman e Paulsen (2007).

Figura 20 - Patente de modelo de utilidade MU 9101260-0 U2.



(21) **MU 9101260-0 U2**

(22) Data de Depósito: 27/06/2011
 (43) Data de Publicação: 11/02/2014
 (RPI 2249)

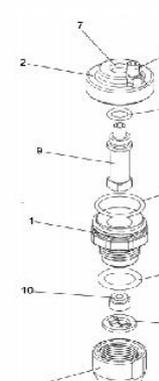
(51) Int. Cl.: **B05B 1/10**

(54) **Título:** DISPOSIÇÃO INTRODUZIDA EM MINI BICO ATOMIZADOR PARA NEBULIZAÇÃO DE LÍQUIDOS

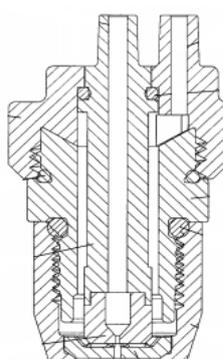
(73) **Titular(es):** KGF INDUSTRIA E COMÉRCIO DE BICOS PARA PULVERIZAÇÃO AGRÍCOLA LTDA-ME

(72) **Inventor(es):** GILSON ALMEIDA BARROS

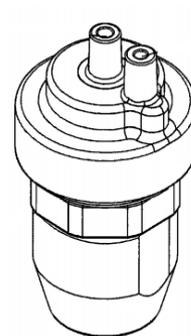
(57) **Resumo:** DISPOSIÇÃO INTRODUZIDA EM MINI BICO ATOMIZADOR PARA NEBULIZAÇÃO DE LÍQUIDOS, que trata de um prático e inovador modelo de bico atomizador e nebulizador de líquidos, pertencente ao campo da mecânica, de uso mais precisamente em equipamentos e/ou sistemas para produção de névoa a partir de misturas de ar e líquido, e ao qual foi dada original disposição construtiva, por ser constituído de um componente atomizador e gerador de micro gotas, a partir de duplo fluido ar/líquido, contendo diferentes pesos moleculares viscosidade e densidades. Essa diferencial, em relação aos bicos nebulizadores existentes, permite a geração de névoa com grande potencial de deslocamento na atmosfera tornando-a muito eficaz em diferentes aplicações.



(a) Modelo de utilidade de ponta aspersora



(b) Vista em corte

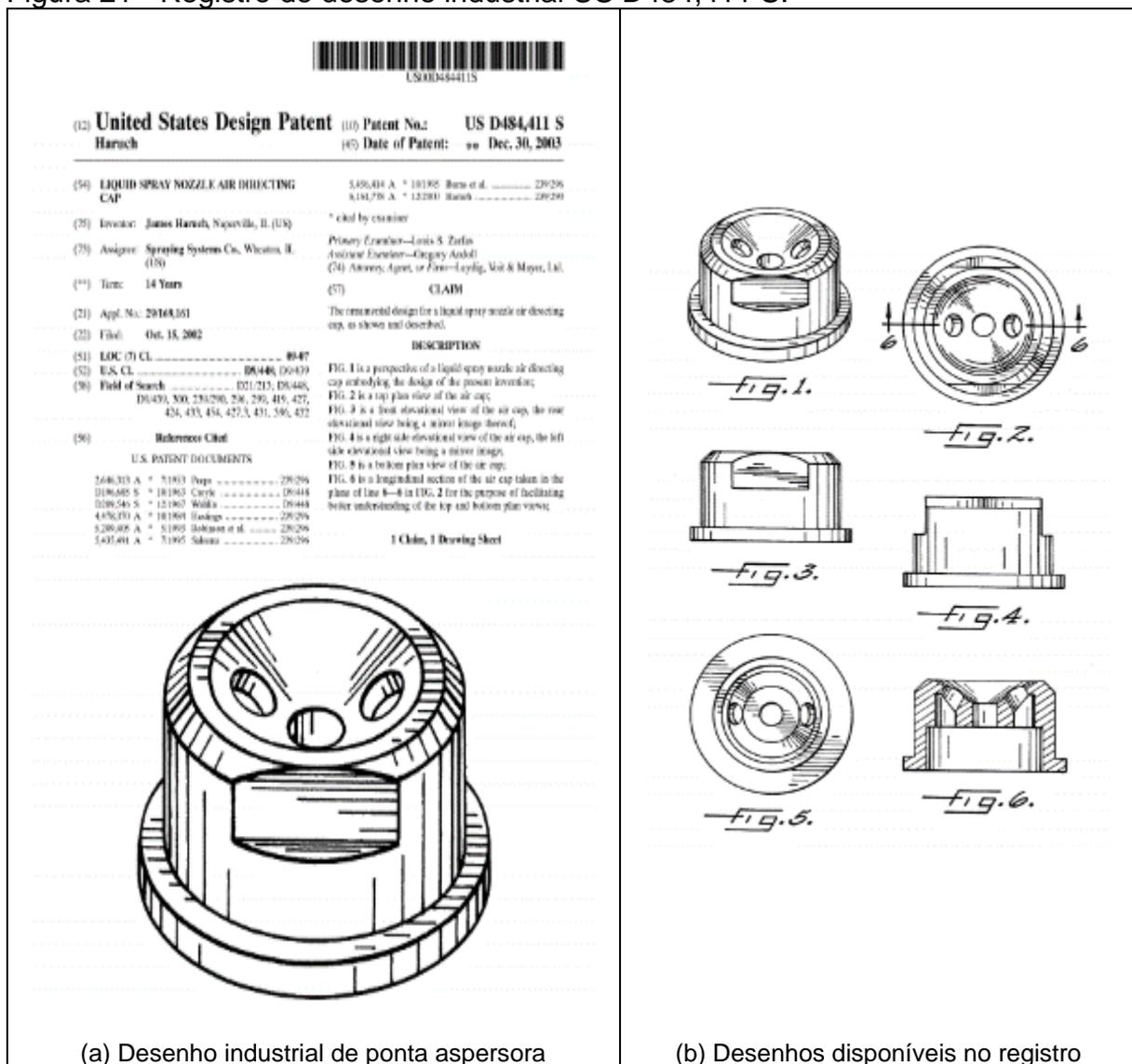


(c) Vista isométrica

Fonte: Adaptado de Barros (2011).

Na Figura 21a é apresentado um modelo de registro de desenho industrial de uma ponta de pulverização de líquidos inventado por Haruch (2002). Nota-se que diferentemente das patentes de invenção e de modelo de utilidade, o desenho industrial protege a forma estética da ponta aspersora. Desta forma, no documento é dado enfoque nos desenhos detalhados do objeto de registro (Figura 21b).

Figura 21 - Registro de desenho industrial US D484,411 S.



(a) Desenho industrial de ponta aspersora

(b) Desenhos disponíveis no registro

Fonte: Adaptado de Haruch (2002).

2.3.1 Mapeamento tecnológico de pontas aspersoras

O Mapeamento Tecnológico (MT) é um processo que tem o objetivo de auxiliar no planejamento da evolução do mercado, produto e tecnologia integrado à estratégia da empresa (ALBRIGHT; KAPPEL, 2003). O MT vem sendo utilizado nos mais diversos níveis empresariais e de diferentes setores produtivos (GONZALES, 2015). Neste contexto, a autora propõe uma metodologia que permite realizar o mapeamento tecnológico de produtos auxiliado pelas tendências de evolução da TRIZ⁶.

A análise de patentes tem sido utilizada como uma sofisticada ferramenta para auxiliar no mapeamento tecnológico e para o planejamento de novas tecnologias, além de ser considerada um indicador das atividades de Pesquisa e Desenvolvimento das empresas e centros de pesquisas para avaliar o potencial competitivo da tecnologia (GONZALES, 2015).

No que se refere ao pedido de patente, a descrição do estado da técnica é um dos itens da estrutura de um registro de patente, ela relata o atual estágio de desenvolvimento do assunto objetivo de publicação ou proteção, enquanto que em um projeto científico, o relato das produções anteriores ao tema pesquisa pode ser denominado de estado da arte ou estado do conhecimento, que consiste em um mapeamento acerca da produção acadêmica no tema de interesse (DIAS; ALMEIDA, 2013).

Neste contexto, existem diversos mecanismos que permitem a realização de busca de registros sobre o tema, como por exemplo, base de dados de patentes do Brasil, Japão, China, Coréia, Estados Unidos, etc, além de portais de busca como *Espacenet* e *Patentscope* e *softwares* que auxiliam na busca das patentes.

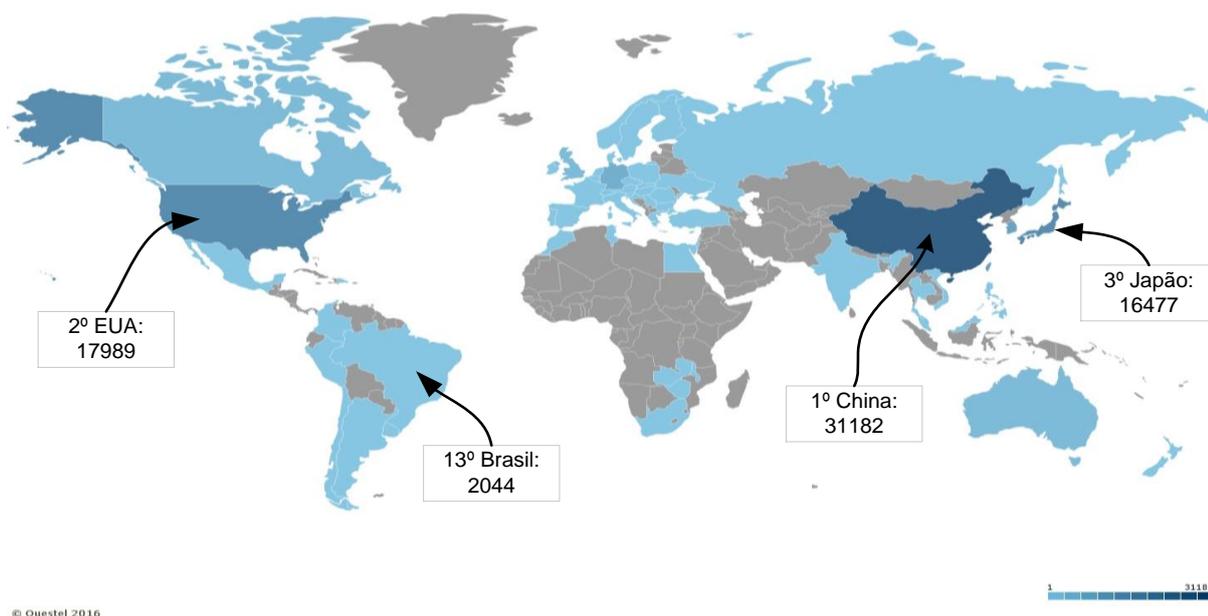
A busca pode ser realizada utilizando palavras-chaves, nome de empresas, inventores, entre outros parâmetros. Em uma busca de anterioridades utilizando o *software* comercial *QUEST ORBIT*⁷ foi possível verificar os registros acerca do contexto de pesquisa do projeto, ponta aspersora.

⁶ TRIZ = Teoria da Solução Inventiva de Problemas

⁷ O *Software* abrange banco de dados de mais de 96 países, destes, 21 é possível ter acesso aos textos integrais.

Como resultado da busca, o software indicou 66026 patentes relacionadas ao termo “*spray nozzle*”⁸. A Figura 22 apresenta o depósito de patentes nos países até o ano de 2016, o primeiro lugar é ocupado pela China, onde foram depositados 31182 pedidos de patentes, em segundo lugar os Estados Unidos, onde foram depositados 17989 pedidos de patentes e em terceiro lugar o Japão, com 16477 patentes depositadas. O Brasil ocupa a décima terceira posição, com 2044 patentes depositadas. Ressaltando que uma mesma patente pode ser depositada em mais de um país.

Figura 22 - Mapa global do depósito das patentes de “*spray nozzles*”.

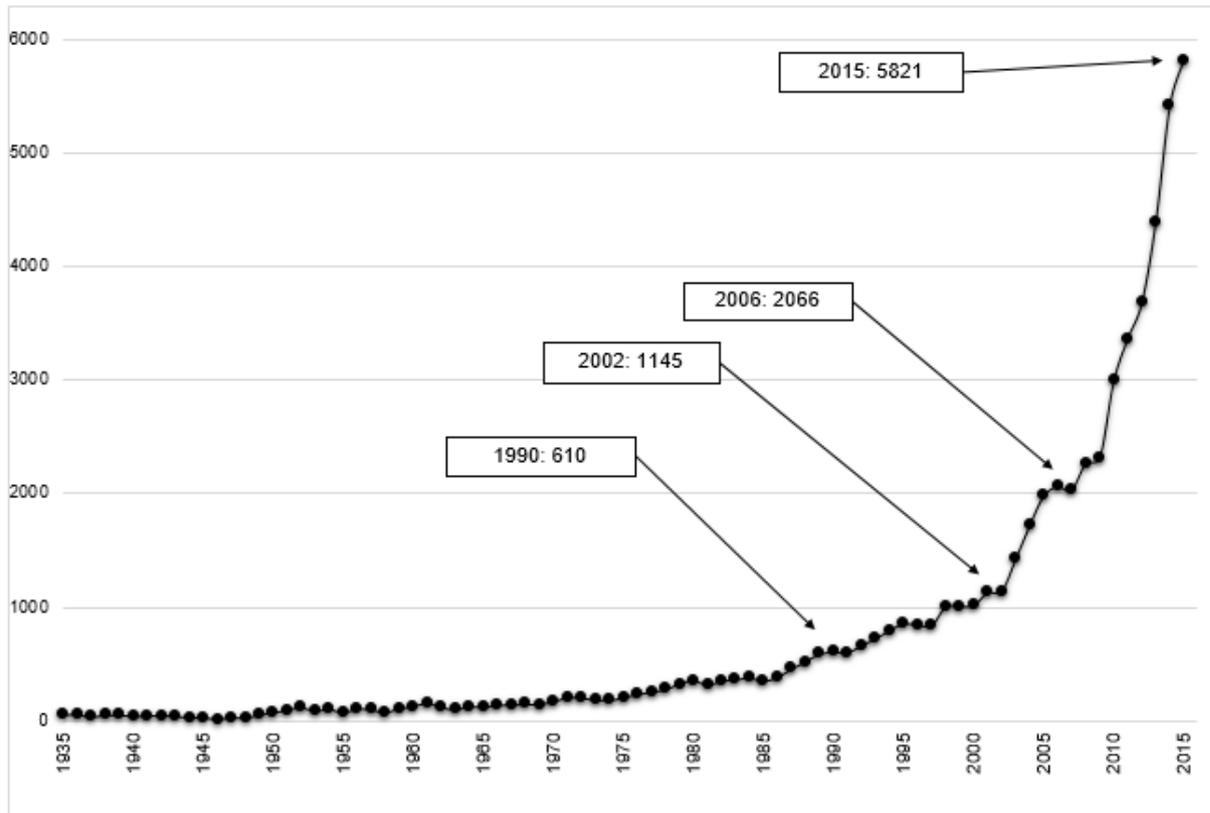


Fonte: Adaptado de QUEST ORBIT (2016).

Analisando as patentes depositadas de 1935 até 2016³, é possível verificar na Figura 23 o comportamento histórico dos depósitos. Observando que até meados dos anos 1990 o número de patentes depositadas apresentava pequenos aumentos gradativos. Em 1990 foram depositadas 610 patentes e para duplicar o número de patentes depositadas decorreram aproximadamente 12 anos, ocorrendo em 2002 com 1145 patentes depositadas. De 2005 até 2009 observou-se o aumento foi mais acentuado, tendo como pico o ano de 2015 com 5821 patentes depositadas.

⁸ Foi utilizado o termo em língua inglesa por ser considerado uma linguagem universal, e a maioria das patentes serem apresentadas nesta língua.

Figura 23 - Patentes depositadas de 1935 – 2016.



Fonte: Adaptado de QUEST ORBIT (2016).

O termo pesquisado (*spray nozzle*) tem aplicação nas mais diversas áreas, no agrícola, combustão, lavagem de equipamentos, alimentícia, etc. Cabendo estudos mais específicos acerca do contexto da pesquisa.

Desta forma, a análise de patentes, busca de anterioridades, é uma ferramenta que pode ser utilizada para o mapeamento tecnológico auxiliando no planejamento do projeto do produto (GONZALES, 2015). Depreende-se também que a busca de anterioridades em banco de dados de patentes pode auxiliar na seleção de pontas aspersoras em projetos de simuladores de chuva.

2.4 MODELAGEM DE PROCESSOS

A construção de modelos serve para diferentes propósitos, explicitar fenômenos, realizar previsões, tomadas de decisão, comunicação, entre outros, podendo ser classificados de diversas formas (BACK et al., 2008). Para o mesmo autor, as empresas que buscam a formalização de seus processos precisam

explicitar⁹ as suas rotinas e metodologias utilizadas, e isso ocorre por meio da modelagem de processos.

A modelagem de processo não significa modelar a empresa em todos os seus detalhes, mas modelar a parte que requer uma representação explícita das suas atividades (VERNADAT, 1996). Neste sentido, a modelagem de processo e a adoção de modelos de referência auxiliam no aumento da capacidade de gestão do conhecimento da empresa, principalmente como um meio de transformação do conhecimento tácito em explícito.

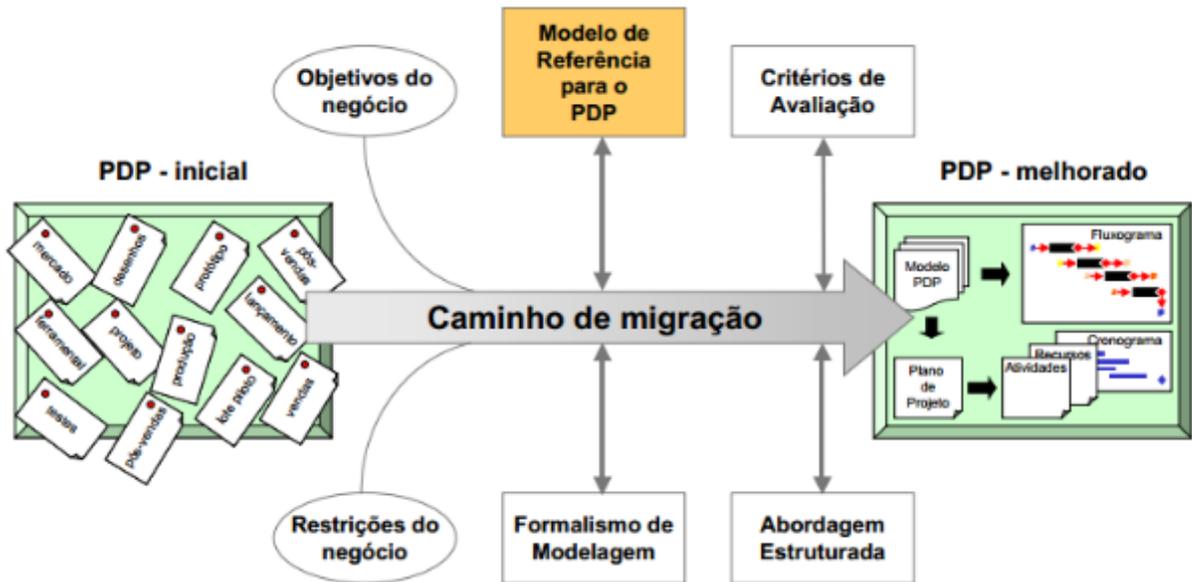
Segundo Romano (2003), a modelagem do processo de desenvolvimento de produtos resulta na sua formalização, com a descrição das fases, atividades, responsáveis, recursos disponíveis e informações necessárias e/ou geradas, permitindo desta forma a construção de uma visão única e compartilhada entre os envolvidos no processo.

A elaboração de modelos para o Processo de Desenvolvimento de Produtos (PDP) permite a melhoria dos processos, possibilitando aos membros da equipe o entendimento, planejamento, execução e controle de todas as etapas do processo (BERGAMO, 2014). Assim como os modelos auxiliam no desenvolvimento de produtos, as diretrizes são orientações, guias, rumos, linhas que definem e regulam um caminho a ser percorrido, atuando como instruções ou indicações para se estabelecer um plano, normas de procedimentos.

O caminho a ser percorrido para que ocorra a formalização do processo é denominado de caminho de migração, que corresponde a transição do modelo atual para um modelo do processo melhorado (VERNADAT, 1996) (Figura 24).

⁹ A palavra explicitar significa tornar explícito, sem deixar dúvidas, de tal forma que uma descrição é realizada com precisão, clareza.

Figura 24 - Caminho de migração para melhoria do PDP.



Fonte: Romano (2003; 2013).

Atualmente nas organizações a modelagem de processos está seguindo novas direções, tendo menos ênfase nos mapas de processo e mais ênfase nos serviços e na capacidade de negócio das organizações¹⁰. Embora as organizações apliquem diversas abordagens para lidar com as melhorias de processos, essas abordagens produzem muitas vezes processos departamentais que geram o mesmo resultado, apenas melhor ou mais rápido (ABPMP, 2013).

A modelagem de processos requer um importante conjunto de habilidade e técnicas que permitem à equipe de projeto e a gestão do negócio da organização compreender, comunicar e gerenciar os componentes envolvidos no processo de negócio, sendo uma atividade fundamental para o gerenciamento da organização (ABPMP, 2013).

O objetivo de modelar um processo é criar uma representação de maneira completa e precisa sobre o seu funcionamento, podendo apresentar diferentes níveis de detalhamento. Onde, em uma determinada situação um simples diagrama pode ser suficiente para representar um processo, enquanto em outros casos é necessário

¹⁰ A análise interna de uma organização contempla sua estrutura organizacional, sendo que está é formada por três principais pilares, as tecnologias, pessoas e as tarefas. A inter-relação entre os pilares e a posição que eles ocupam na organização vão definir a hierarquia, o fluxo de informações, as funções e os níveis de tomada de decisão (SCHULTZ, 2016).

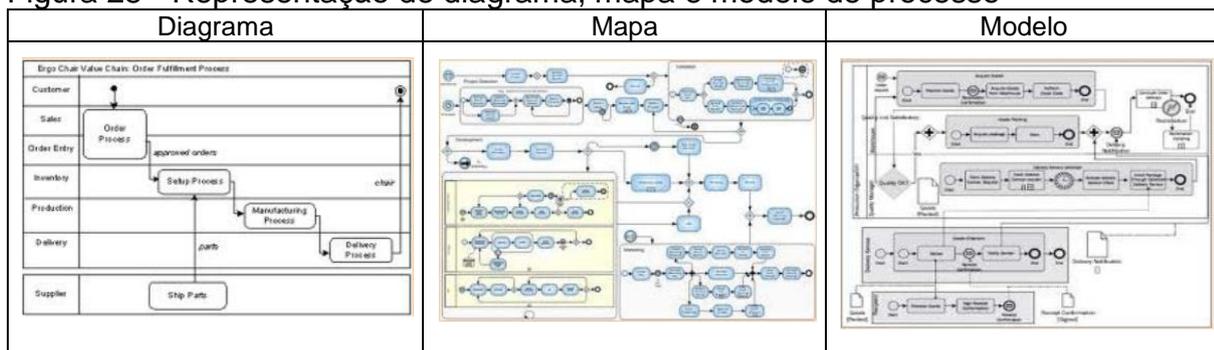
a elaboração de modelos completos e detalhados para permitir explicitar as atividades (ABPMP, 2013).

A utilização de modelos implica na representação simplificada de uma coisa, conceito ou atividade, sendo que os modelos podem ser matemáticos, gráficos, físicos, narrativos ou alguma combinação desses tipos (ABPMP, 2013).

Na modelagem de processos, geralmente os termos diagrama de processo, mapa de processo e modelo de processo são utilizados de forma intercambiável ou até mesmo como sinônimos. Entretanto, têm diferentes propósitos e aplicação, cada um representando diferentes estágios de desenvolvimento, agregando diferentes níveis de informação para o entendimento, análise e desenho do processo (ABPMP, 2013).

Conforme apresentado na Figura 25, um diagrama retrata os principais elementos de um fluxo de processo, mas omite detalhes menores de entendimento dos fluxos de trabalho. Já o mapa fornece uma visão mais abrangente dos principais componentes do processo e apresenta maior precisão do que o diagrama. Já, o modelo implica na representação de um determinado estado do negócio, podendo este ser atual ou futuro, e dos respectivos recursos envolvidos, que vão desde pessoas, informações, instalação, automação, finanças e insumos (ABPMP, 2013).

Figura 25 - Representação de diagrama, mapa e modelo de processo



Fonte: ABPMP (2013).

Os modelos podem ser classificados em dois grupos: os Modelos de Referência (MR), que tem uma aplicação mais ampla e geral que podem ser utilizados como referência para o desenvolvimento de modelos específicos, apresentando a descrição das fases, atividades, recursos, métodos e ferramentas, técnicas de gerenciamento de projeto, informações e a organização do processo propriamente dito; e os Modelos

Específicos¹¹ (ME), que representam e/ou são utilizados por uma empresa específica para situações específicas (ROMANO, 2003).

Na literatura são apresentadas diversas modelagens de processos como por exemplo, modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas (ROMANO, 2003), modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas para empresas de pequeno e médio porte (BERGAMO, 2014), modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos (MRM) (BARBALHO e ROZENFELD, 2013), proposta de metodologia para o projeto de motores de combustão interna (ANTONELLO, 2015), entre outros.

Para realizar a modelagem do processo é necessário definir a notação de modelagem que será utilizada. A notação consiste no conjunto padronizado de símbolos e regras com os seus respectivos significados. Na literatura existem diversos padrões de notação para modelagem de processos, cada um com suas características, vantagens e desvantagens e a escolha de qual modelo será utilizado pela equipe de projeto pode ser muitas vezes uma difícil tarefa (ABPMP, 2013).

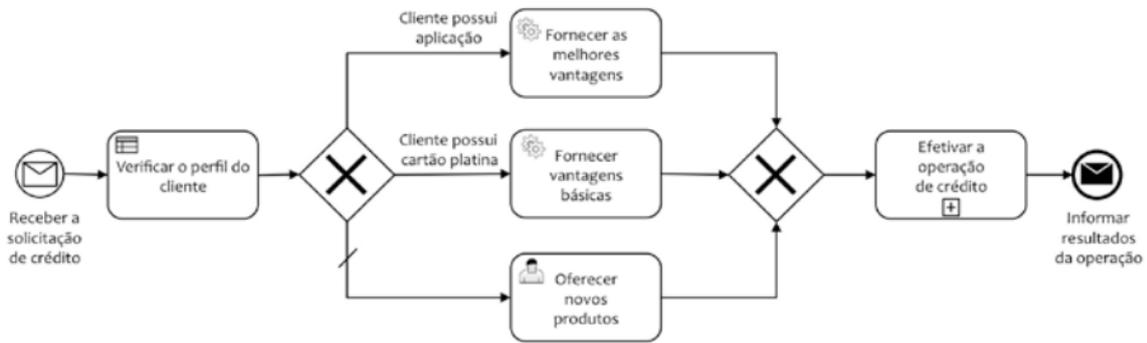
2.4.1 Mapeamento utilizando BPMN

Uma das notações que vem ganhando espaço nas organizações é o modelo *Business Process Model and Notation* (BPMN), que representa um conjunto robusto de símbolos para modelagem de diferentes aspectos de processos, onde os símbolos descrevem claramente o fluxo de atividades e a ordem de precedência.

O modelo BPMN (Figura 26) tem como vantagem a versatilidade para modelar as diversas situações de um processo e seu fácil uso e entendimento ser difundido em muitas organizações, porém exigem treinamento e experiência para seu correto uso e aplicação da grande variedade de símbolos, apresenta maior dificuldade para visualização do relacionamento entre vários níveis de um processo e exige muitas vezes de mais de uma ferramenta para realizar a modelagem (ABPMP, 2013).

¹¹ Também são conhecidos como Modelos Particulares.

Figura 26 - Exemplo de representação utilizando BPMN.



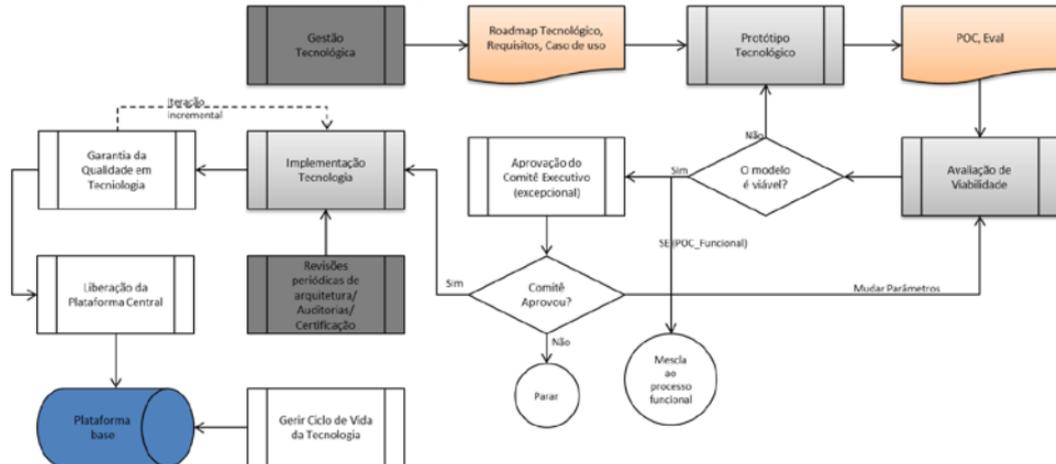
Fonte: ABPMP (2013).

2.4.2 Mapeamento utilizando fluxogramas.

Os fluxogramas são amplamente utilizados nas organizações, sendo que a notação dos fluxogramas busca seguir o padrão apresentado pela ANSI de 1970. Os fluxogramas (Figura 27) são baseados em um conjunto simples de símbolos para operações, decisões e outros elementos.

Têm sido utilizados nas organizações a muito tempo, devido seu fácil entendimento, permitindo rápido aprendizado e são suportados por ferramentas gráficas de uso geral e de visualização que são de baixo custo. Porém, os fluxogramas apresentam uma grande variação em sua padronização. Podendo em muitos casos ser imprecisos e os modelos exigirem o uso de símbolos de conexão para mostrar onde os segmentos de processo continuam (ABPMP, 2013).

Figura 27 - Exemplo de representação utilizando fluxograma.

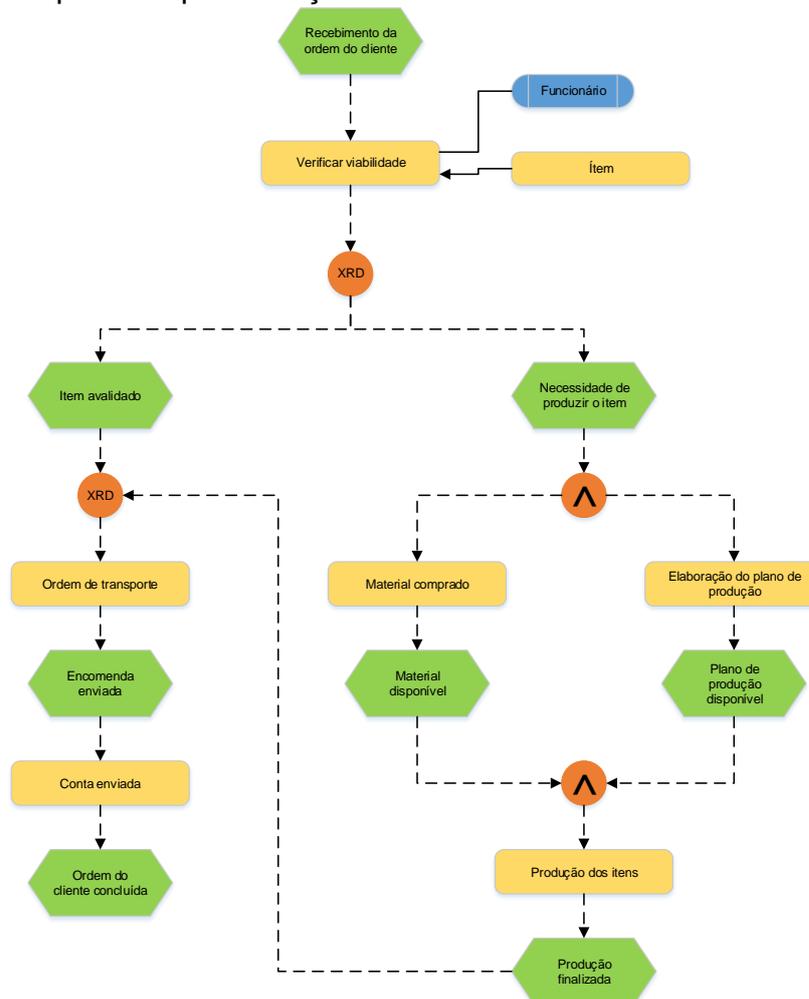


Fonte: ABPMP (2013).

2.4.3 Mapeamento utilizando EPC.

Outra notação utilizada pelas organizações é o *Event-driven Process Chain* (EPC), que teve seu desenvolvimento no começo da década de 1990 na Suíça e se baseia em operações lógicas, “E”, “OU” e “OU EXCLUSIVO” que são denominadas de regras. O EPC (Figura 28) varia do muito simples ao muito complexo, com isso cada regra expressa decisões, testes, paralelismo e convergência no fluxo de processo. O EPC pode ser usado para modelagem, análise e redesenho de processos, pode apresentar raias verticais ou horizontais e possui um conjunto de símbolos que são de fácil entendimento. Com isso o EPC é versátil para identificação de restrições do processo. Porém, o EPC apresenta como desvantagem a necessidade de equipes disciplinadas e para modelagem mais robustas apresenta limitações (ABPMP, 2013).

Figura 28 - Exemplo de representação utilizando EPC.

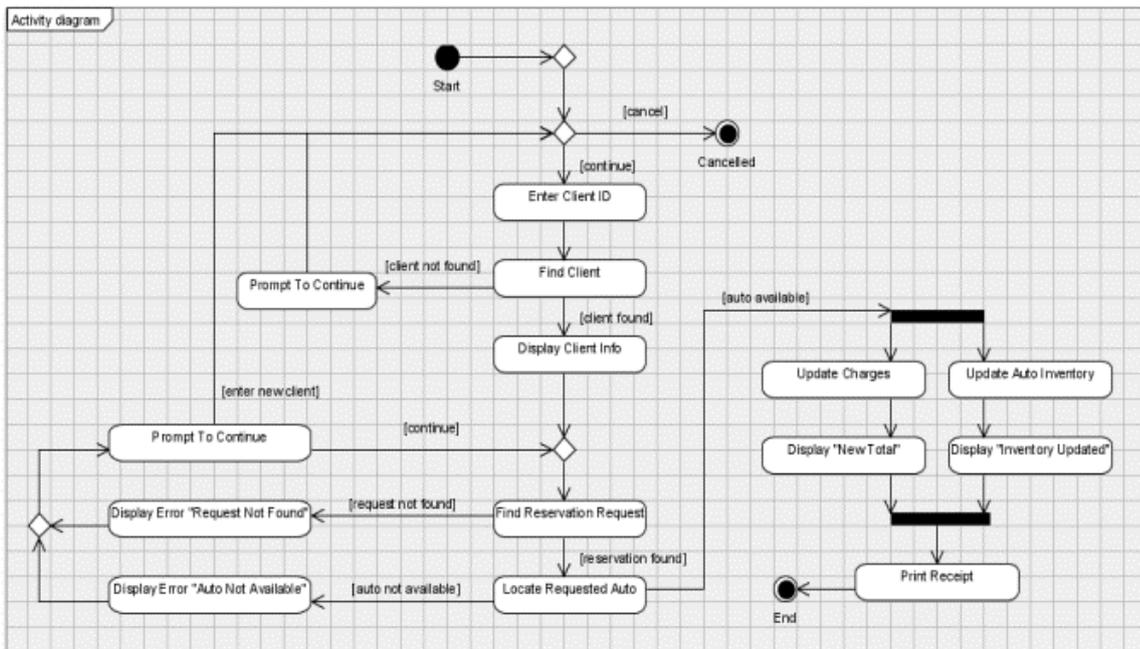


Fonte: Adaptado ABPMP (2013).

2.4.4 Mapeamento utilizando UML.

O *Unified Modeling Language* (UML) fornece um conjunto de técnicas que permite descrever os requisitos de sistemas de informação. Embora o UML seja principalmente utilizado na análise de desenho, algumas organizações utilizam para modelar processos. O UML (Figura 29) tem como vantagem uma comunidade de usuários estabelecida e é utilizada em muitas organizações, porém apresenta variação no conjunto de símbolos dependendo do tipo de modelo. A modelagem de processo é uma aplicação secundária e a representação varia conforme o software utilizado (ABPMP, 2013).

Figura 29 - Exemplo de representação utilizando UML.



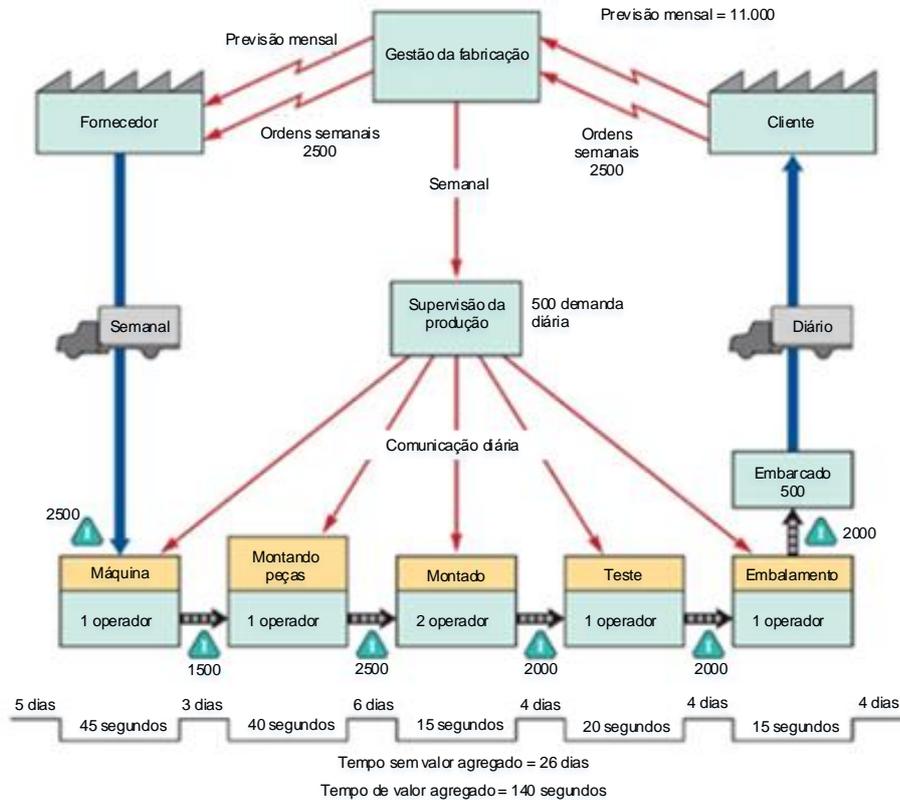
Fonte: ABPMP (2013).

2.4.5 Mapeamento utilizando *Value Stream Mapping*.

Outra notação que as organizações utilizam é o Mapeamento do fluxo de valor (*Value Stream Mapping*, apresentado na Figura 30) que teve origem na Toyota. Ela expressa o ambiente físico e o fluxo de materiais e produtos. Esta técnica adiciona custos dos recursos do processo e elementos de tempo com o objetivo de incorporar uma visão eficiente do processo. Apresenta como principal vantagem sua facilidade

de aplicação e utilização, porém seus modelos são planos e inadequados para representar processos de maior grau de complexidade. (ABPMP, 2013).

Figura 30 - Exemplo de representação de mapeamento de fluxo de valor.



Fonte: Adaptado ABPMP (2013).

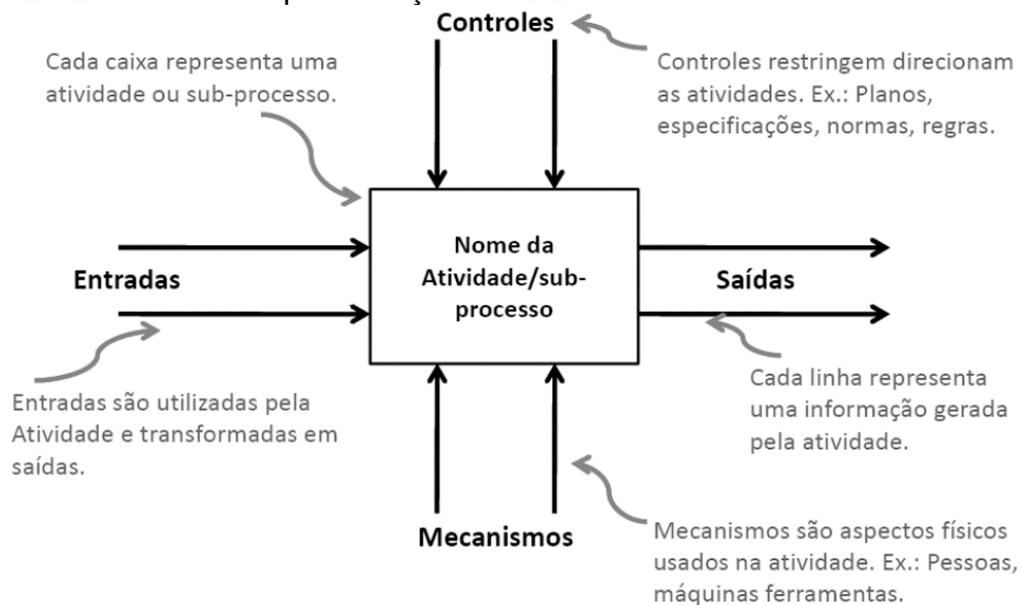
2.4.6 Mapeamento utilizando IDEF.

Uma das notações mais utilizadas por todos os tipos de organizações é conhecido como IDEF (*Integration Definition*), sendo desenvolvido pela Força Aérea dos EUA na década de 1980 (OLIVEIRA e ROSA, 2010). O IDEF é um conjunto de métodos organizados em dezesseis partes:

- IDEF0 – *Function Modeling*;
- IDEF1 – *Information Modeling*;
- IDEF1x – *Data Modeling*;
- IDEF2 – *Simulation Model Design*
- IDEF3 – *Process Description Capture*;
- IDEF4 – *Object-Oriented Design*;

A Figura 32 ilustra a estrutura do diagrama do IDEF0, sendo constituído por um retângulo, também conhecidos como caixas, que define uma atividade ou processo e quatro setas dispostas entorno do retângulo. As setas indicam as entradas, saídas, controles e mecanismos (NIST, 1993). As caixas são interligadas por setas, sendo que cada caixa possui um nome que é constituído por um verbo ou frase verbal que descreve a função a ser executada, além de que cada caixa possui um número posicionado no canto inferior direito. Recomenda-se que as caixas sejam organizadas de forma diagonal, do lado superior esquerdo para o lado inferior direito apresentado uma configuração de escada (OLIVEIRA, 2010).

Figura 32 - Estrutura de representação do IDEF0.



Fonte: Adaptado NIST (1993).

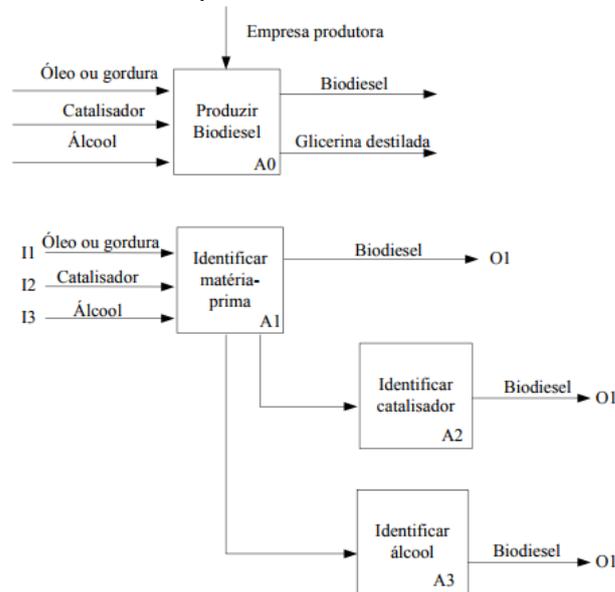
Oliveira e Rosa (2010) aplicaram o IDEF0 para realizar a modelagem da cadeia produtiva do biodiesel. Na Figura 33, o nível A0 representa a função de maior nível¹², já as funções A1, A2 e A3 representam funções de níveis inferiores¹³. Os autores destacam que devido o IDEF0 apresentar uma característica simples e com um visual de fácil entendimento, permitiu a compreensão da função de cada processo da cadeia

¹² A função de maior nível também é comumente conhecida como diagrama pai.

¹³ As funções de níveis inferiores são comumente conhecidas e abordadas como diagramas filhos.

produtiva e a identificação de seus respectivos elementos que são considerados relevantes.

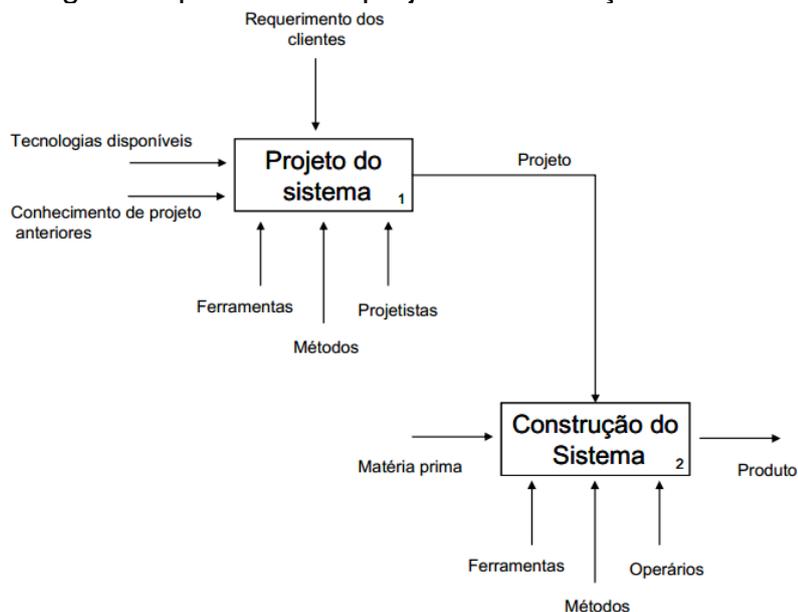
Figura 33 - Modelagem da cadeia produtiva do biodiesel utilizando IDEF0.



Fonte: Oliveira e Rosa (2010).

Outro exemplo da aplicação da modelagem utilizando o IDEF0 é apresentada na Figura 34, que ilustra o processo de projeto e construção de sistemas técnicos (LEAL et al., 2007).

Figura 34 - Modelagem do processo de projeto e construção utilizando IDEF0.



Fonte: Leal et al. (2007).

A modelagem de processos utilizando o IDEF é destacada por Bergamo e Romano (2016), na qual modelaram o processo de projeto de máquinas agrícolas para empresas de pequeno e médio porte. Os autores destacam que a modelagem do processo e o modelo gerado torna explícito as atividades e tarefas necessárias para o desenvolvimento do produto, auxiliando também na gestão e formalização do processo.

Dentre as diversas notações disponíveis na literatura, as organizações selecionam aquela que atende aos seus critérios pré-estabelecidos. Após a seleção da notação de modelagem, é definida a abordagem para modelar o processo. Podendo esta pode ser de cima para baixo, do meio para fora ou de baixo para cima, sendo que para alguns modelos de processos se faz necessário uma abordagem integrada e interativa que requer sucessivas passagens para desenvolver o modelo.

Para realizar a modelagem, existem disponíveis diversas ferramentas que auxiliam no processo de modelagem. Nas organizações são utilizados diversos materiais, desde quadros brancos, *flip-chart* ou notas autoadesivas, até ferramentas computacionais de alto custo de aquisição (ABPMP, 2013).

2.4.7 Processos de Desenvolvimento de Produtos

Como resultado da modelagem dos processos, são apresentados os processos de desenvolvimento de produtos, também conhecidas como metodologias projetuais, podendo ser genéricas ou específicas, sendo que as organizações buscam adotar diferentes práticas para desenvolver o projeto de seus produtos. O PMI (2013) define projeto como sendo um esforço temporário empreendido para criar um produto, serviço ou resultado exclusivo tendo início e fim bem definidos. Em um contexto mais amplo, Projeto de Engenharia pode ser definido como uma atividade orientada para o atendimento das necessidades humanas por meio de fatores tecnológicos (BACK, 1983). O que distingue os objetivos de um projeto de engenharia de outros tipos de projetos é a extensão da contribuição dos fatores tecnológicos utilizados em uma elaboração.

Neste contexto, Back (1983) apresenta dois tipos de projeto, o primeiro deles é o projeto por evolução, que consiste na utilização das frequentes descobertas científicas e tecnológicas que permitem melhorar produtos existentes. Este tipo de projeto apresenta menores riscos de falhas, porém apresenta baixa competitividade

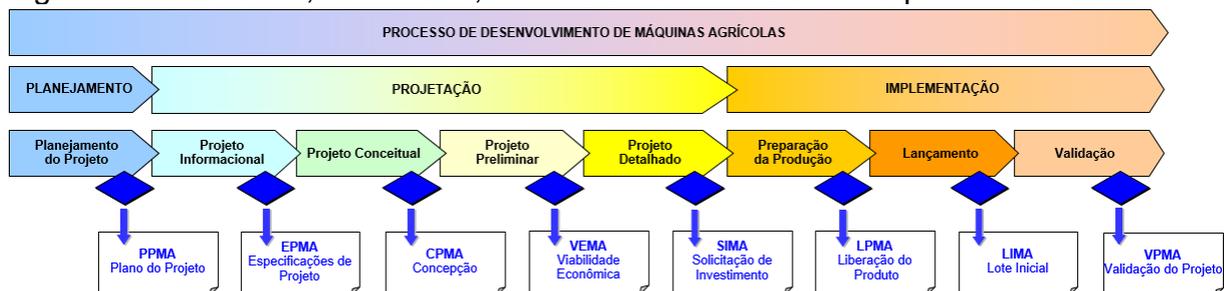
no mercado. O segundo deles é o projeto por inovação, que consiste em aplicar uma descoberta científica para desenvolver um novo conjunto de conhecimentos técnicos para realizar um projeto com base em ideias anteriormente não experimentadas. Seus resultados não são conhecidos, apresenta grandes riscos, porém possibilita o desenvolvimento de um produto inovador e vantagem competitiva no mercado.

Segundo Back et al. (2008), o termo produto refere-se a um objeto produzido industrialmente com características e funções bem definidas para atender as necessidades e expectativas das pessoas ou organizações, e desta forma o conceito de desenvolvimento integrado de produto corresponde ao processo de transformação de informações necessárias para a identificação da demanda, produção e uso do produto pelo cliente.

Normalmente os projetos que envolvem o desenvolvimento de produtos são estruturados em fases com o objetivo de facilitar o gerenciamento e estabelecer vínculos com as operações das organizações (ROMANO, 2013).

Neste contexto, a Figura 35 apresenta o modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas (MR-PDMA) desenvolvido por Romano (2003). O modelo compreende três macrofases: Planejamento, corresponde ao planejamento do produto; Projetação, decompõe-se em projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto detalhado; Implementação, decompõe-se em preparação para a produção, lançamento e validação.

Figura 35 - Processo, macrofase, fases e saídas de referência para o PDMA.

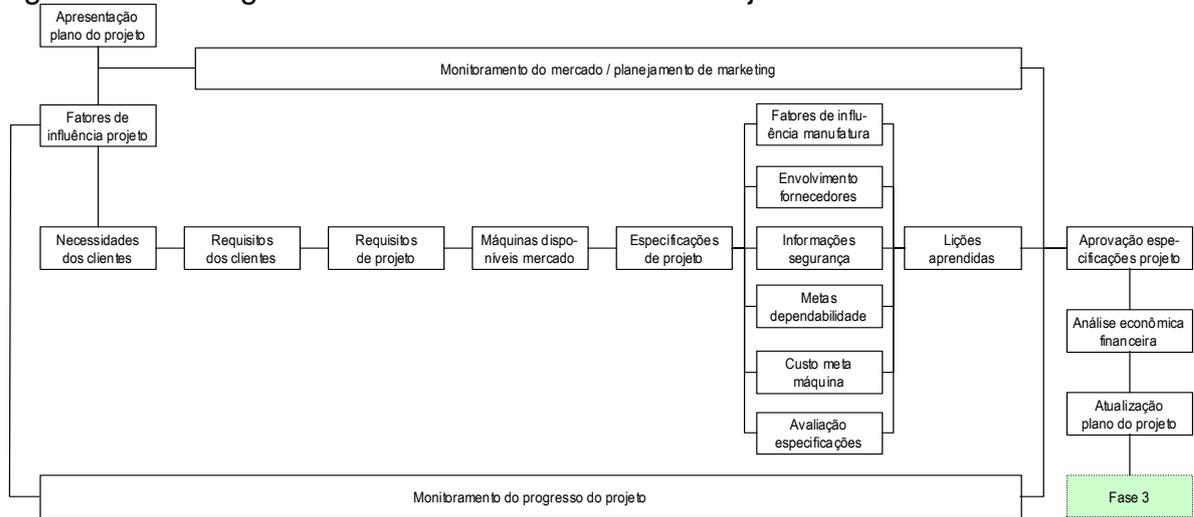


Fonte: Romano (2003).

A primeira fase da macrofase projetação é denominada de Projeto Informacional (Figura 36), esta fase destina-se para a realização da definição das especificações de projeto. Para estabelecer as especificações são realizadas um conjunto de atividades, identificação das necessidades dos clientes, definição dos

requisitos de projeto, avaliação comparativa com produtos disponíveis no mercado. A realização desse conjunto de atividades converge para o desdobramento dos requisitos de projeto em especificações de projeto.

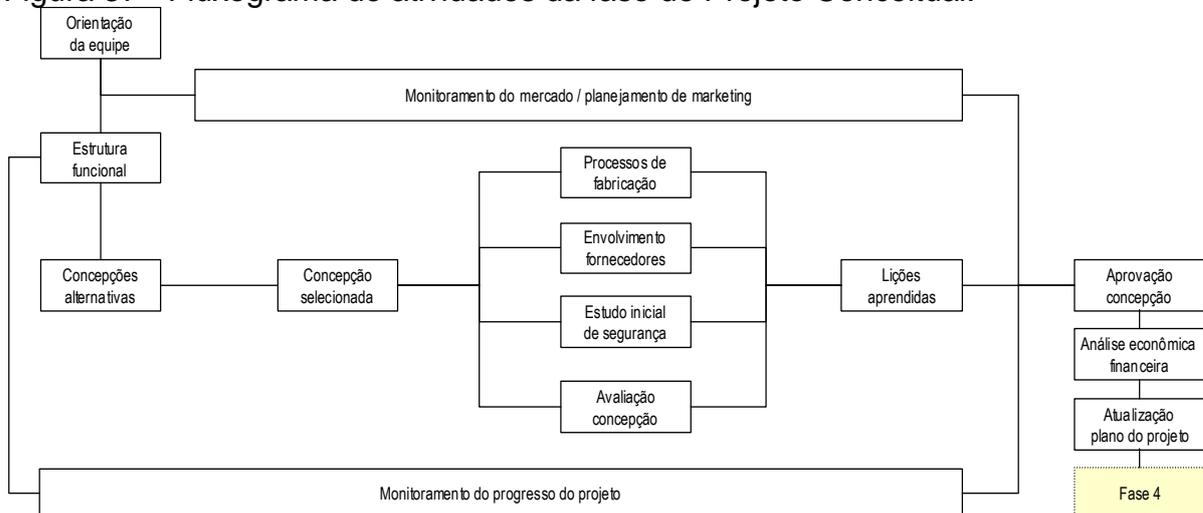
Figura 36 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Informacional.



Fonte: Romano (2003).

No modelo de Romano (2003), a fase onde ocorre o desenvolvimento da concepção é denominada de Projeto Conceitual e corresponde ao desenvolvimento de um fluxo de atividades (Figura 37) que permite a elaboração da estrutura funcional do produto, o desenvolvimento de concepções alternativas, definição de processos de fabricação, definição de fornecedores, estudos iniciais de segurança e avaliação da concepção selecionada.

Figura 37 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Conceitual.

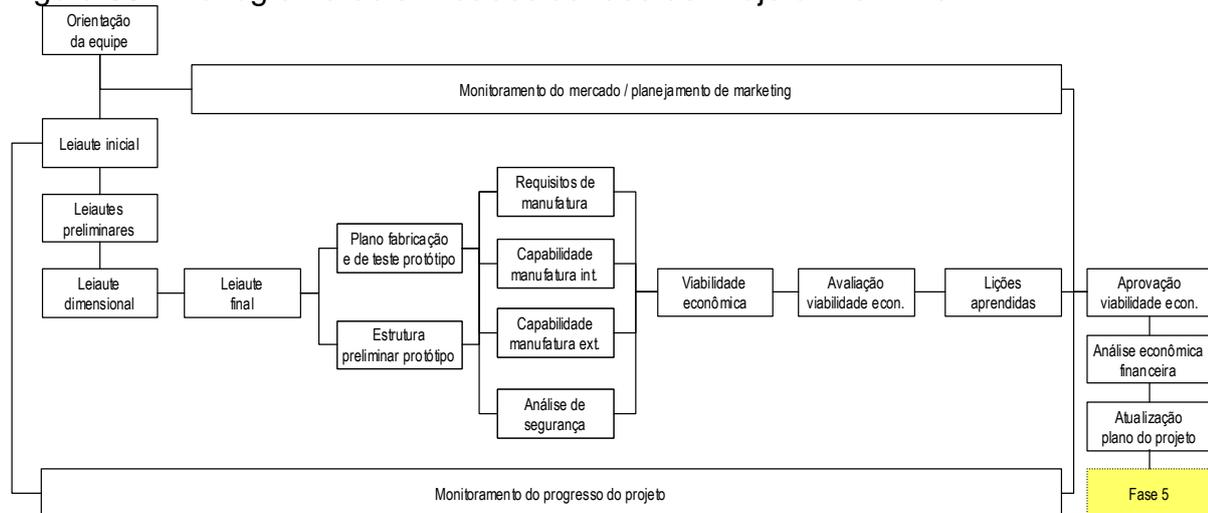


Fonte: Romano (2003).

A fase de Projeto Conceitual engloba a execução de diversas tarefas, no primeiro momento é estabelecida a estrutura funcional do produto considerando os fatores que influenciam no projeto, juntamente com as especificações de projeto do produto. A definição da estrutura funcional consiste em definir a função global, funções parciais, funções auxiliares e elementares, bem como a determinação do fluxo de energia, material e informação (ROMANO et al., 2005).

No final da fase de projeto conceitual é apresentado o conceito do produto, que então segue para a fase de projeto preliminar, esta fase tem por objetivo estabelecer o leiaute final do produto e a determinação da viabilidade econômica. Na Figura 38 são apresentadas as atividades a serem realizadas, definição do leiaute, material, segurança, ergonomia, definição dos componentes, considerações sobre aspectos legais e de segurança, processos de fabricação, tolerâncias, entre outros (ROMANO, 2003).

Figura 38 - Fluxograma de atividades da fase de Projeto Preliminar.



Fonte: Romano (2003).

Após o estabelecimento do leiaute final inicia o desenvolvimento do plano de fabricação e testes do protótipo, que com o avanço tecnológico e disponibilidade de recursos computacionais, a realização de testes do protótipo pode ser executada por meio de ferramentas computacionais que buscam simular de forma controlada fenômenos físicos reais, permitindo simular diferentes cenários de ensaios destrutivos e não destrutivos.

3 METODOLOGIA

O capítulo da Metodologia apresenta o processo sistemático adotado na realização do projeto. Foi organizado em duas etapas. A primeira corresponde a materiais e métodos experimentais, onde é realizado o planejamento experimental, descrição da bancada utilizada, a parametrização das gotas e a identificação da uniformidade, e teve como objetivo gerar conhecimento sobre o processo de geração de chuva simulada, desta forma auxiliando na identificação dos pontos importantes que devem estar presentes na modelagem do processo.

A segunda etapa corresponde à definição da estrutura de representação do modelo, onde primeiramente é definido a notação do processo, que corresponde a forma gráfica utilizada para representar a modelagem. Em seguida é identificado os documentos fontes de informações, onde após é elaborado a árvore de nós que consiste no primeiro passo da modelagem, é por meio dele que se define os principais pontos do processo. Com isso, foi realizado a modelagem do processo em diferentes níveis de informações baseado nas informações apresentadas nos documentos fontes e pelo conhecimento gerado na etapa experimental.

3.1 MATERIAIS E MÉTODOS EXPERIMENTAIS

3.1.1 Planejamento experimental

A análise experimental objetivou conhecer o fenômeno da geração de chuva simulada utilizando sistemas aspersores, bem como verificar a influência da altura e pressão na uniformidade de distribuição e no tamanho da gota, energia cinética, velocidade de queda e intensidade da chuva simulada gerada.

Conforme destacado no Capítulo 2, Revisão da Bibliográfica, existe uma grande variedade de projetos de simuladores de chuva, e são utilizados os mais diferentes modelos de aspersores para geração da chuva simulada. Neste contexto, para realização deste projeto verificou-se uma grande complexidade para selecionar os modelos de pontas aspersoras a serem analisados, visto que os modelos disponibilizados comercialmente pelos fabricantes estão direcionados para a linha agrícola de pulverização e a linha industrial alimentícia.

Desta forma, foram realizadas visitas técnicas em feiras, conversas informais com os vendedores e representantes das mais diversas marcas comerciais. Este contato inicial permitiu destacar a importância dos simuladores de chuva e também da complexidade com relação ao mecanismo formador de gotas. Essas conversas evoluíram para um contato formal via correspondência eletrônica, onde foram destacados os parâmetros que um aspersor deve apresentar, intensidade, energia cinética, uniformidade, velocidade de queda e intensidade. Em função desses parâmetros foram sugeridos três modelos de pontas aspersoras fabricadas pela *Spraying Systems* (Quadro 2). No ANEXO G são apresentadas as características das pontas B1/4HH-SS14.5SQ (P1) e B1/8HH-SS3.6SQ (P2) e no ANEXO H é apresentado as características da ponta B1/4T-SS+TG-SS6 (P3).

Quadro 2 - Pontas aspersoras selecionados.

Nomenclatura adotada	Representação	Código	Quantidade	Custo (R\$) ¹⁴
P1		B1/4HH-SS14.5SQ	1	130,08
P2		B1/8HH-SS3.6SQ	1	178,06
P3		B1/4T-SS+TG-SS6	1	245,33
Custo total de aquisição				553,47

Fonte: Autor.

¹⁴ Custo de aquisição na data de novembro de 2015.

Os fatores¹⁵ considerados foram, ponta, pressão e altura. No Quadro 3 é apresentado o arranjo das condições experimentais adotadas. Desta forma, a combinação entre os fatores gerou 27 combinações (3 pontas, 3 pressões, 3 alturas) sendo que para cada combinação foram realizadas 6 repetições, totalizando 162 observações, com um tempo de sete minutos para cada repetição.

Quadro 3 - Combinação experimental adotado.

Combinação	Ponta	Pressão (kPa)	Altura (m)
1	P1	50	1,1
2	P1	50	2,1
3	P1	50	3,1
4	P1	100	1,1
5	P1	100	2,1
6	P1	100	3,1
7	P1	150	1,1
8	P1	150	2,1
9	P1	150	3,1
10	P2	50	1,1
11	P2	50	2,1
12	P2	50	3,1
13	P2	100	1,1
14	P2	100	2,1
15	P2	100	3,1
16	P2	150	1,1
17	P2	150	2,1
18	P2	150	3,1
19	P3	50	1,1
20	P3	50	2,1
21	P3	50	3,1
22	P3	100	1,1
23	P3	100	2,1
24	P3	100	3,1
25	P3	150	1,1
26	P3	150	2,1
27	P3	150	3,1

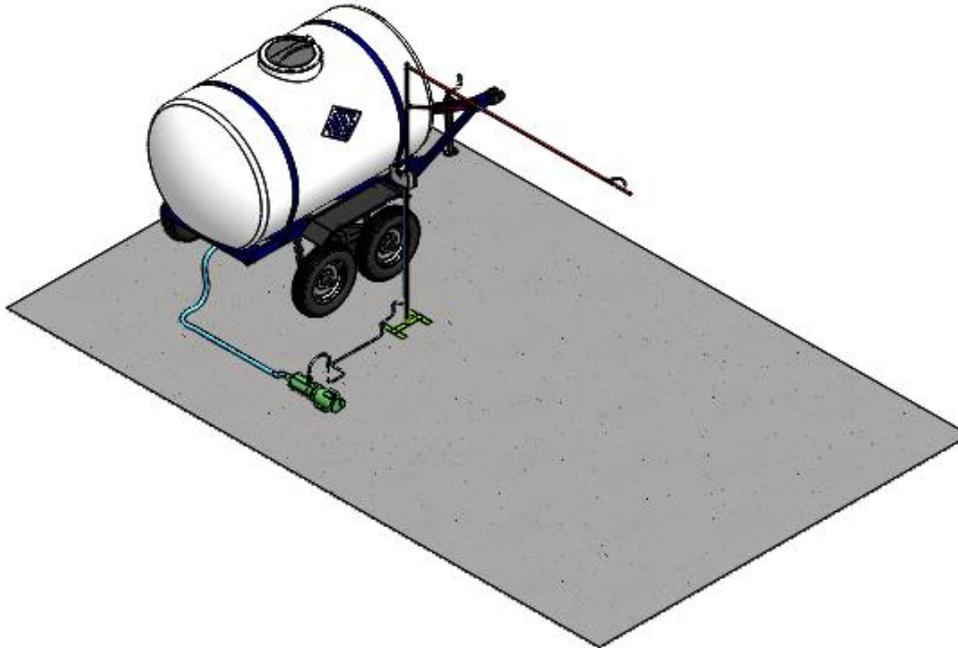
Fonte: Autor.

¹⁵ Os valores de pressão e altura adotados na análise experimental foram tomados como base os valores utilizados na literatura e descritos na Revisão Bibliográfica.

3.1.2 Descrição da bancada experimental

A bancada experimental é constituída por diversos sistemas técnicos, cada um é responsável por executar uma função específica. A Figura 39 representa o esquema da estrutura física utilizada.

Figura 39 - Esquema macro da bancada experimental.



Fonte: Autor.

O detalhamento dos sistemas existentes é apresentado na Figura 40, onde, para geração e controle do processo de chuva simulada foi utilizado o sistema proposto por Santos (2015), item (F), que permite a geração automática da chuva simulada e a aquisição dos valores medidos pelos sensores de pressão¹⁶ e vazão¹⁷ (D), montados próximos da ponta aspersora.

Os dados são medidos automaticamente e apresentando em um mostrador digital que permite o acompanhamento do usuário. A chuva simulada (A) é gerada pela ponta aspersora (B), que é conectado na tubulação (C), que alimenta o sistema

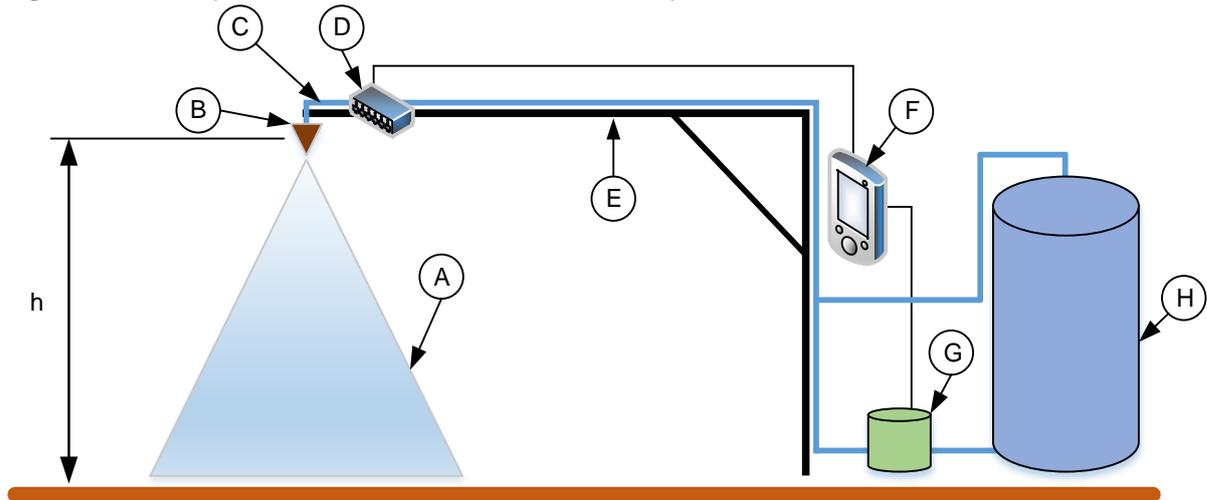
¹⁶ Sensor MPX4250GP, fabricado pela FREESCALE SEMICONDUCTOR, realizar medições entre 0 e 250 kPa e suporta temperaturas de -40°C até 125°C, o erro máximo é de 1,4% na temperatura de 0°C a 85°C.

¹⁷ Sensor do tipo turbina (roda d'água) da marca SEA modelo YF-S20110, a faixa de trabalho do sensor é de 1 a 30 l/min.

com a água fornecida pelo reservatório (H), esta é recalçada pela bomba hidráulica (G).

O reservatório utilizado tem capacidade para 5000 litros de água, o sistema de alimentação é composto por uma bomba hidráulica centrífuga de 2,2 kW de potência, $5,5 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ de vazão volumétrica e alimentado por fonte de energia de 220 Vca.

Figura 40 - Esquema detalhado da bancada experimental.



Legenda:

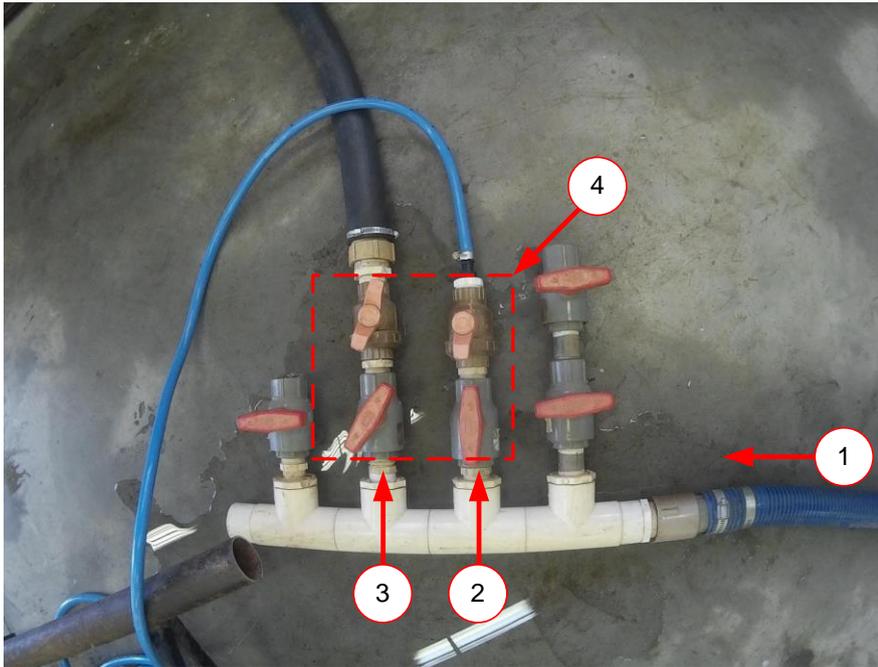
A: Chuva gerada; B: Ponta aspersora; C: Tubulação; D: Sensores de pressão e vazão;
E: Estrutura; F: Sistema de controle; G: Bomba hidráulica centrífuga; H: Reservatório de água.

Fonte: Autor.

A água recalçada pela bomba alimenta um sistema composto por válvulas que permite a regulação da pressão, sendo que a medição da pressão foi realizada a 0,10 m da ponta aspersora.

A Figura 41 ilustra o esquema adotado para o controle da pressão, sendo o item (1) a entrada de água recalçada pela bomba hidráulica, o item (2) indica o fluxo de água para a ponta aspersora, sendo realizada por uma tubulação de 12,7 mm (meia polegada) e, o item (3) indica o fluxo de água de retorno para o reservatório por meio de uma tubulação com 50,8 mm (duas polegadas). O item (4) indica o conjunto de válvulas utilizadas para o controle da pressão, sendo realizado por meio de sua abertura e fechamento.

Figura 41 - Mecanismo utilizado para controle da pressão.

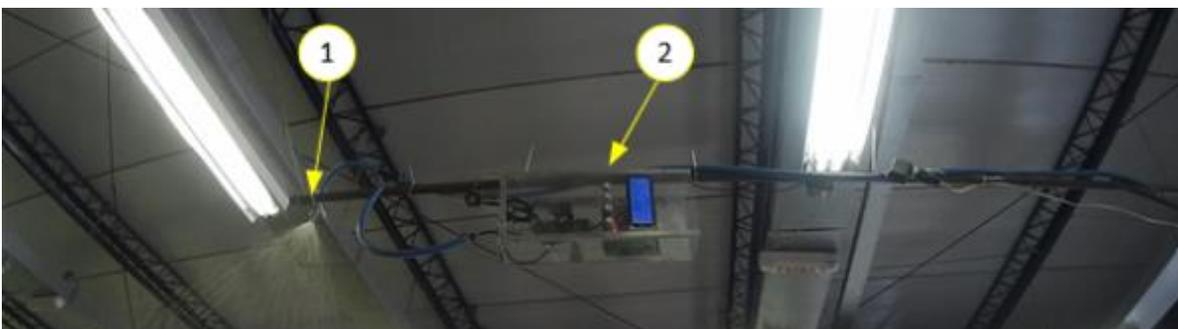


Legenda: (1) – entrada da água recalçada pela bomba (2) – tubulação de água para a ponta aspersora (3) – fluxo de água de retorno ao reservatório (4) – válvulas utilizadas para o controle da pressão (abertura e fechamento)

Fonte: Autor.

Com a regulagem da pressão da água no sistema pelo conjunto de válvulas a água alimenta a tubulação até a ponta aspersora. Na Figura 42 é apresentado o posicionamento da ponta aspersora (1) e do sistema de controle automático para geração de chuva simulada (2) proposto por Santos (2015). A utilização do sistema de controle automático permite verificar a vazão e pressão da água no sistema.

Figura 42 - Montagem da bancada experimental



Legenda: (1) – Ponta aspersora (2) – Sistema de controle automático.

Fonte: Autor.

3.1.3 Identificação da uniformidade da área molhada

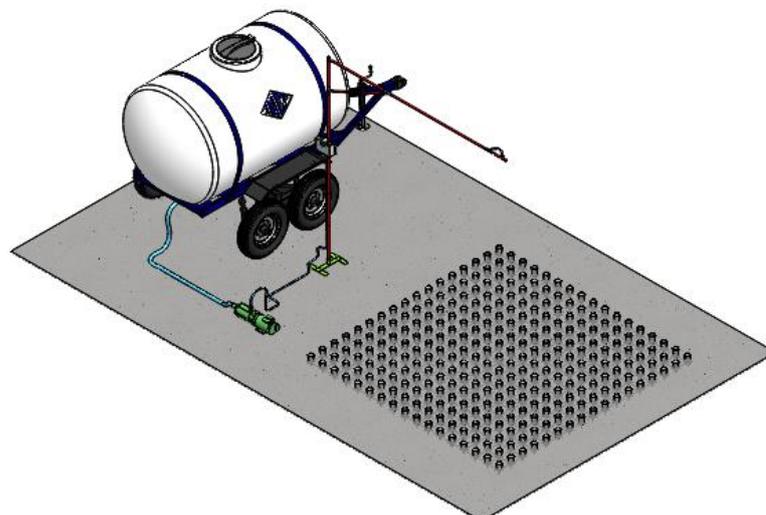
Existem três as principais normas que orientam sobre a determinação da eficiência da uniformidade, a NBR ISO 11545:2009, NBR 14244: 1998 e a ANSI/ASAE S436.1:1989. Porém estas normas são destinadas para determinação da uniformidade de distribuição da água em equipamentos de irrigação na agricultura (pivô central e lateral móvel) equipados com aspersores fixos ou rotativos, quando estas são aplicadas para Simuladores de Chuva elas geralmente são adaptadas conforme aos critérios definidos pela equipe de projeto.

Para realizar as análises experimentais foram observados os principais procedimentos apresentados pela NBR 14244: 1998:

- Os coletores devem ser idênticos;
- Os coletores devem ser igualmente espaçados;
- Velocidade do vento deve ser menor que 2 m s^{-1} ;
- A área não deve apresentar diferença de elevação maior do que especificado no projeto do conjunto de emissores;
- A área molhada deve ser estimada com base em dados do catálogo do fabricante ou por observação da operação do equipamento.

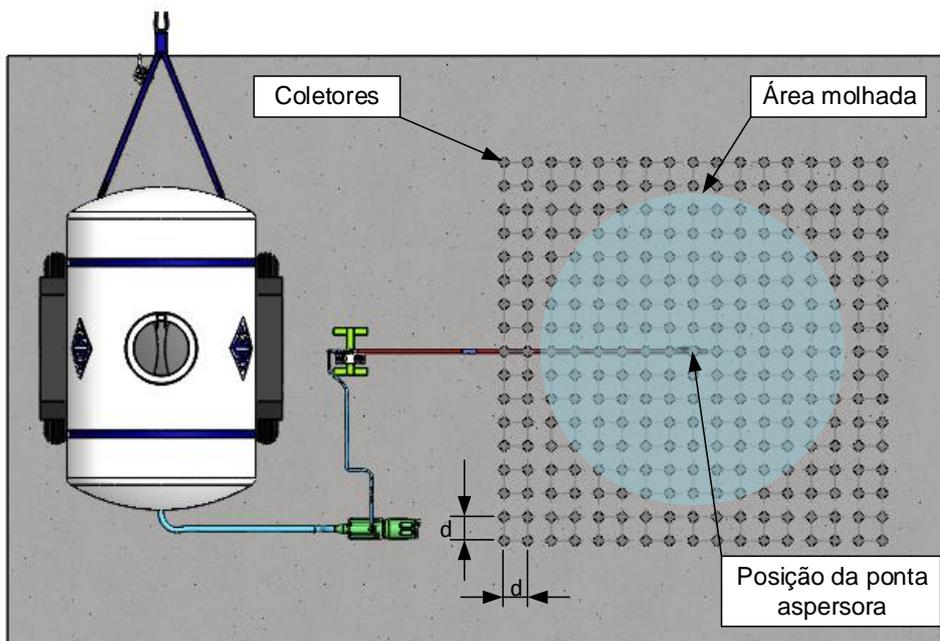
Desta forma, para atender os procedimentos normativos os experimentos foram realizados em laboratório, com isso, não houve influência do vento e da luz solar e a superfície do laboratório é uniformemente plana, permitindo os coletores serem posicionados no mesmo nível (Figura 43).

Figura 43 - Vista isométrica da bancada experimental utilizada para identificar a uniformidade



A Figura 44 ilustra o posicionamento dos coletores plásticos que foram igualmente espaçados a uma distância (d) de 0,2 m (200 mm), abrangendo toda a área molhada. Ao todo, foram utilizados 289 coletores com diâmetro de 0,07 m (70 mm) e altura de 0,082 m (82 mm), formando 17 linhas e 17 colunas, a ponta aspersora foi posicionada no centro.

Figura 44 - Distribuição dos coletores e do ponta aspersora.



Fonte: Autor.

A medição do volume de água armazenada pelos coletores plásticos foi realizada com uma proveta graduada com capacidade para medir 0,2 l (200 ml). Este procedimento foi repetido para cada uma das 162 unidades experimentais e em seguida o valor do volume de cada coletor foi transcrito para planilhas eletrônicas apresentadas em Santos (2016).

Com os dados organizados foi realizado o cálculo da uniformidade, que é um dos principais parâmetros para avaliar o desempenho de sistemas aspersores, principalmente aqueles utilizados na irrigação (ARAQUAM e CAMPECHE, 2012). No estudo experimental, a uniformidade de distribuição da chuva simulada gerada pelas pontas aspersoras foi calculada pela equação 3.

A equação de uniformidade (CUC) foi aplicada para duas diferentes áreas. Na Figura 45a, foi considerando uma área de 0,36 m², sendo que esta área corresponde

a uniformidade do volume coletado por nove coletores. A Figura 45b corresponde a área de 1 m² que contempla o cálculo da uniformidade do volume coletado por vinte e cinco coletores. O valor do CUC foi calculado para as seis repetições das vinte e sete combinações experimentais, totalizando 162 unidades experimentais.

Figura 45 - Demonstrativo da área utilizada para calcular a uniformidade de distribuição.

Combinação "n" – Repetição "n"																	
Posição do coletor na malha																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17
1																	
2																	
3							2,5	2,5									
4				2,5	5	9	7	2,5									
5				6	22	27	20	11	5	2,5	5	7	11	7	2,5		
6				12	36	20	33	24	16	11	12	18	24	20	6		
7			2,5	13	34	43	38	31	25	21	21	28	34	25	10		
8				11	27	33	31	28	25	26	29	35	35	21	6		
9				10	24	27	26	23	22	26	34	37	29	13	5		
10				11	27	28	24	20	20	25	33	33	21	8			
11				17	34	30	22	19	21	27	31	28	17	5			
12			10	25	29	28	28	14	28	25	31	30	27	6			
13			5	23	30	21	11	8	12	19	29	19	12	7			
14			2,5	10	15	10	5	2,5	5	11	17	21	15	5			
15				2,5	2,5	2,5			2,5	2,5	7	9	5				
16																	
17																	

(a)
(b)

Fonte: Autor.

Os valores calculados da uniformidade foram organizados em uma planilha eletrônica conforme modelo apresentado no Quadro 4.

Quadro 4 - Modelo de planilha para organização dos dados.

Combinação	Ponta	Pressão (kPa)	Altura (m)	CUC (média) %	Desvio Padrão	Coefficiente de variação (%)	Grau de aceitação ¹⁸
1	P1	50	1,1				
2	P1	50	2,1				
3	P1	50	3,1				
...				
"n"	"n"	"n"	"n"				
...				
25	P3	150	1,1				
26	P3	150	2,1				
27	P3	150	3,1				

Fonte: Autor.

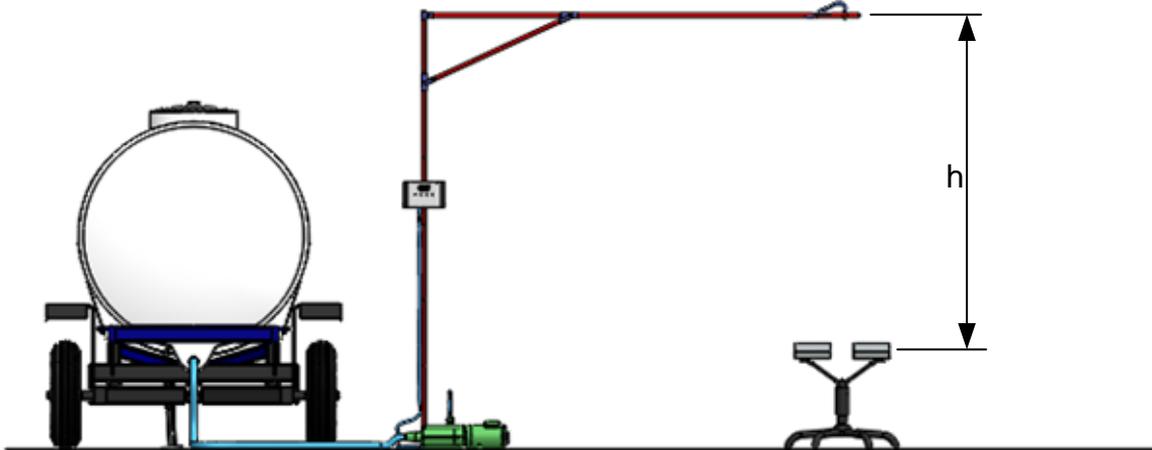
¹⁸ O grau de aceitação utilizado para classificar foi o proposto por MANTOVANI (2001), onde maior que 90% é excelente, 80 a 90% é bom, 70 a 80% é razoável, 60 a 70% é ruim e menor que 60% é inaceitável.

3.1.4 Parametrização das gotas de chuva geradas

A realização da parametrização objetivou medir a velocidade de queda das gotas, intensidade da precipitação, energia cinética e o diâmetro das gotas geradas pela chuva simulada. Foi utilizado um disdrômetro LASER¹⁹ OTT Parsivel, no ANEXO F é apresentado o manual com as características técnicas do modelo.

A Figura 46 ilustra o esquema experimental utilizado, tendo o disdrômetro centralizado com ponta aspersora e o arranjo experimental adotado está apresentado no Quadro 3. O disdrômetro realiza a medição no instante de tempo, desta forma foi gerado chuva para as 27 combinações com um tempo de duração de um minuto, sendo que o disdrômetro atualizava os valores a cada dez segundos, este processo permitiu realizar seis repetições. Os valores para as alturas utilizadas correspondem a distância da ponta aspersora até o ponto de medição no disdrômetro (cota "h" da Figura 46).

Figura 46 - Esquema de posicionamento do disdrômetro.



Fonte: Autor.

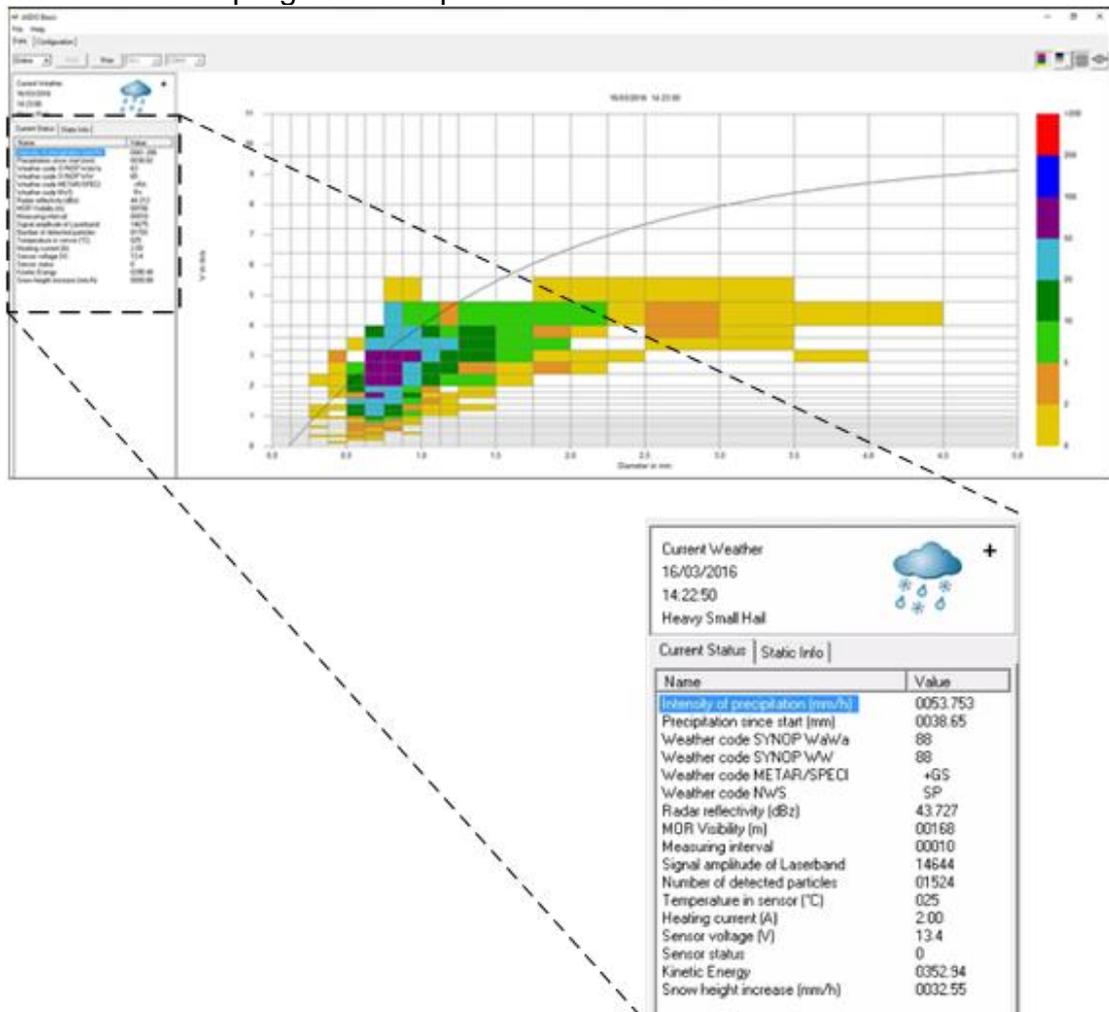
Com a utilização do programa computacional OTT ASDO²⁰ foram obtidos os valores de energia cinética, intensidade da precipitação, velocidade e diâmetro médio

¹⁹ Do inglês *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* que significa Amplificação da Luz por Emissão Estimulada de Radiação.

²⁰ O programa computacional acompanha o disdrômetro.

das gotas, sendo a medição realizada de forma direta pelo programa computacional e apresentadas na forma de histograma (Figura 47).

Figura 47 - Tela do programa computacional OTT ASDO.



Fonte: Programa computacional OTT ASDO.

O programa computacional apresenta as informações na forma gráfica conforme ilustrado anteriormente na Figura 47. Desta forma, foi utilizado um programa computacional²¹ para gravar a tela do programa computacional OTT ASDO.

Os arquivos de vídeos gerados foram salvos no formato *.wmv (*Windows Media Video*) e armazenados em um HDD (*Hard Disk Drive*) também conhecido como disco rígido, permitindo sua posterior consulta e transcrição dos dados de velocidade, intensidade da precipitação, diâmetro e energia cinética. Para apresentação dos

²¹ O programa computacional utilizado é classificado como *free*, ou seja, é licença livre.

valores médios das seis repetições foi elaborado uma planilha modelo conforme apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 - Planilha modelo para anotação dos valores medidos pelo disdrômetro.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)		P2	Intensidade (mm h ⁻¹)		P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)			Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)			Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	
	Velocidade média (m s ⁻¹)			Velocidade média (m s ⁻¹)			Velocidade média (m s ⁻¹)	
	Diâmetro médio (mm)			Diâmetro médio (mm)			Diâmetro médio (mm)	
	Número médio de gotas			Número médio de gotas			Número médio de gotas	

Fonte: Autor.

A partir dos dados organizados na planilha (Quadro 5Quadro 5 -), foi utilizada as equações de Brown e Foster (1987) – equação 5 e Van Dijk et al. (2002) – equação 6, apresentadas no trabalho de Ramon et al. (2017) para verificar o comportamento da energia cinética das chuva simuladas medidas pelo disdrômetro. Este processo permitiu comparar os valores de energia cinética medidos pelo disdrômetro com os valores correspondentes as chuvas naturais de mesma intensidade.

$$E_{mm} = 29 \cdot [1 - 0,72 \exp(-0,05 \cdot I)] \quad (5)$$

$$E_{mm} = 28,3 \cdot [1 - 0,52 \exp(-0,042 \cdot I)] \quad (6)$$

Onde:

E_{mm} = Energia cinética (J mm⁻² h⁻¹);

I = Intensidade da precipitação (mm h⁻¹);

Os dados foram organizados em uma planilha eletrônica de acordo com o modelo apresentado no Quadro 6. Com isso, foi calculado o Coeficiente de Variação (CV) em porcentagem, que consiste na razão do desvio padrão pela média dos valores de cada combinação.

Quadro 6 - Planilha modelo para anotação dos valores calculados da energia cinética.

Combinação	Intensidade (mm h ⁻¹)	Energia cinética (J mm ⁻² h ⁻¹)					Coeficiente de variação (CV) %
		Disdrômetro	Calculado pela equação 5	Calculado pela equação 6	Média	Desvio Padrão	
1							
2							
3							
...
"n"	"n"	"n"	"n"	"n"	"n"	"n"	"n"
...
25							
26							
27							

Fonte: Autor.

3.2 ESTRUTURA DE REPRESENTAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

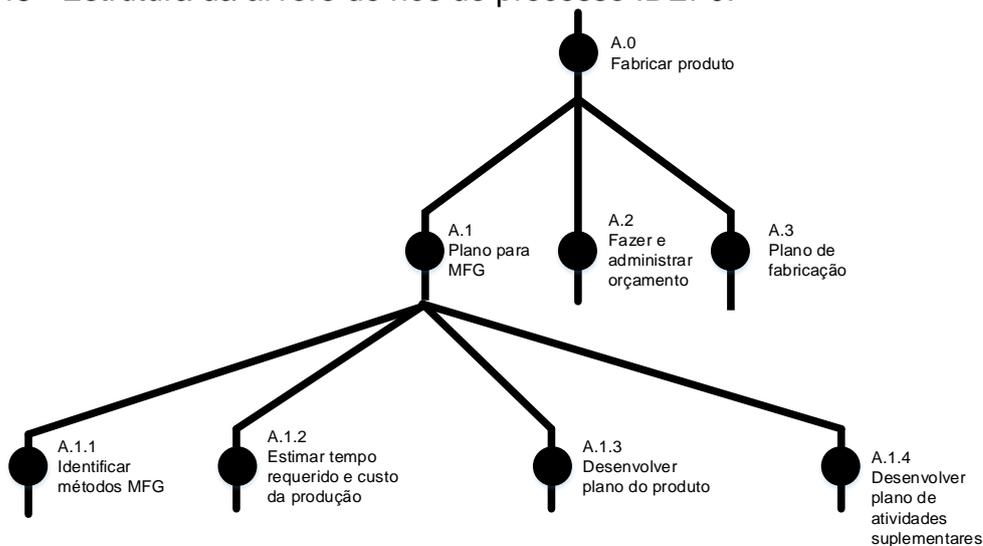
O desenvolvimento do modelo iniciou com a identificação e classificação do problema, conforme destacado no Capítulo 1, em seguida buscou-se identificar os documentos fontes e a coleta das informações. Ressalta-se que o IDEF0 não explicita a forma como são obtidas as informações para a construção do modelo, apenas indicando que as informações podem ser obtidas por meio de pesquisa sobre o tema (LIMA, 2002). Com isso, foi utilizado os trabalhos mencionados ao longo do Capítulo de Revisão Bibliográfica, ou seja, a sistematização do conhecimento explicitado sobre o processo de geração de chuva simulada, a formação de gotas e de formas de avaliação destacadas ao longo do Capítulo 2, foi utilizada como fundamentação para elaboração do modelo proposto.

Na sequência, foi definido a notação do processo, que consiste na forma gráfica na qual o modelo é representado. O objetivo do modelo é explicitar o processo de qualificação de aspersores para simuladores de chuva. Sua escolha impacta nos resultados a serem obtidos, podendo este não transmitir de forma clara o processo que se deseja explicitar. Neste contexto, a estrutura adotada para representar o modo do processo é o IDEF0, sendo que suas vantagens e características foram apresentadas no item 2.4.6.

O modelo IDEF0 consiste na modelagem da função cuja sua representação é caracterizada por um diagrama de blocos, onde cada bloco representa uma função do processo que contém setas que indicam as entradas (*input*), saídas (*output*), controle (*control*) e mecanismos (*mechanism*), conforme anteriormente apresentado na Figura 32.

Antes de iniciar a modelagem do processo foi elaborado a árvore de nós, que consiste em uma visão macro do processo a ser modelado, além de ser definidos as principais funções do modelo. Na elaboração do modelo proposto, foi adotado a mesma estrutura apresentada por NIST (1993). Na Figura 48 é apresentada a estrutura da árvore de nós, onde o A0 corresponde ao maior nível do processo, este nível é composto por nós de menores níveis A.1, A.2 e A.3, sendo que cada um desses níveis pode ser expandido para nós de níveis inferiores A.1.1, A.1.2, A.1.3 e A.1.4.

Figura 48 - Estrutura da árvore de nós do processo IDEF0.



Fonte: Adaptado de NIST (1993).

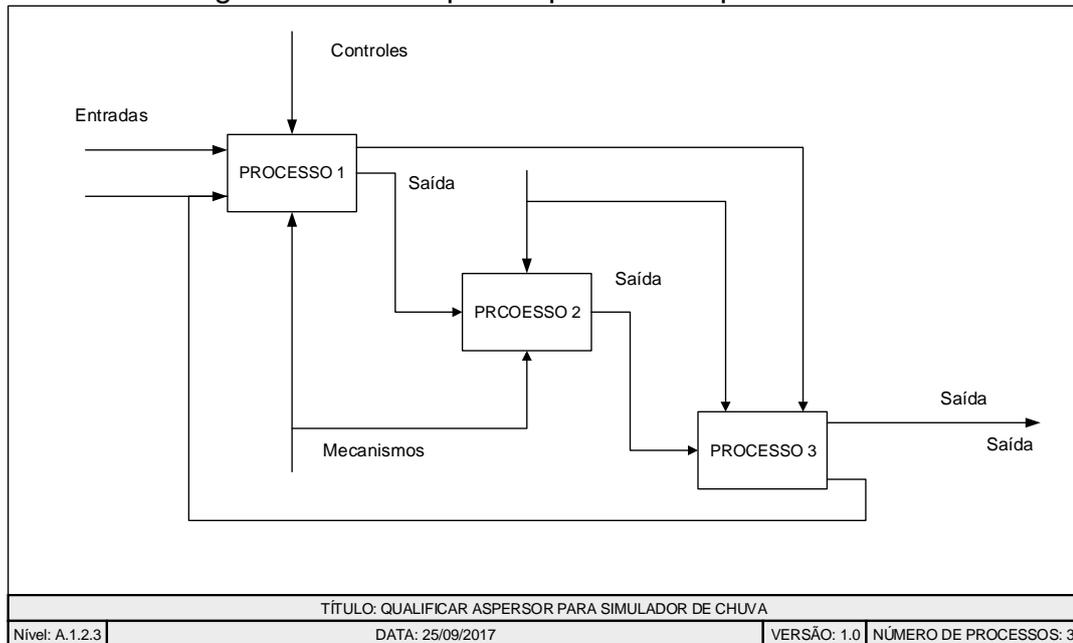
O número de nós definido no modelo bem como sua posição hierárquica baseou-se no conhecimento adquirido na fase experimental e nas informações apresentadas no Capítulo de Revisão Bibliográfica.

Com a definição da árvore de nós deu-se início a modelagem de cada nível. A Figura 49 ilustra a representação do IDEF0 adotada para o modelo, onde os processos identificados são organizados de cima para baixo e da esquerda para a direita. Na representação é indicado no canto esquerdo inferior o nível no qual corresponde a

representação, na posição central inferior é indicado o título do processo e no canto direito inferior é indicado o número de processos que o nível abrange.

A modelagem do modelo proposto foi realizada utilizando um programa computacional de edição gráfica.

Figura 49 - Modelo gráfico utilizado para representar o processo.



Fonte: Autor.

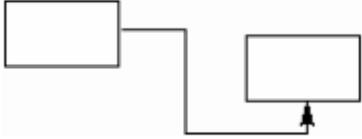
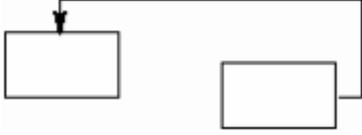
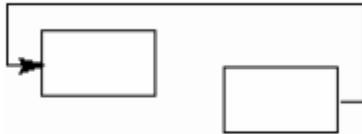
A metodologia IDEF0 define cinco tipos de conexões que as setas podem fazer entre os blocos (processos) para organizar a estrutura gráfica, sendo estes apresentados no Quadro 7.

Quadro 7 - Tipos de conexões entre os processos.

(continua)

Tipo de conexão	Tipo	Descrição
	Conexão de entrada	Saída para entrada de um processo de menor procedência
	Conexão de controle	Saída de um processo é utilizada como controle de um processo de menor procedência.

(conclusão)

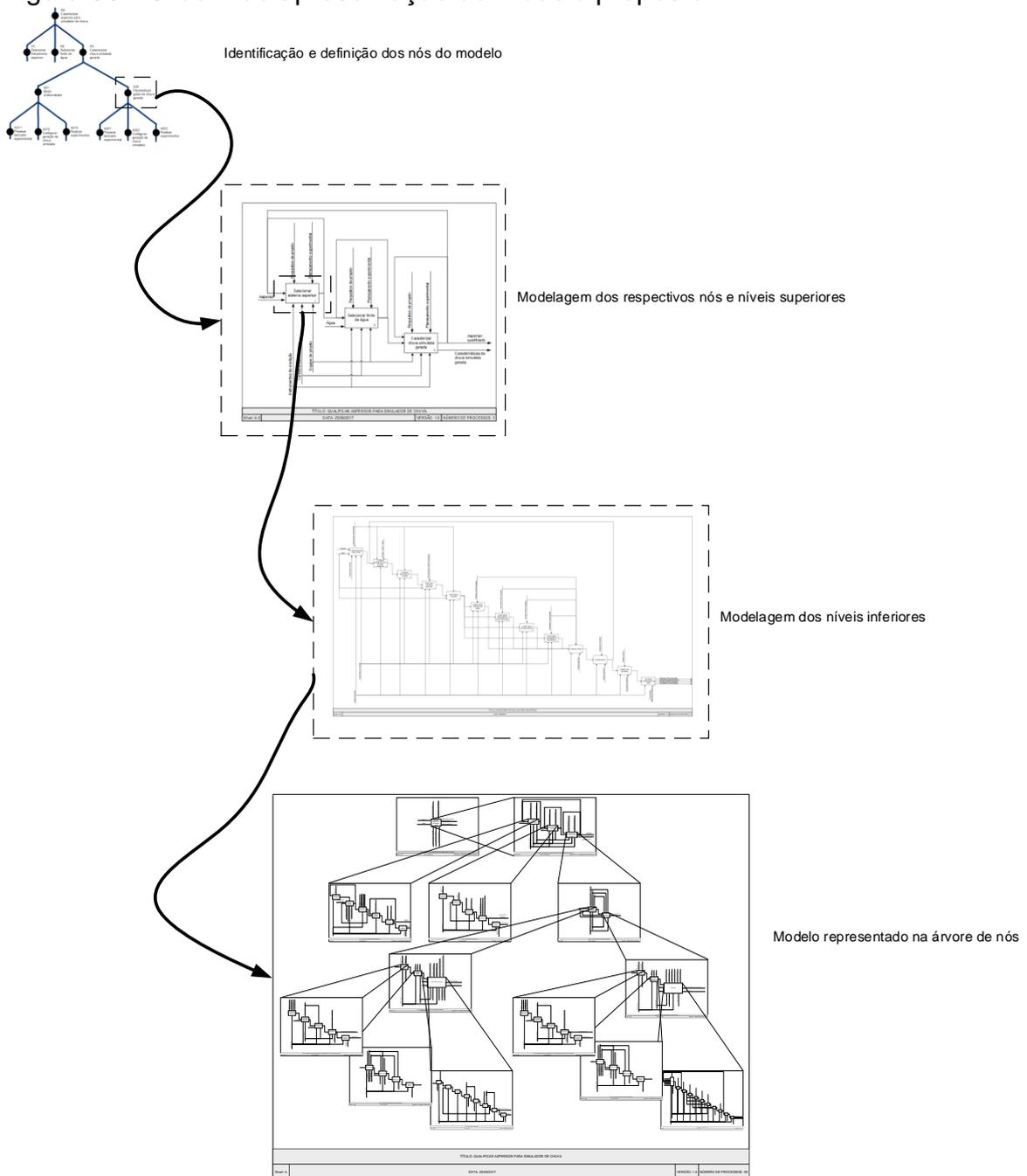
	Saída para mecanismo	A saída de um processo é utilizada como mecanismo do processo de menor precedência
	Retorno de controle	A saída de um processo é utilizada como controle de um processo de maior precedência
	Retorno de entrada	A saída de um processo é utilizada como entrada de um processo de maior precedência.

Fonte: Adaptado NIST (1993).

Para elaboração do modelo, além de definir o número de processos a ser realizado em cada uma das atividades foi preciso identificar os atributos envolvidos (entradas, saídas, controles e mecanismos). A identificação dos atributos foi realizada por meio de duas naturezas, pela fundamentação teórica e pelo conhecimento gerado a partir da elaboração do procedimento experimental, que auxiliou na identificação de pontos importantes que devem estar presentes no modelo proposto e não estão mencionados na fundamentação teórica.

A ordem de apresentação do modelo (Figura 50), se dá a partir da árvore de nós, em seguida é apresentada uma visão macro do modelo que espelha a árvore de nós. Na sequência, é apresentada a representação gráfica de cada um dos níveis do processo, iniciando do A.0 que corresponde ao maior nível até a representação de menor nível.

Figura 50 - Ordem de apresentação do modelo proposto.



Fonte: Autor.

Essa representação permite explicitar todo o conhecimento necessário além dos procedimentos, recursos, mecanismos e formas de controle para auxiliar no processo de qualificação de aspersores para simuladores de chuva.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados referentes a análise experimental, que permitiu compreender o fenômeno da geração de chuva simulada, de modo a satisfazer os dois primeiros objetivos, identificar os índices de uniformidade da área molhada de diferentes chuvas simuladas por pontas aspersoras distintas e parametrizar as gotas e chuva gerada por diferentes pontas aspersoras utilizadas em simuladores de chuva.

Do mesmo modo é apresentado o modelo sistematizado do conhecimento sobre o processo para elaboração do modelo, satisfazendo os demais objetivos específicos, estabelecer as diretrizes para a modelagem do processo e elaborar um modelo consolidado de qualificação de pontas aspersoras.

4.1 ANALISE EXPERIMENTAL

4.1.1 Uniformidade de distribuição da chuva simulada nas condições planejadas

A avaliação experimental foi realizada no laboratório de motores do Colégio Técnico Industrial de Santa Maria (CTISM), este ambiente foi preparado para possibilitar a realização experimental. Conforme descrito na seção 3.1.3, foram realizadas 162 unidades experimentais de chuva simulada, sendo que cada unidade experimental teve um tempo de duração de 7 minutos, totalizando 1134 minutos (18,9 horas) de chuva simulada gerada.

Com a coleta e organização dos dados no Quadro do Apêndices A, foi calculado o CUC (Equação 3) das 162 unidades experimentais, sendo após calculado o valor médio de cada combinação. Com isso, no Quadro 8 é apresentado os valores médios do CUC hierarquizados pelo grau de aceitação, descritos por Mantovani (2001), para a área de 1 m².

Quadro 8 - Grau de aceitação do CUC para a área de 1 m².

Combinação	Ponta aspersora	Pressão (kPa)	Altura (m)	CUC (média) %	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	Grau de aceitação ²²
8	P1	150	2,1	92,67	1,12	1,21	Excelente
5	P1	100	2,1	89,45	2,40	2,68	Bom
9	P1	150	3,1	88,63	1,35	1,52	Bom
6	P1	100	3,1	87,87	1,41	1,60	Bom
3	P1	50	3,1	86,92	1,37	1,57	Bom
7	P1	150	1,1	82,93	1,30	1,57	Bom
2	P1	50	2,1	79,22	0,88	1,11	Razoável
4	P1	100	1,1	76,68	2,28	2,97	Razoável
27	P3	150	3,1	58,80	2,86	4,87	Inaceitável
1	P1	50	1,1	58,27	8,03	13,78	Inaceitável
26	P3	150	2,1	53,74	2,60	4,84	Inaceitável
24	P3	100	3,1	48,27	5,62	11,64	Inaceitável
23	P3	100	2,1	47,31	1,72	3,63	Inaceitável
21	P3	50	3,1	43,21	2,16	5,01	Inaceitável
18	P2	150	3,1	42,39	4,30	10,13	Inaceitável
15	P2	100	3,1	41,22	2,10	5,10	Inaceitável
20	P3	50	2,1	37,86	1,56	4,12	Inaceitável
17	P2	150	2,1	35,85	1,86	5,17	Inaceitável
25	P3	150	1,1	34,34	1,07	3,12	Inaceitável
14	P2	100	2,1	29,40	1,13	3,85	Inaceitável
12	P2	50	3,1	28,17	3,51	12,46	Inaceitável
22	P3	100	1,1	23,67	2,99	12,63	Inaceitável
16	P2	150	1,1	22,65	2,00	8,82	Inaceitável
11	P2	50	2,1	18,32	2,19	11,95	Inaceitável
19	P3	50	1,1	14,15	3,25	22,97	Inaceitável
13	P2	100	1,1	11,33	1,30	11,47	Inaceitável
10	P2	50	1,1	6,72	2,80	41,60	Inaceitável

Fonte: Autor.

No Quadro 9 é apresentado os valores médios do CUC hierarquizados pelo grau de aceitação para a área de 0,36 m². Nesta área analisada verifica-se um maior número de combinações que obtiveram uma classificação excelente ou boa, sendo três combinações excelentes (combinação 8, 5 e 9) e oito combinações boas (combinação 6, 3, 25, 4, 7, 2, 22 e 27).

²² O grau de aceitação utilizado para classificar foi o proposto por MANTOVANI (2001), onde maior que 90% é excelente, 80 a 90% é bom, 70 a 80% é razoável, 60 a 70% é ruim e menor que 60% é inaceitável.

Quadro 9 - Grau de aceitação do CUC para a área de 0,36 m².

Combinação	Ponta aspersora	Pressão (kPa)	Altura (m)	CUC (média) %	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	Grau de aceitação
8	P1	150	2,1	94,71	1,22	1,29	Excelente
5	P1	100	2,1	92,21	3,08	3,34	Excelente
9	P1	150	3,1	91,83	1,26	1,37	Excelente
6	P1	100	3,1	89,65	1,62	1,81	Bom
3	P1	50	3,1	89,47	1,75	1,96	Bom
25	P3	150	1,1	88,90	1,17	1,31	Bom
4	P1	100	1,1	87,64	1,68	1,91	Bom
7	P1	150	1,1	86,34	1,74	2,02	Bom
2	P1	50	2,1	84,61	1,22	1,44	Bom
22	P3	100	1,1	82,14	4,66	5,67	Bom
27	P3	150	3,1	81,48	2,20	2,71	Bom
26	P3	150	2,1	72,28	2,17	3,00	Razoável
24	P3	100	3,1	71,90	8,51	11,84	Razoável
19	P3	50	1,1	71,81	2,92	4,07	Razoável
1	P1	50	1,1	65,78	5,38	8,18	Ruim
17	P2	150	2,1	64,59	0,97	1,51	Ruim
15	P2	100	3,1	64,19	3,02	4,71	Ruim
21	P3	50	3,1	62,63	3,85	6,14	Ruim
18	P2	150	3,1	62,21	6,44	10,36	Ruim
23	P3	100	2,1	60,69	1,68	2,76	Ruim
13	P2	100	1,1	60,13	0,38	0,63	Ruim
16	P2	150	1,1	59,85	1,11	1,85	Inaceitável
14	P2	100	2,1	57,66	1,66	2,87	Inaceitável
20	P3	50	2,1	56,94	0,85	1,50	Inaceitável
12	P2	50	3,1	52,51	1,96	3,73	Inaceitável
11	P2	50	2,1	45,54	1,96	4,60	Inaceitável
10	P2	50	1,1	40,38	1,97	4,89	Inaceitável

Fonte: Autor.

Os dados do Quadro 8 permitem verificar que, para a área de 1 m², das 27 combinações, cinco foram classificadas com um grau de aceitação bom e uma foi classificada como excelente, sendo que estas combinações são referentes a ponta aspersora P1.

Já para a área de 0,36 m² (Quadro 9), oito combinações foram classificadas com grau de aceitação bom e três são excelentes, sendo que oito das onze são referentes ao aspersor P1 e três são referentes ao aspersor P3.

Nas condições experimentais, o aspersor P2 segundo o sistema de classificação adotado apresenta os resultados classificados como ruins ou inaceitáveis.

Verificou-se que os melhores resultados da classificação do CUC foram obtidos para a menor área (0,36 m²), porém esta área quando comparada com as áreas utilizadas em experimentos com simuladores de chuva ela é muito pequena e não é representativa. Desta forma, a área de 1 m² apresenta-se como a mais viável e visto que a área de 1 m² está presente em diversos estudos e projetos de simuladores de chuva portáteis.

Diante do exposto, o projetista tem à disposição um conjunto de informações importantes que auxiliam na definição da concepção do simulador de chuva. Visto que, se for utilizado a combinação 27 considerando a área de 0,36 m² (P3, $p = 150$ kPa; $h = 3,1$ m) será necessária uma estrutura maior do simulador de chuva, demandando mais matéria prima (barras, tubos, cantoneiras, etc.) e tubulações e conexões hidráulicas, além de que será necessário um sistema hidráulico que consiga recalcar a água até essa altura, necessitando de uma maior potência da bomba hidráulica e demanda energética.

Se o projetista selecionar a combinação 2 (P1, $p = 50$ kPa, $h = 2,1$ m) para a área de 0,36 m², a potência da bomba poderá ser menor, visto que é necessária uma menor pressão do fluido, reduzindo o custo com a bomba e também por ser uma menor altura, será necessário menos material de construção mecânica para fabricação da concepção e de tubos e conexões hidráulicas, isso tende a reduzir o custo do simulador de chuva.

4.1.2 Caracterização das gotas de chuva simulada utilizando disdrômetro

Um aspecto fundamental a ser considerado na geração de chuva simulada é a garantia de que as gotas que estão sendo geradas reproduzem o mais próximo possível as características de tamanho, velocidade de queda, intensidade e não menos importante, a energia cinética da chuva natural. Neste contexto, nos Quadros 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17 e 18 são apresentadas as características das vinte e sete combinações de chuva simulada gerada.

Quadro 10 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 50 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	60,66	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	238,85	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	958,22
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	397,83		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	2940,18		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	9999,99 ²²
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,48		Velocidade média (m s ⁻¹)	3,50		Velocidade média (m s ⁻¹)	4,38
	Diâmetro médio (mm)	0,74		Diâmetro médio (mm)	1,18		Diâmetro médio (mm)	1,22
	Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	112,50		Número médio de gotas	72,50

Fonte: Autor.

Quadro 11 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 100 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	74,04	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	199,14	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	382,71
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	579,31		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	2380,91		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	8459,76
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,25		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,58		Velocidade média (m s ⁻¹)	3,08
	Diâmetro médio (mm)	0,69		Diâmetro médio (mm)	0,85		Diâmetro médio (mm)	0,98
	Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	67,50

Fonte: Autor.

Quadro 12 - Características da chuva simulada para altura 1,1 m e pressão 150 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	84,18	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	133,28	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	138,45
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	764,02		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	1828,67		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	2463,24
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,34		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,50		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,50
	Diâmetro médio (mm)	0,77		Diâmetro médio (mm)	0,89		Diâmetro médio (mm)	0,88
	Número médio de gotas	116,67		Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	75,00

Fonte: Autor.

Quadro 13 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 50 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	47,59	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	349,77	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	712,26
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	364,15		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	4401,33		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	9999,99 ²³
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,33		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,43		Velocidade média (m s ⁻¹)	3,00
	Diâmetro médio (mm)	0,70		Diâmetro médio (mm)	0,93		Diâmetro médio (mm)	0,86
	Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	75,00

Fonte: Autor.

Quadro 14 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 100 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	49,90	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	346,88	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	360,41
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	374,49		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	4228,58		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	6314,54
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,02		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,05		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,76
	Diâmetro médio (mm)	0,75		Diâmetro médio (mm)	0,93		Diâmetro médio (mm)	0,86
	Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	75,00		Número médio de gotas	75,00

Fonte: Autor.

Quadro 15 - Características da chuva simulada para altura 2,1 m e pressão 150 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	60,90	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	232,82	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	210,54
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	470,31		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	2647,12		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	3053,97
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,02		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,09		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,85
	Diâmetro médio (mm)	0,77		Diâmetro médio (mm)	0,93		Diâmetro médio (mm)	0,86
	Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	116,67		Número médio de gotas	91,67

Fonte: Autor.

Quadro 16 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 50 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	37,46	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	126,55	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	84,95
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	269,08		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	1045,70		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	668,25
	Velocidade média (m s ⁻¹)	2,27		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,02		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,57
	Diâmetro médio (mm)	0,70		Diâmetro médio (mm)	0,85		Diâmetro médio (mm)	0,75
	Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	129,17		Número médio de gotas	117,50

Fonte: Autor.

Quadro 17 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 100 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	39,09	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	77,29	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	77,61
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	220,94		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	390,94		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	473,49
	Velocidade média (m s ⁻¹)	1,98		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,00		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,00
	Diâmetro médio (mm)	0,70		Diâmetro médio (mm)	0,81		Diâmetro médio (mm)	0,75
	Número médio de gotas	83,33		Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	125,00

Fonte: Autor.

Quadro 18 - Características da chuva simulada para altura 3,1 m e pressão 150 kPa.

Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores	Ponta aspersora	Características	Média dos Valores
P1	Intensidade (mm h ⁻¹)	49,95	P2	Intensidade (mm h ⁻¹)	83,05	P3	Intensidade (mm h ⁻¹)	71,53
	Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	242,32		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	399,41		Energia Cinética (J m ⁻² h ⁻¹)	375,73
	Velocidade média (m s ⁻¹)	1,98		Velocidade média (m s ⁻¹)	1,97		Velocidade média (m s ⁻¹)	2,00
	Diâmetro médio (mm)	0,75		Diâmetro médio (mm)	0,85		Diâmetro médio (mm)	0,75
	Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	125,00		Número médio de gotas	125,00

Fonte: Autor.

Ressalta-se que os dados da intensidade e energia cinética²³ apresentadas nos Quadros 10 a 18 são fornecidos de forma direta pelo programa computacional OTT ASDO, já os dados da velocidade, diâmetro e número de gotas são coletados a partir da interpretação do gráfico apresentado na tela pelo programa computacional e apresentados na forma de valores médios.

Diante do exposto, verifica-se que para o P1 os valores da intensidade (mm h⁻¹) da chuva simulada gerada aumentam conforme aumenta a pressão do fluido. Já para o P2 e P3, os valores da intensidade tendem a serem menores conforme ocorre o aumento da pressão, uma provável causa pode ser a geometria interna da ponta aspersora. O mesmo ocorre considerando os valores de energia cinética, onde para P1 os valores de energia cinética tendem a aumentarem conforme aumenta a pressão, já para P2 e P3 os valores de energia cinética tendem a serem menores conforme aumenta a pressão.

Buscando comparar os valores de energia cinética medidos pelo disdrômetro com os valores resultantes das equações 5 e 6 foi elaborado o Quadro 19.

²³ Os valores de energia cinética apresentados como 9999,99 significam que o valor é maior do que a capacidade de medição do disdrômetro.

Quadro 19 - Valores de energia cinética medidos pelo disdrômetro e calculados pelas equações matemáticas.

Combinação	Intensidade (mm h ⁻¹)	Energia cinética (J mm ⁻² h ⁻¹)					Coeficiente de variação (CV) %
		Disdrômetro	Calculado pela equação 5	Calculado pela equação 6	Média	Desvio Padrão	
1	60,66	397,83	1698,13	1646,82	1247,59	601,24	48,19
2	47,59	364,15	1288,10	1251,90	968,05	427,28	44,14
3	37,46	269,08	966,15	945,81	727,01	323,91	44,55
4	74,04	579,31	2109,01	2046,72	1578,35	706,88	44,79
5	49,90	374,49	1361,15	1321,87	1019,17	456,14	44,76
6	39,09	220,94	1018,01	994,86	744,60	370,41	49,75
7	84,18	764,02	2415,10	2346,19	1841,77	762,60	41,41
8	60,90	470,31	1705,58	1654,04	1276,64	570,55	44,69
9	49,95	242,32	1362,72	1323,38	976,14	519,14	53,18
10	238,85	2940,18	6926,62	6759,30	5542,03	1841,06	33,22
11	349,77	4401,33	10143,33	9898,49	8147,72	2650,98	32,54
12	126,55	1045,70	3665,23	3572,21	2761,05	1213,53	43,95
13	199,14	2380,91	5774,86	5634,98	4596,92	1567,99	34,11
14	346,88	4228,58	10059,52	9816,70	8034,93	2693,32	33,52
15	77,29	390,94	2207,56	2143,04	1580,51	841,57	53,25
16	133,28	1828,67	3861,57	3764,55	3151,60	936,29	29,71
17	232,82	2647,12	6751,74	6588,61	5329,16	1897,66	35,61
18	83,05	399,41	2381,18	2312,97	1697,85	918,56	54,10
19	958,22	9999,99	27788,38	27117,63	21635,33	8231,98	38,05
20	712,26	9999,99	20655,54	20156,96	16937,50	4909,78	28,99
21	84,95	668,25	2438,19	2368,81	1825,08	818,49	44,85
22	382,71	8459,76	11098,59	10830,69	10129,68	1185,87	11,71
23	360,41	6314,54	10451,89	10199,60	8988,68	1893,70	21,07
24	77,61	473,49	2217,24	2152,50	1614,41	807,19	50,00
25	138,45	2463,24	4012,20	3912,06	3462,50	707,77	20,44
26	210,54	3053,97	6105,54	5957,83	5039,12	1405,00	27,88
27	71,53	375,73	2032,59	1972,11	1460,14	767,19	52,54

Fonte: Autor.

Nota-se que os valores e energia cinética calculados apresentam uma diferença com relação aos valores medidos pelo disdrômetro. Verificou-se um coeficiente de variação médio de 40%. Tal fenômeno pode ser em decorrência das pontas analisadas não gerarem gotas de chuva com as características (diâmetro médio e velocidade de queda) similares a da chuva natural para as respectivas intensidades.

Desta forma, verifica-se que apesar das pontas analisadas apresentarem, para determinadas condições uma uniformidade da distribuição excelente e boa, as pontas P1, P2 e P3 segundo a comparação da energia cinética com as equações

matemáticas apresentadas na literatura, representam valores de energia cinética diferentes das chuvas naturais.

4.2 MODELO DO PROCESSO PARA QUALIFICAÇÃO DE ASPERSOR PARA SIMULADOR DE CHUVA.

Em virtude do estudo apresentado no Capítulo 2, verificou-se a indisponibilidade de um modelo de processo que auxilie os engenheiros projetistas a selecionar adequadamente um aspersor que simule gotas de chuva natural.

Com isso, o conjunto de informações apresentadas nos documentos citados no Capítulo 2, juntamente com a fase de análise experimental que permitiu compreender melhor o fenômeno de geração de chuva simulada foi elaborado a proposta de modelo utilizando o IDEF0.

Seguindo a ordem do processo da metodologia IDEF0, primeiramente foi definido a árvore de nós (Figura 51), que corresponde a representação do modelo em todos os seus níveis.

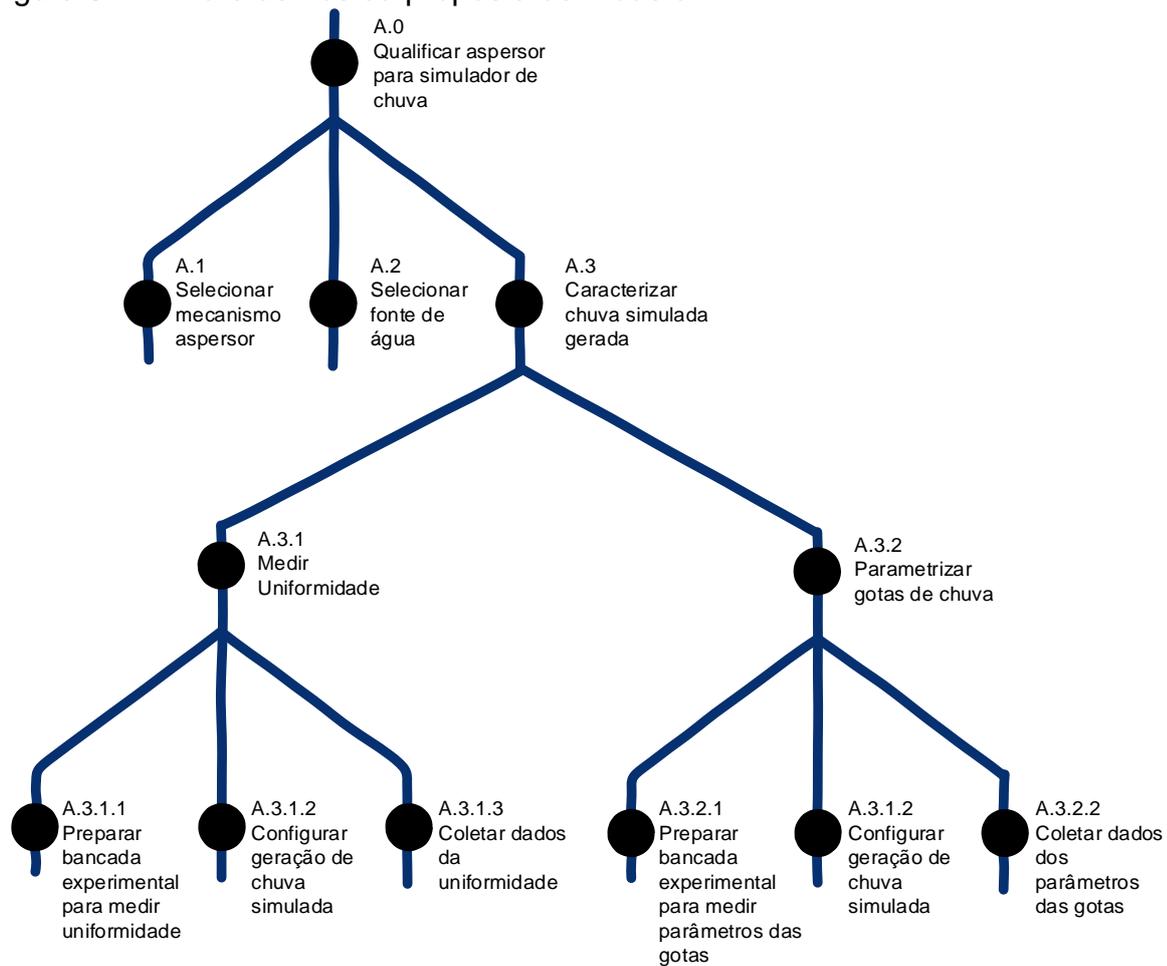
Na proposta de modelo, o nó de maior nível identificado foi o A.0, que corresponde a “caracterizar aspersor para simulador de chuva”. O nível A0 é composto pelos níveis A.1 – “Selecionar mecanismo aspersor”, A.2 – “Selecionar fonte de água” e A.3 – “Caracterizar chuva simulada”.

Os níveis A.1 e A.2 já apresentam sua forma mais detalhada de informações, desta forma ambos não foram decompostos. Já o nível A.3 é composto pelos níveis A.3.1 – “Medir uniformidade” e A.3.2 – “Parametrizar gotas de chuva”.

O nível A.3.1 é composto pelos menores níveis A.3.1.1 – “Preparar bancada experimental para medir uniformidade”, A.3.1.2 – “Configura geração de chuva simulada” e A.3.1.3 – “Coletar dados de uniformidade”.

O nível A.3.2 é composto pelos níveis A.3.2.1 – “Preparar bancada experimental para medir parâmetros das gotas”, A.3.1.2 – “Configurar geração de chuva simulada” (este nível corresponde a mesma função modelada para o nível A.3.1) e A.3.2.2 – “Coletar dados dos parâmetros das gotas”.

Figura 51 - Árvore de nós da proposta de modelo.

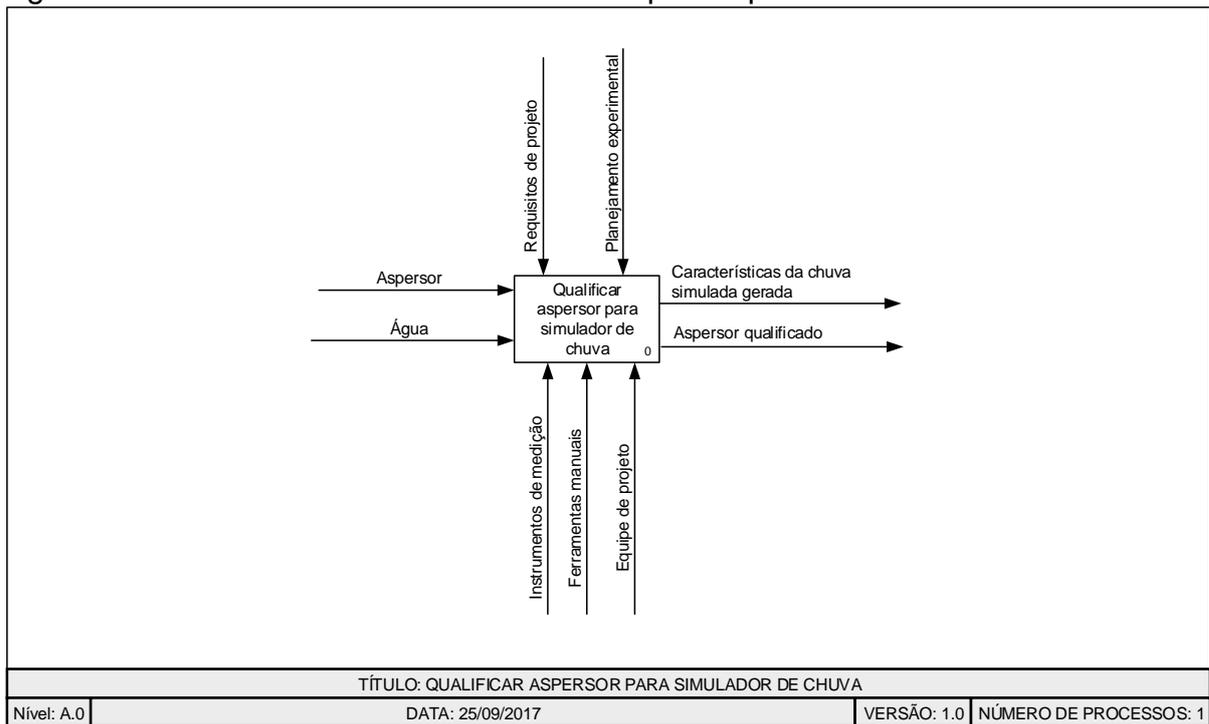


Fonte: Autor.

Após a definição da árvore de nós foi realizado a modelagem do processo para cada um dos respectivos níveis, começando do nível de maior grau para o menor grau. Desta forma, na Figura 52 é apresentado o nível A.0 do processo. Este nível corresponde a função global do processo, sendo a função definida para este nível “Qualificar aspersor para simulador de chuva”.

As entradas identificadas para o nível A.0 foram, o aspersor a ser qualificado e a água utilizada no processo. Os mecanismos, que correspondem os aspectos físicos utilizados no processo, para este nível foram definidos os instrumentos de medição, ferramentas manuais e a equipe de projeto. As formas de controle para este nível são os requisitos de projeto e o planejamento experimental. Este conjunto de informações permitirá a execução da função e resultará como saídas as características da chuva simulada gerada e o aspersor qualificado.

Figura 52 - Processo nível A.0 – Qualificar aspersor para simulador de chuva.

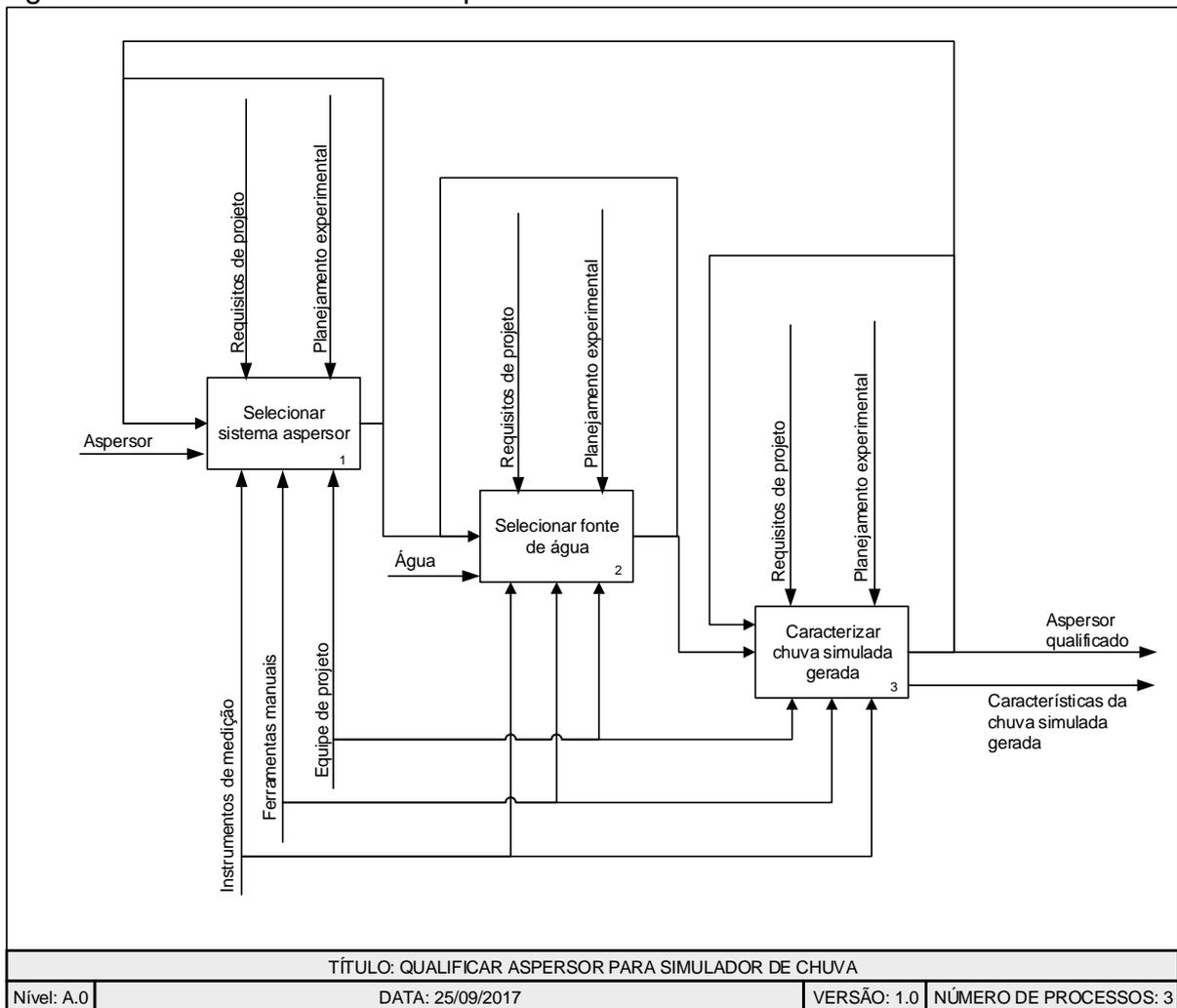


Fonte: Autor.

A metodologia do IDEF0 permite representar o nível A.0 de uma forma expandida, representada na Figura 53. Neste nível é possível verificar a presença das funções A.1, A.2 e A.3 com suas respectivas entradas, mecanismos, controles e saídas. As funções são representadas pela sua ordem de execução, ou seja, da esquerda para a direita e de cima para baixo.

Também é possível verificar que no final de cada função (A.1, A.2 e A.3) foi definido uma saída com retorno para a entrada no nível atual ou superior, isso permite a equipe de projeto no final de cada atividade, em função do resultado obtido poder em retornar e realizar novamente a atividade até obter resultados adequados.

Figura 53 - Processo nível A.0 expandido.



Fonte: Autor.

O nível A.1 consiste na seleção do sistema aspersor que será qualificado, na Figura 54 é apresentada a modelagem do processo para este nível. Foi definido seis atividades a serem realizadas nesta fase:

- A.1.1 - Definição dos critérios de seleção: estes critérios são definidos pela equipe de projeto, devendo estar de acordo com o tipo de experimentação agrícola na qual o simulador de chuva será utilizado;
- A.1.2 - Identificação dos sistemas aspersores comerciais;
- A.1.3 - Análise dos aspersores com relação aos mecanismos definidos;
- A.1.4 - Hierarquizar os aspersores: A hierarquização dos aspersores vai permitir a equipe de projeto atribuir uma ordem de classificação para os aspersores analisados, de tal forma que em virtude de um aspersor não

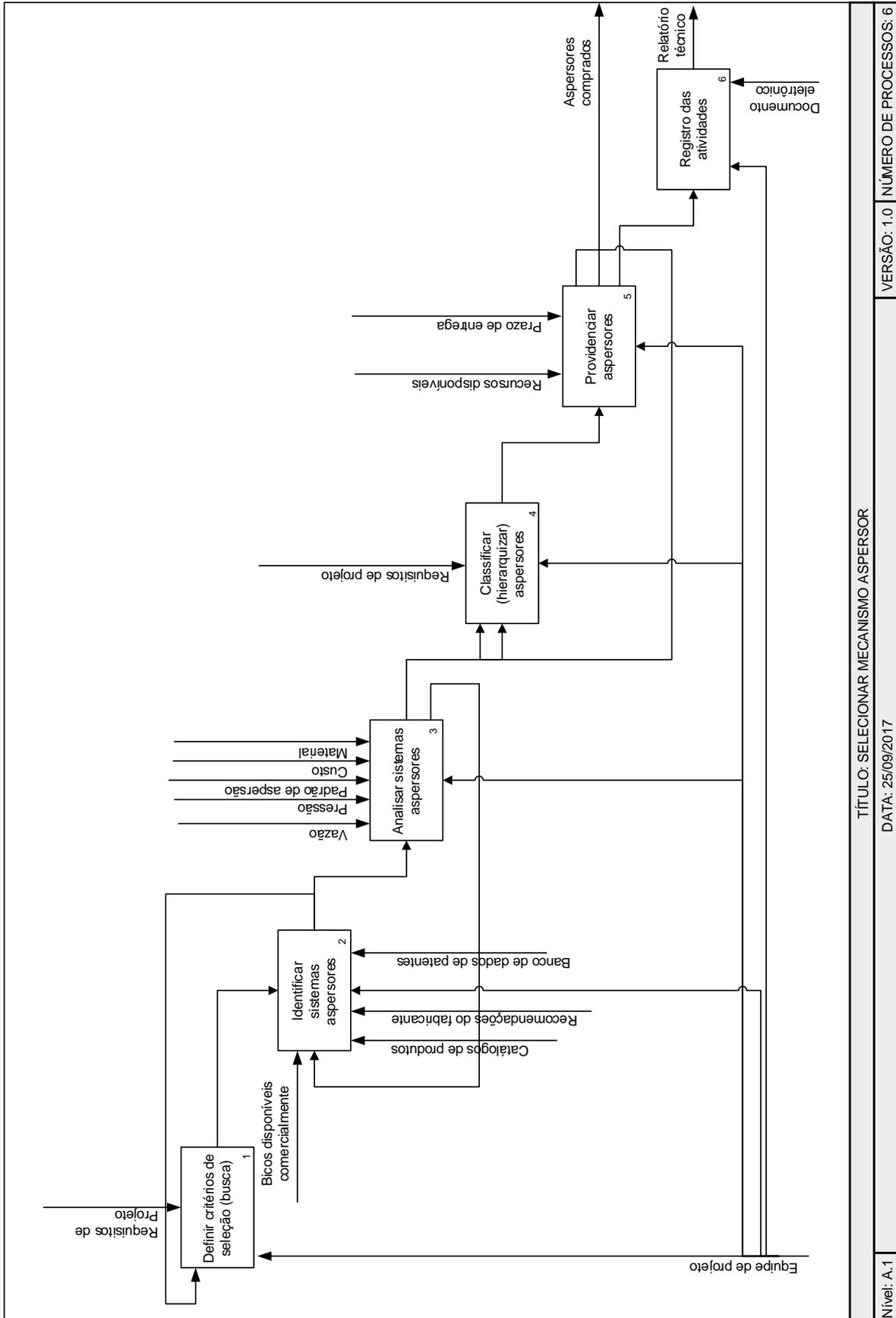
ser qualificado a equipe de projeto já tenha definido o próximo modelo a ser analisado;

- A.1.5 - Providenciar aspersor: A equipe de projeto deverá ter recursos disponíveis para aquisição do aspersor selecionado, caso contrário seleciona-se o aspersor na ordem seguinte de classificação;
- A.1.6 - Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições apreendidas nesta fase.

A Figura 55 apresenta o nível A.2, este nível corresponde a seleção da fonte de água na qual será utilizada para realizar os experimentos de parametrização dos aspersores. Esse nível é composto por cinco atividades:

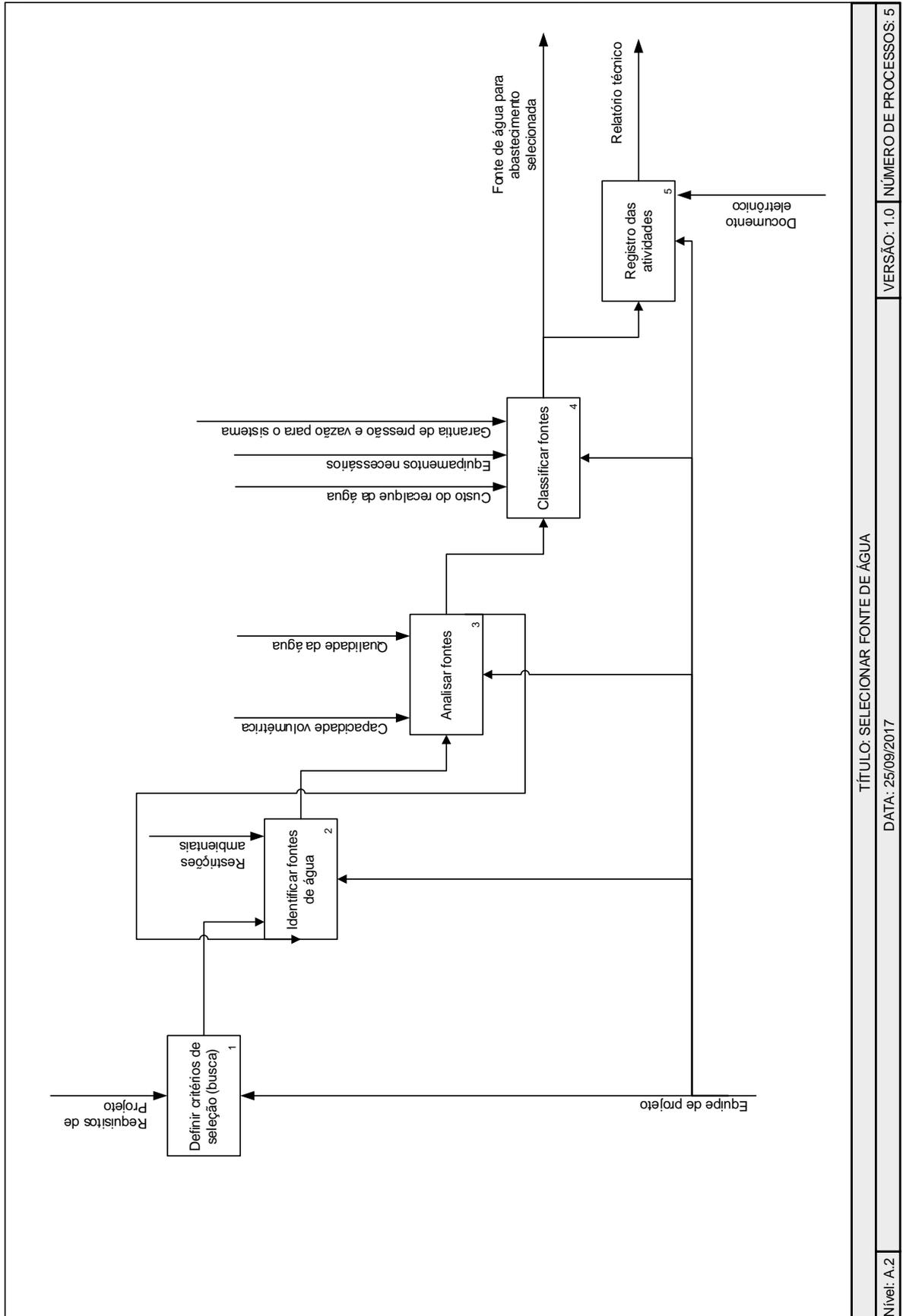
- A.2.1 – Definir os critérios de busca e seleção: a equipe de projeto vai definir os critérios baseados no local onde será realizado os experimentos;
- A.2.2 – Identificar fontes de água: a equipe de projeto baseado nos critérios definidos identifica as fontes de água disponíveis, sendo destacado nesta atividade o mecanismo de controle que consiste nas restrições ambientais para a utilização da água;
- A.2.3 – Analisar fontes: a equipe de projeto realiza uma análise das fontes identificadas com relação a capacidade volumétrica e a qualidade da água;
- A.2.4 – Classificar fontes: a equipe de projeto classifica as fontes aptas com relação aos mecanismos de controle atribuídos, custo do recalque da água, equipamentos necessários, garantia de pressão e vazão para o sistema;
- A.2.5 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições apreendidas nesta fase.

Figura 54 - Processo nível A.1 – Selecionar mecanismo aspersor.



Fonte: Autor.

Figura 55 - Processo nível A.2 – Selecionar fonte de água.



Fonte: Autor.

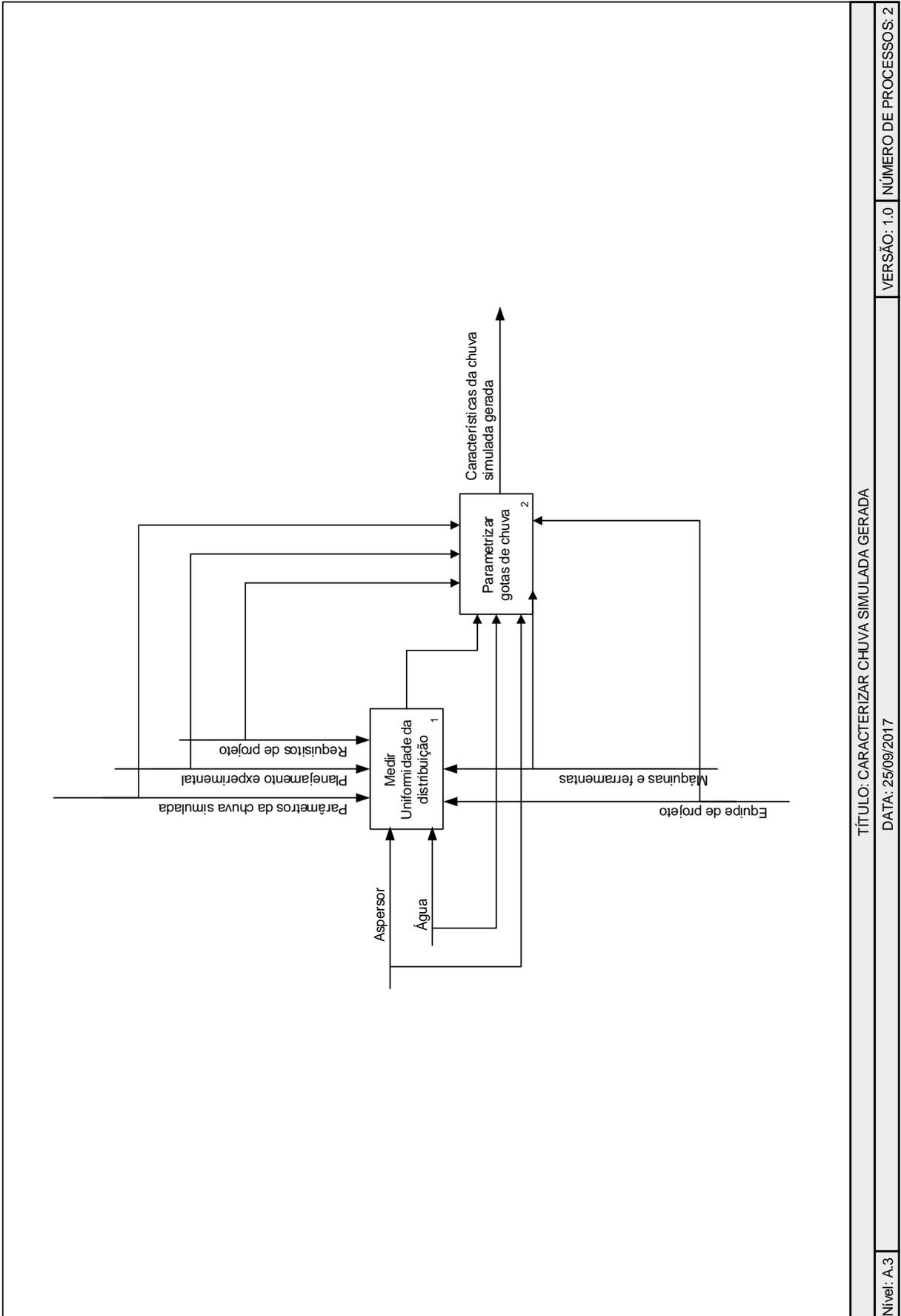
Na Figura 56 é apresentado a modelagem do nível A.3, este nível corresponde a caracterização da chuva simulada, para este processo foram definidas duas funções:

- A.3.1 – Medir uniformidade da distribuição: esta função está presente na proposta de modelo devido a sua importância em projetos de simuladores de chuva, visto que, é desejável a utilização de sistemas aspersores que proporcionam a maior uniformidade da distribuição da chuva simulada gerada dentro de uma área estabelecida nos requisitos de projeto do simulador de chuva;
- A.3.2 – Parametrizar gotas de chuva: esta função está presente na proposta de modelo devido a sua importância em evidenciar as características das gotas geradas, visto que para um simulador de chuva ser validado as gotas tem que simular as características de tamanho, velocidade e energia cinética similares a chuva natural.

Na Figura 57 é apresentado a modelagem do nível A.3.1, este nível é constituído por três processos:

- A.3.1.1 – Preparar bancada experimental: esta função é realizada pela equipe de projeto, tem como objetivo a montagem da bancada na qual será realizado os experimentos nos aspersores;
- A.3.1.2 – Configurar geração da chuva simulada: esta função é realizada pela equipe de projeto, tendo como objetivo a partir das informações do planejamento experimental realizar a configuração do tempo, pressão e vazão que serão utilizadas para realizar os experimentos;
- A.3.1.3 – Coletar dados da uniformidade: esta função é realizada pela equipe de projeto, nesta função é realizado a identificação da uniformidade da área molhada dos aspersores analisados.

Figura 56 - Processo nível A.3 – Caracterizar chuva simulada gerada.



TÍTULO: CARACTERIZAR CHUVA SIMULADA GERADA

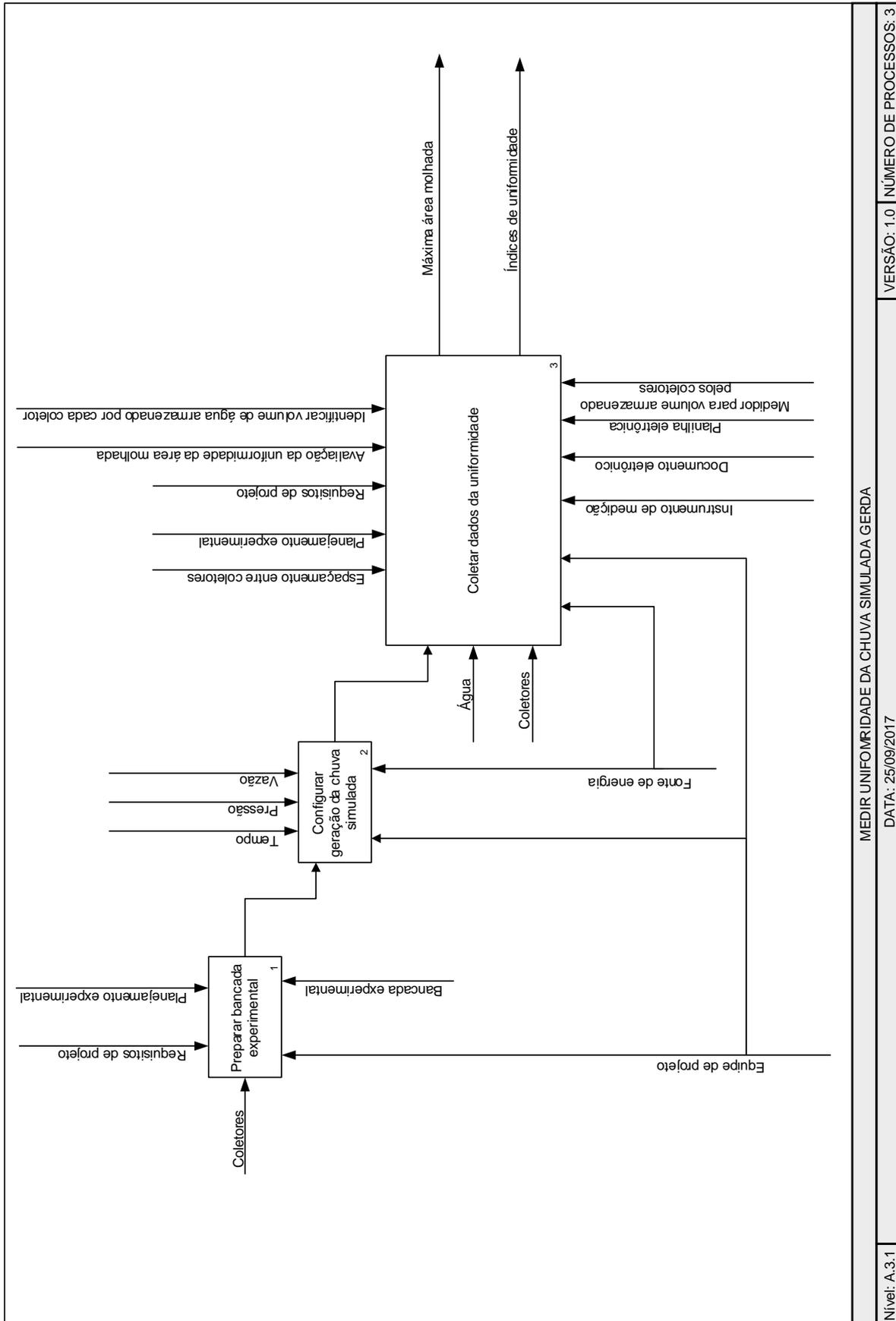
DATA: 25/09/2017

Nível: A.3

VERSÃO: 1.0

NÚMERO DE PROCESSOS: 2

Figura 57 - Processo nível A.3.1 – Medir uniformidade da chuva simulada gerada.



MEDIR UNIFORMIDADE DA CHUVA SIMULADA GERADA

DATA: 25/09/2017

VERSÃO: 1.0 | NÚMERO DE PROCESSOS: 3

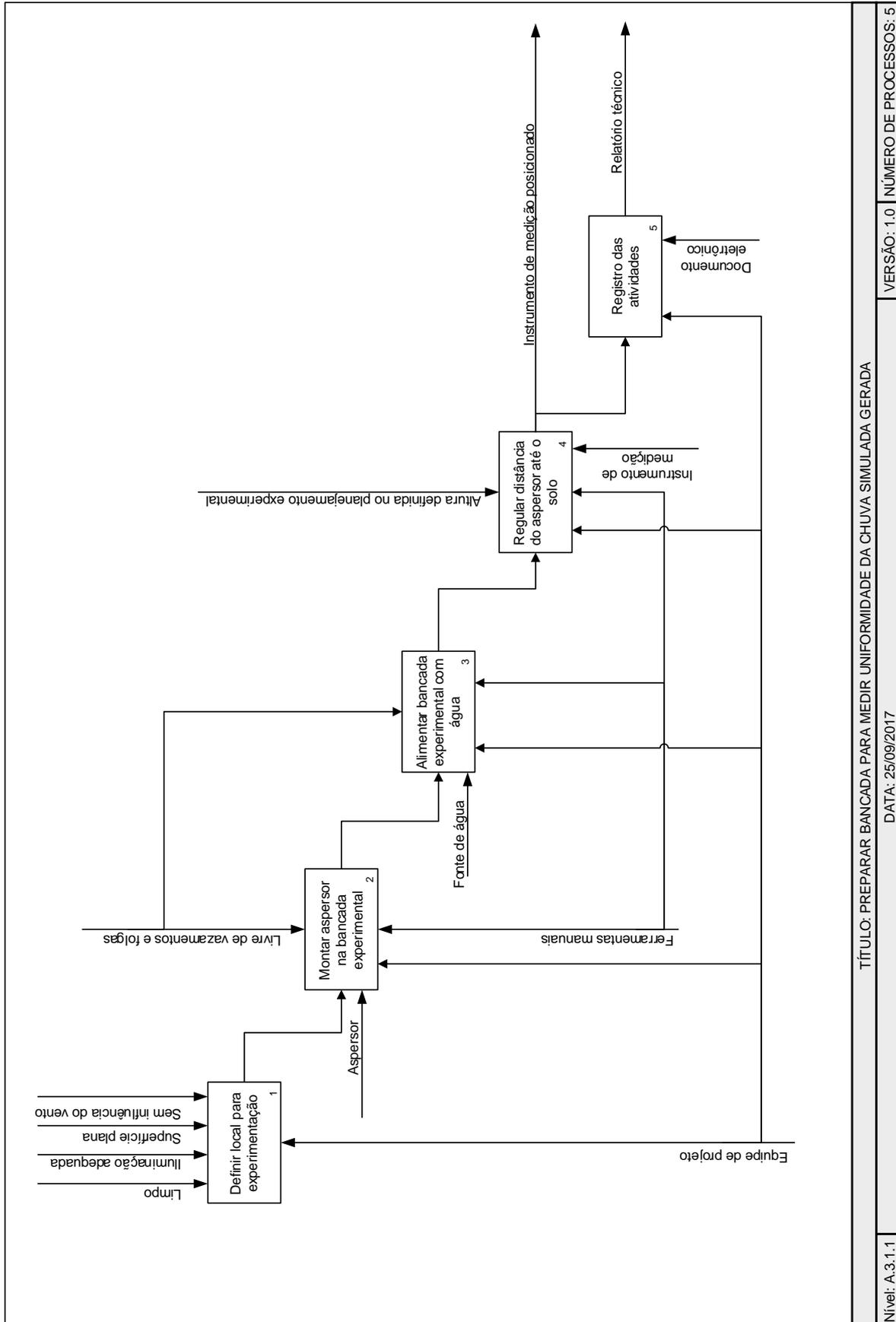
Nível: A.3.1

Fonte: Autor.

Na Figura 58 é apresentado o nível A.3.1.1, este nível corresponde a preparação da bancada experimental, sendo composto por cinco atividades:

- A.3.1.1.1 – Definir local para experimentação: A equipe de projeto deve observar as condições de limpeza, iluminação, planicidade da superfície e a influência das condições climáticas (vento, sol, chuva natural);
- A.3.1.1.2 – Montar aspersor na bancada experimental: A equipe de projeto realiza a montagem do aspersor observando a presença de vazamentos ou folgas no sistema, para isso utiliza ferramentas manuais de apoio;
- A.3.1.1.3 – Alimentar bancada experimental com água: a equipe de projeto utiliza a fonte de água selecionada para alimentar a bancada, sendo observado a presença de vazamentos e folga na montagem dos componentes;
- A.3.1.1.4 – Regular distância do aspersor até o solo: a equipe de projeto utiliza as informações definidas no planejamento experimental para regular a distância (altura) do aspersor até o solo onde são posicionados os coletores para medir a uniformidade;
- A.3.1.1.5 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições aprendidas nesta fase.

Figura 58 - Processo nível A.3.1.1 – Preparar bancada para medir uniformidade da chuva simulada.



TÍTULO: PREPARAR BANCADA PARA MEDIR UNIFORMIDADE DA CHUVA SIMULADA GERADA

DATA: 25/09/2017

Nível: A.3.1.1

VERSÃO: 1.0

NÚMERO DE PROCESSOS: 5

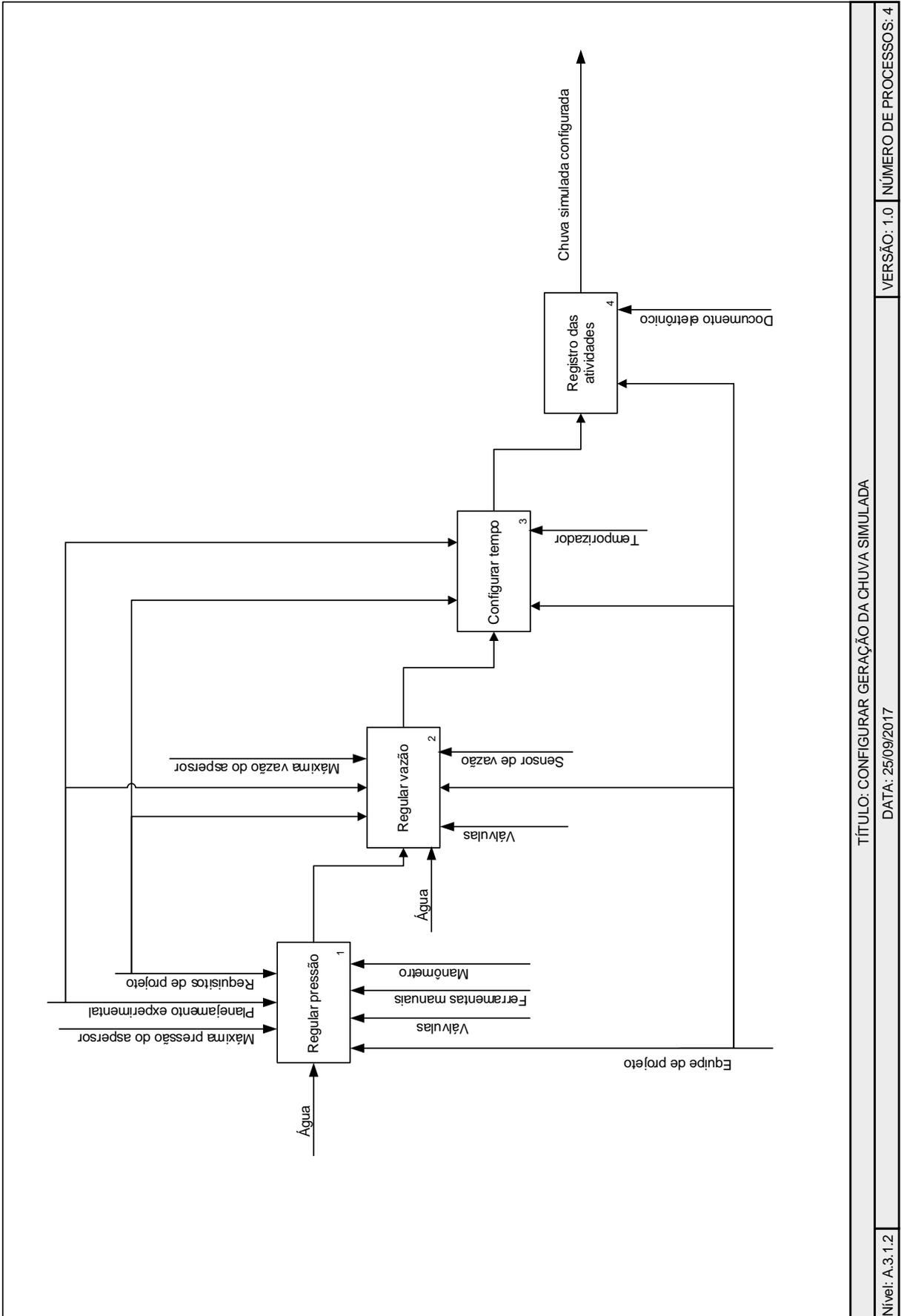
Na Figura 59 é apresentado o nível A.3.1.2, este nível corresponde a configuração da geração da chuva simulada. Esta atividade é realizada pela equipe de projeto que realiza a configuração dos parâmetros que utilizados para realizar a chuva simulada através do sistema aspersor selecionado. Este nível é composto por quatro atividades:

- A.3.1.2.1 – Regular pressão: a equipe de projeto regula no sistema, que pode ser por meio de eletroválvulas ou válvulas manuais a pressão da água, devendo, a mesma ser monitorada o mais próximo possível do aspersor. Deve ser observado a pressão máxima de trabalho definido no catálogo do modelo do aspersor e também no planejamento experimental;
- A.3.1.2.2 – Regular vazão: a equipe de projeto regula a vazão da água no sistema, que pode ser por meio de eletroválvulas ou válvulas manuais a vazão da água, devendo ser monitorado o mais próximo possível do aspersor. Deve ser observado a vazão máxima de trabalho definido no catálogo do modelo do aspersor e também no planejamento experimental;
- A.3.1.2.3 – Configurar tempo: a equipe de projeto configura o tempo máximo a ser realizado a chuva simulada, o controle do tempo pode ser realizado por meio de sistemas de controle automático ou manualmente utilizando cronômetros, sempre observando o que foi definida no planejamento experimental;
- A.3.1.2.4 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições aprendidas nesta fase.

Na Figura 60 é apresentado o nível A.3.1.3, nível que corresponde a coleta dos dados da uniformidade, ou seja, é a realização dos experimentos. Nesta atividade que a equipe de projeto coleta os dados referentes a uniformidade de cada aspersor segundo o que foi planejado. A importância de estar presente na proposta do modelo se dá em virtude de ser um parâmetro para validação de um projeto de simulador de chuva. Este nível é composto por oito atividades:

- A.3.1.3.1 – Montar malha com coletores: a equipe de projeto realiza a distribuição dos coletores na superfície para a coleta da água proveniente da chuva simulada gerada. Deve-se observar a seleção de coletores com a capacidade de armazenamento que proporcione armazenar o volume durante o tempo determinado para o experimento. Com isso a equipe de projeto pode realizar uma chuva preliminar para verificar se os coletores selecionados proporcionam a capacidade adequada. O espaçamento utilizado é o definido no planejamento experimental;
- A.3.1.3.2 – Esta função é a mesma realizada no nível A.3.1.2;
- A.3.1.3.3 – Gerar chuva simulada: a equipe de projeto realiza o início da geração da chuva simulada, observando as conformidades do processo;
- A.3.1.3.4 – Coletar dados (volume de água): a equipe de projeto identifica o volume de água coletado por cada um dos recipientes. A medição dos volumes pode ser realizada por meio de uma proveta graduada, balança de precisão ou outro instrumento adequado;
- A.3.1.3.5 – Organizar dados: a equipe de projeto organiza os dados em planilhas eletrônicas com o objetivo de permitir a aplicação das equações matemáticas que determinam os valores dos coeficientes para as áreas definidas no planejamento experimental;
- A.3.1.3.6 – Analisar dados: a equipe de projeto realiza a análise e atribui uma classificação segundo normas ou recomendações da literatura para cada um dos valores de uniformidade das condições experimentais planejadas;
- A.3.1.3.7 – Apresentar dados: a equipe de projeto realiza a apresentação da classificação dos valores de uniformidade do aspersor analisado, os dados podem ser apresentados na forma de tabelas e gráficos;
- A.3.1.3.8 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições apreendidas nesta fase.

Figura 59 - Processo nível A.3.1.2 – Configurar a geração da chuva simulada.



TÍTULO: CONFIGURAR GERAÇÃO DA CHUVA SIMULADA

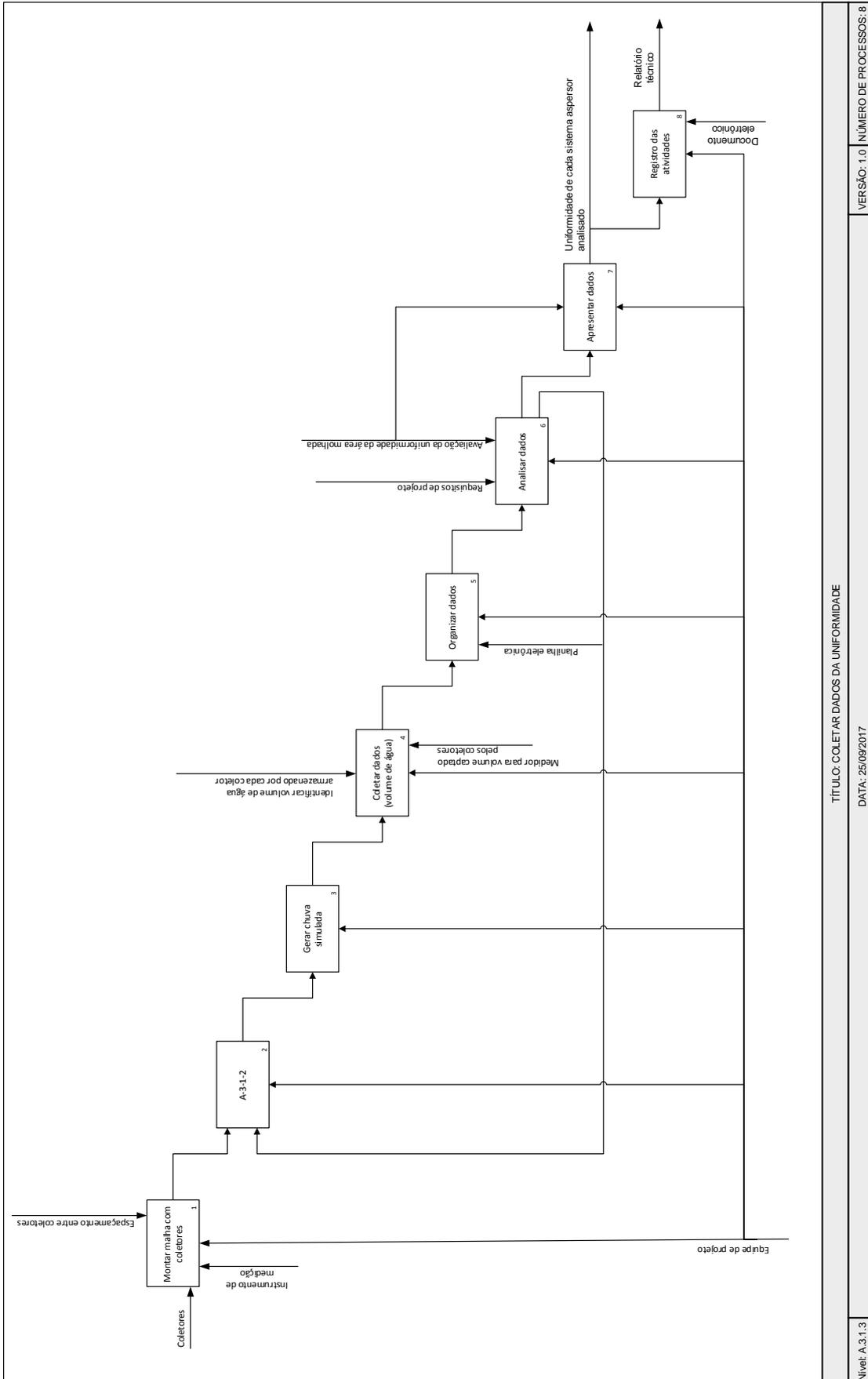
DATA: 25/09/2017

Nível: A.3.1.2

VERSÃO: 1.0

NÚMERO DE PROCESSOS: 4

Figura 60 - Processo nível A.3.1.3 – Coletar dados da uniformidade.

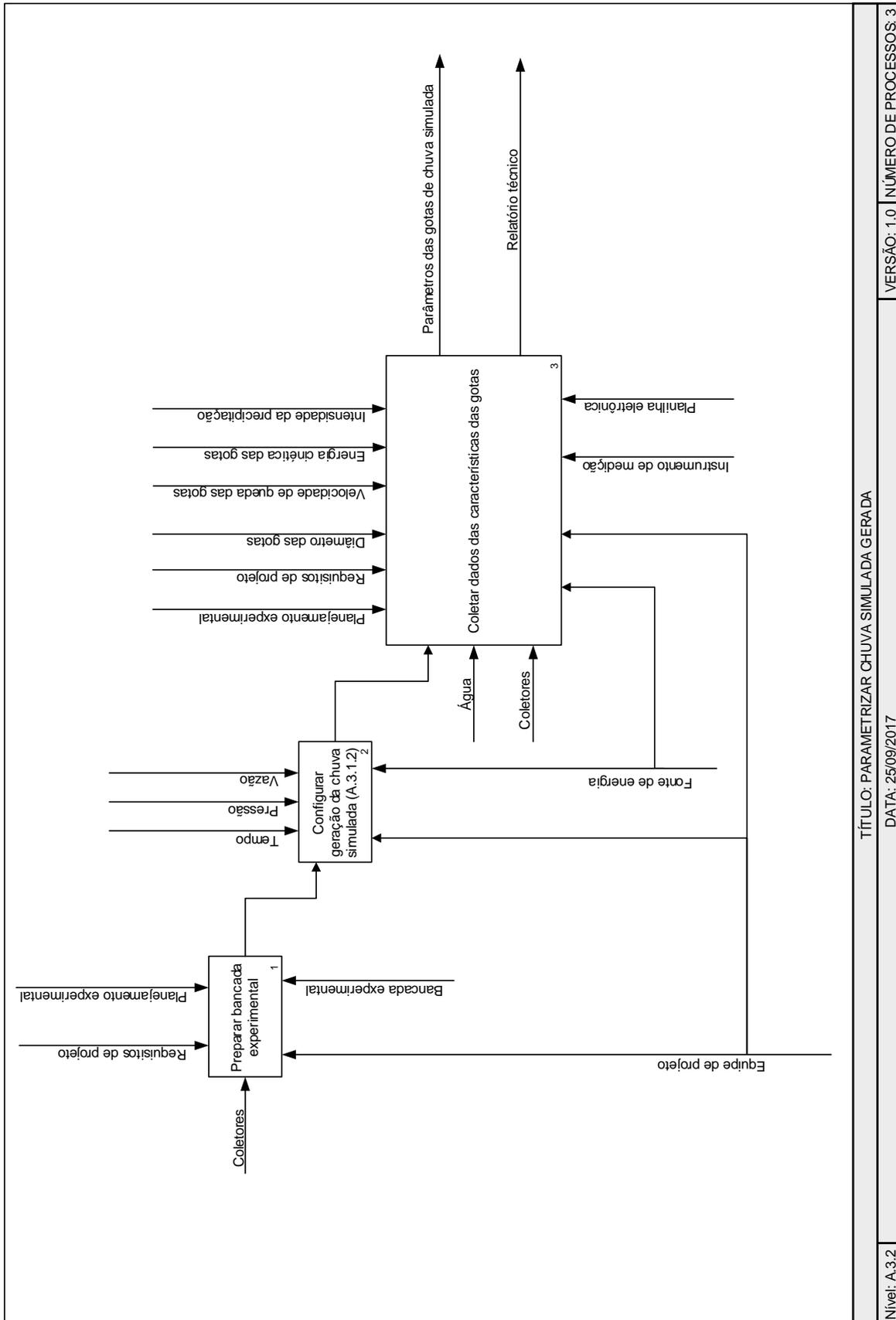


Fonte: Autor.

Na Figura 61 é apresentado o nível A.3.2, nível que corresponde a parametrização das gotas de chuva gerada pelo sistema aspersor. Nesta atividade a equipe de projeto coleta os dados referentes ao diâmetro de gotas, velocidade de queda, intensidade, número de gotas e energia cinética para cada uma das combinações planejada. Sua importância em estar presente na proposta do modelo é em virtude de ser um importante parâmetro que permite a equipe de projeto verificar se as gotas geradas pelo sistema aspersor em análise efetivamente reproduzem as características de uma chuva natural para a mesma intensidade. Este nível é composto por três atividades:

- A.3.2.1 – Preparar bancada experimental: a equipe de projeto realiza a preparação da bancada. Por mais que essa atividade seja similar com a A.3.1.1, ela apresenta suas particularidades, sendo apresentados na sequência;
- Configurar geração de chuva simulada: este processo corresponde ao mesmo processo apresentado no nível A.3.1.2;
- A.3.2.2 – Coletar dados: a equipe de projeto, utilizando como mecanismo o planejamento experimental e os requisitos de projeto realiza a coleta dos dados referente as características da chuva simulada gerada, diâmetro das gotas, velocidade das gotas, energia cinética das gotas e intensidade das gotas. A coleta desses dados gera como saída desse processo a parametrização das gotas.

Figura 61 - Processo nível A.3.2 – Parametrizar gotas de chuva simulada.



Fonte: Autor.

Na Figura 62 é apresentado o nível A.3.2.1, este nível corresponde a preparação da bancada experimental na qual é realizado os experimentos que permitem parametrizar as gotas de chuva e avaliar se suas respectivas características correspondentes aos valores da chuva natural. Este nível é composto por cinco atividades:

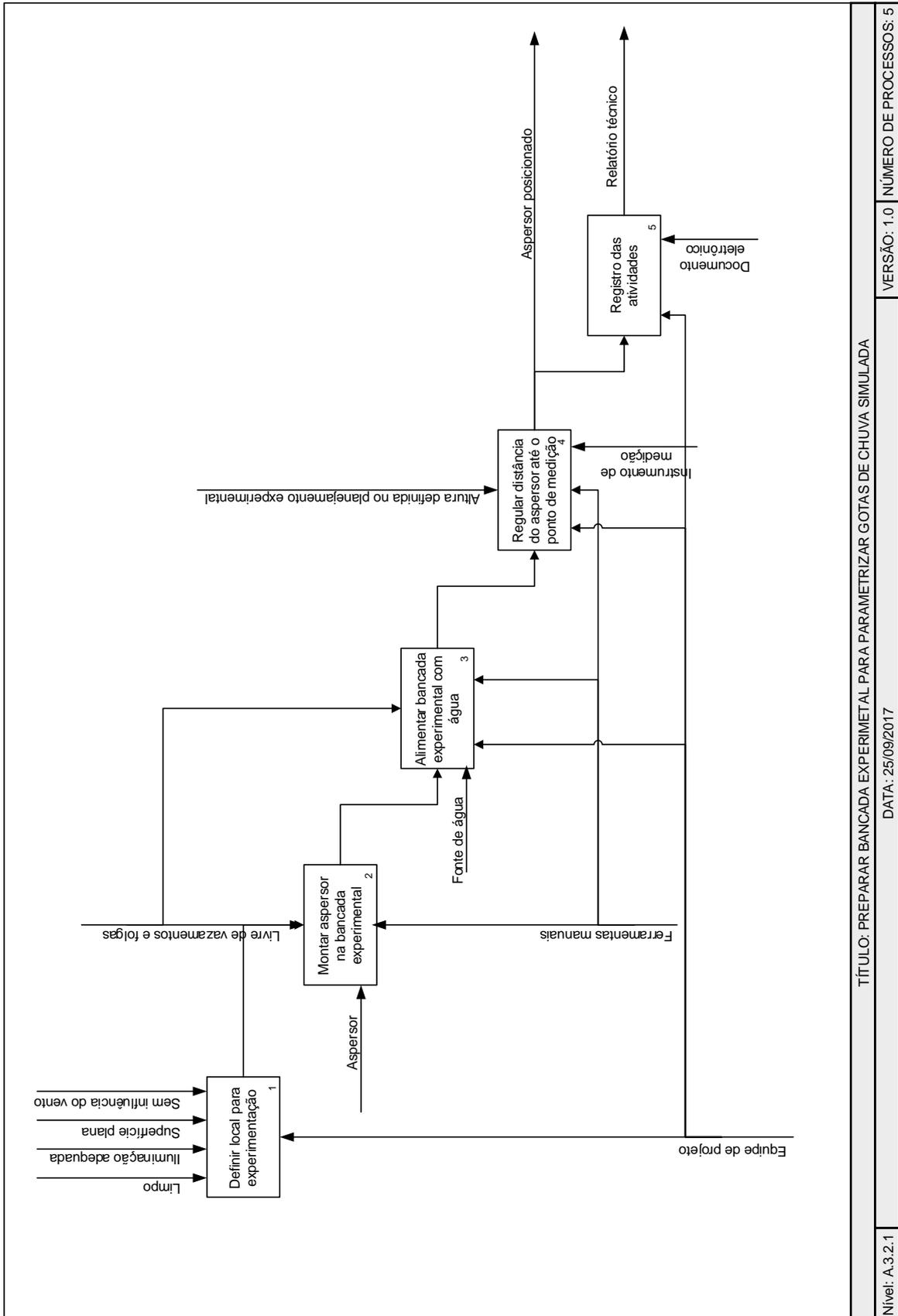
- A.3.2.1.1 – Definir local para experimentação: a equipe de projeto deve observar as condições de limpeza, iluminação, planicidade da superfície e a influência das condições climáticas (vento, sol, chuva natural);
- A.3.2.1.2 – Montar aspersor na bancada experimental: a equipe de projeto realiza a montagem do aspersor observando a presença de vazamentos ou folgas no sistema. Para isso utiliza ferramentas manuais de apoio;
- A.3.2.1.3 – Alimentar bancada experimental com água: a equipe de projeto utiliza a fonte de água selecionada para alimentar a bancada, sendo observado a presença de vazamentos e folga na montagem dos componentes;
- A.3.2.1.4 – Regular distância do aspersor até o ponto de medição: a equipe de projeto utiliza as informações definidas no planejamento experimental para regular a distância (altura) do aspersor até o ponto onde é montado o equipamento para realizar a coleta dos dados;
- A.3.2.1.5 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições aprendidas nesta fase.

Na Figura 63 é apresentado o nível A.3.2.2. Este nível corresponde a coleta dos dados referente aos parâmetros das gotas de chuva simulada gerada. Neste processo a equipe de projeto realiza os experimentos que permitem coletar as informações referente ao diâmetro das gotas, velocidade de queda, intensidade da precipitação gerada e energia cinética. Este nível é composto por onze atividades:

- A.3.2.2.1 – Configurar método de medição; a equipe de projeto por meio do planejamento experimental configura o método para realizar as medições;

- A.3.2.2.2 – Gerar chuva simulada preliminar: a equipe de projeto realiza uma chuva preliminar com o objetivo de calibrar o método de medição e verificar a necessidade de ajustes ou substituição do método;
- A.3.2.2.3 – Gerar chuva simulada: a equipe de projeto por meio do planejamento experimental inicia o processo de geração de chuva simulada para coleta dos dados;
- A.3.2.2.4 – Coletar dados (diâmetro das gotas): a equipe de projeto realiza a medição e anotação dos valores dos diâmetros das gotas;
- A.3.2.2.5 – Coletar dados (velocidade de queda das gotas): a equipe de projeto realiza medição e anotação dos valores de velocidade de queda das gotas;
- A.3.2.2.6 – Coletar dados (energia cinética): a equipe de projeto realiza a medição e anotação dos valores de energia cinética da chuva simulada;
- A.3.2.2.7 – Coletar dados (intensidade da precipitação): a equipe de projeto realiza a medição e anotação dos valores da intensidade da chuva simulada;
- A.3.2.2.8 – Organizar dados: a equipe de projeto realiza a organização dos dados coletados em planilhas eletrônicas;
- A.3.2.2.9 – Analisar dados: a equipe de projeto realiza a análise dos dados coletados, verificando se necessário a aplicação de análises estatísticas, verificando com as informações dos requisitos de projeto do simulador de chuva;
- A.3.2.2.10 – Registro das atividades: A equipe de projeto elabora um relatório técnico com o objetivo de deixar registrado todas as informações e lições apreendidas nesta fase.
- A.3.2.2.11 – Apresentar características das gotas: a equipe de projeto realiza a apresentação formal dos resultados para as pessoas interessadas no projeto.

Figura 62 - Processo nível A.3.2.1 – Preparar bancada experimental para parametrizar as gotas de chuva simulada gerada.



TÍTULO: PREPARAR BANCADA EXPERIMENTAL PARA PARAMETRIZAR GOTAS DE CHUVA SIMULADA

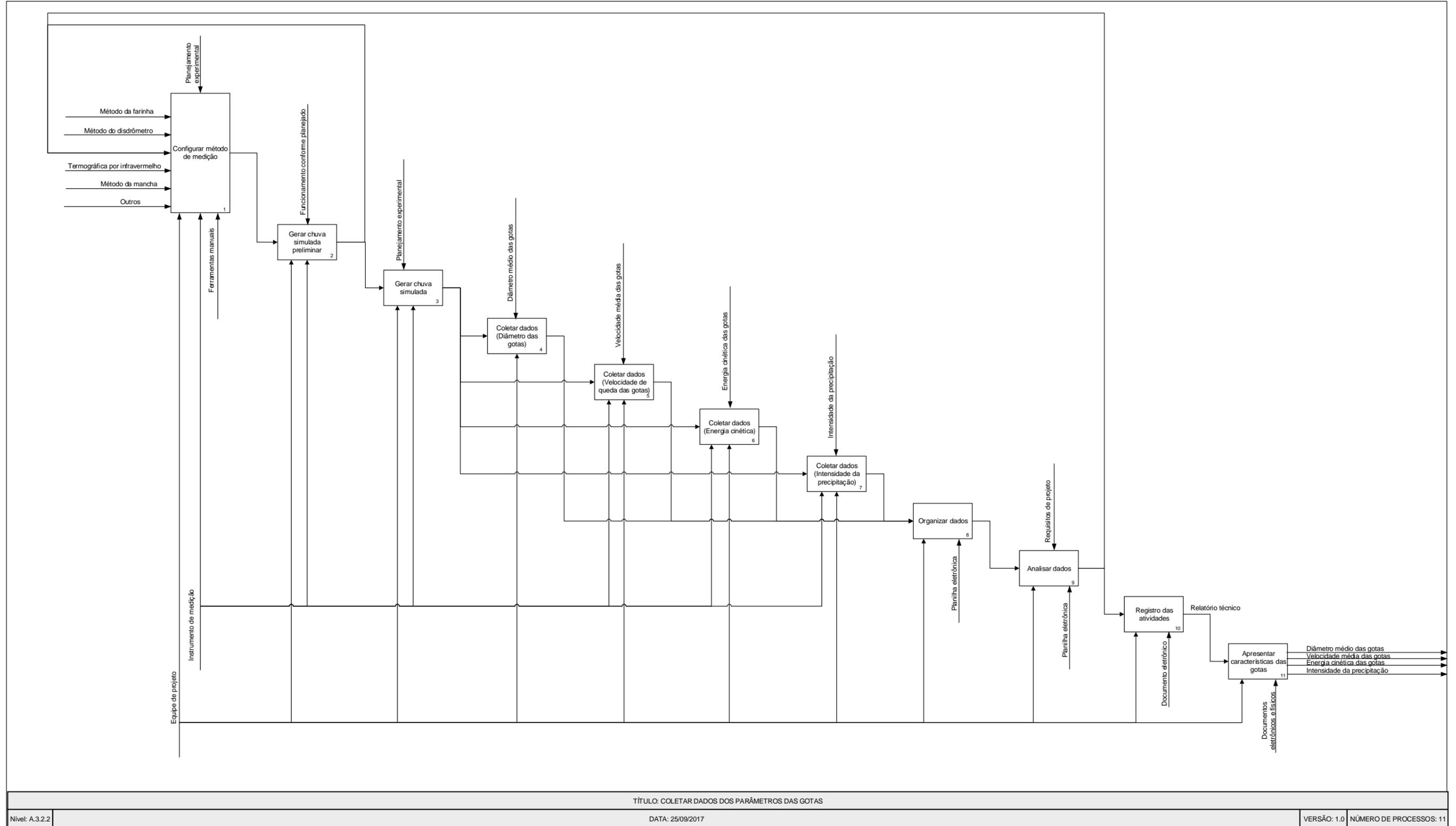
DATA: 25/09/2017

VERSÃO: 1.0 NÚMERO DE PROCESSOS: 5

Nível: A.3.2.1

Fonte: Autor.

Figura 63 - Processo nível A.3.2.2 – Coletar dados dos parâmetros das gotas.



Fonte: Autor.

4.3 CONSIDERAÇÕES SOBRE O MODELO PROPOSTO

Em projetos de simuladores de chuva, o projetista está diante de diversas incertezas, e a que merece maior destaque é com relação a definição do mecanismo formador de gotas, visto que, ele é o componente responsável por gerar gotas de água com as características o mais próximo de uma chuva natural. O que vem se observando nos trabalhos publicados, é que muitos projetistas utilizam princípios de solução já testados e validados em outros projetos de simuladores de chuva, porém estes princípios foram calibrados e validados para situações de experimentos específicos, o que de certa forma não garantem que eles vão apresentar o mesmo desempenho em outras condições experimentais.

Como foi amplamente discutido no “*Internacional Rainfall Simulator Workshop*” em 2011 na Alemanha, os pesquisadores relataram a dificuldade de padronização, tanto nos projetos de simuladores de chuva, quanto nos procedimentos de calibração e de estudos utilizando os simuladores de chuva, o que de certa forma, dificulta a comparação dos resultados obtidos por diferentes pesquisadores.

Neste sentido, como já apresentado no item 2.2 – Formalização de procedimentos para estudos com simuladores de chuva, houve propostas de desenvolver um procedimento. Silva e Silveira Neto (2006) propõem uma bancada experimental para estudos de sistemas aspersores do tipo jato-placa, porém sua proposta está focada na bancada, e delimitada a um tipo específico de aspersor. É utilizada a técnica de gravação de imagem de alta velocidade, o que permite capturar os aspectos físicos da gota em imagem real, entretanto esta proposta não contempla a análise de uniformidade do aspersor em estudo. Os autores também não buscam a adoção de um método de representação do processo.

Já Kibet et al. (2014), propõe um conjunto de procedimentos no qual ele denomina de protocolo de estudos de erosão dos solos utilizando simuladores de chuva. Este modelo busca propor padronização no método de estudos de erosão dos solos, apresentando aspectos que devem ser considerados, desde como coletar e preparar as amostras de solo, padronização nos tamanhos das caixas para colocar as amostras de solo até a seleção do aspersor e operação do

simulador de chuva. Este modelo é organizado na forma de tópicos, sem a adoção de um modelo de representação gráfico para o processo, onde muitas vezes as informações são pouco detalhadas, como por exemplo, na preparação do simulador de chuva. O modelo não detalha a seleção do mecanismo aspersor, propondo apenas que este seja selecionado em virtude do catálogo técnico do fabricante em função da vazão desejada.

Neste sentido, para o objetivo da tese, primeiramente buscou-se conhecer o fenômeno de geração de chuva simulada, sendo que para isso foi realizado a etapa de análise experimental, que permitiu identificar diversos parâmetros que até então demonstravam-se intrínsecos nos trabalhos que abordam projetos de simuladores de chuva. Com isso o conhecimento gerado nesta fase, auxiliou na composição da proposta de modelo para o processo de qualificação de pontas aspersoras em projetos de simuladores de chuva.

O propósito da modelagem é criar uma representação do processo de maneira completa e precisa sobre seu funcionamento. A modelagem de um processo pode ser a representação atual do processo, também conhecido como “*AS-IS*” (estado atual) ou então a representação futura e melhorada, “*TO-BE*” (estado futuro).

No entanto, poucos processos têm sido formalmente desenhados nas organizações, onde, na maioria dos casos simplesmente evolui com o tempo para entregar produtos, serviços ou resultados específicos, sendo que essa evolução é normalmente baseada na necessidade de concluir o trabalho. Com isso, apesar de ser operacionalmente bem-sucedida, a maioria dos processos modelados são menos otimizados e detalhados do que poderiam ser (ABPMP, 2013).

Desta forma, buscando a adoção de uma representação de modelagem de processo, os estudos a respeito dessa temática demonstraram a importância da adoção de um modelo para representar o processo que se busca formalizar. Com isso, foi utilizado o método do IDEF0 que consiste numa representação gráfica de blocos organizados de uma forma clara e sistemática, contendo entradas, mecanismos, controles e saídas.

Retomando a questão de pesquisa identificada e comparando com a proposta de modelo, verifica-se que o processo formalizado explicita as etapas necessárias para qualificar um sistema aspersor a ser utilizado em simuladores

de chuva. O modelo tem sua representação macro, ou seja, foi realizado a representação da árvore de nós contando seus respectivos níveis apresentado na Figura 64.

Em virtude do nível de informação sistematizada e detalhada no modelo, sendo este composto por 59 atividades a serem desenvolvidas, a representação passa a ser o modelo de referência atual (*AS-IS*), quando se trata de qualificação de sistemas aspersores para simuladores de chuva.

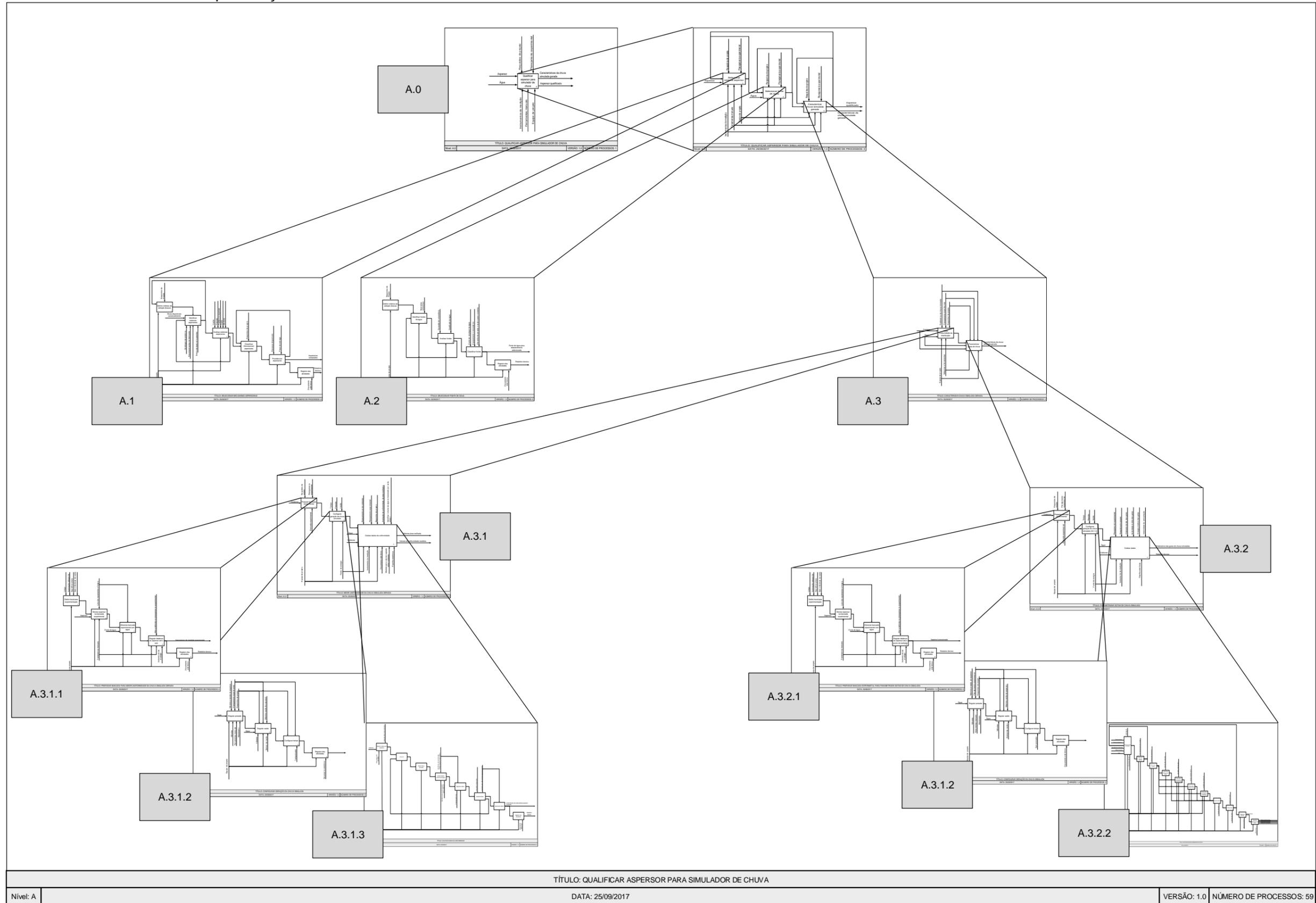
O modelo contempla aspectos fundamentais para qualificar sistemas aspersores para simuladores de chuva, sendo que inicialmente o usuário busca selecionar um ou mais sistemas aspersores que serão submetidos ao processo de qualificação. A identificação dos aspersores é baseada nos requisitos definidos pela equipe de projeto em conjunto com a consulta em material técnico ou recomendações dos fabricantes.

Outro aspecto fundamental destacado no modelo é a seleção da fonte de água a ser utilizada para realização dos experimentos, sendo que o usuário deve considerar as restrições ambientais buscando o reaproveitamento dos recursos hídricos.

Não menos importante, a caracterização da chuva simulada gerada também é destacada no modelo, sendo esta compreendida pela análise da uniformidade e pela parametrização das gotas. Nesta etapa o usuário por meio da experimental verifica os índices de uniformidade e as características das gotas, tamanho, velocidade e energia cinética. Para determinação da uniformidade, fica a critério do usuário determinar qual será o parâmetro de referência (CUC, CUE, CUD, etc.) bem como quais serão as alturas e pressões a serem verificadas.

O modelo busca ser uma referência no processo de qualificação de aspersores para simuladores de chuva, e a modelagem utilizando o IDEF0 permite um processo dinâmico e flexível tanto nos mecanismos quanto nas ferramentas a serem utilizadas.

Figura 64 - Visão macro do modelo de qualificação.



Fonte: Autor.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise experimental permitiu coletar o volume para as diferentes chuvas simuladas geradas e por meio do cálculo do CUC foi possível determinar a uniformidade da área molhada para cada uma das combinações determinadas.

Verificou-se que para a área de 0,36 m², onze combinações foram classificadas com uniformidade boa ou excelente, ou seja, apresentam uniformidade da área maior que 80%, já para a área de 1 m², seis combinações foram classificadas com os mesmos índices. Com isso a menor área permite a equipe de projeto uma maior faixa de combinações e altura e pressão para ser utilizado no projeto de um simulador de chuva. Porém, se a equipe de projeto optar por utilizar na concepção do simulador de chuva uma configuração que demanda mais um aspersor simultâneo, será necessário a utilização de um número maior de aspersores tendendo a aumentar o custo e a complexidade do simulador de chuva.

A utilização do disdrômetro permitiu realizar a medição dos parâmetros importantes que caracterizam uma gota (diâmetro, velocidade, intensidade e energia cinética). Com isso, verificou-se que, os dados medidos dos aspersores P1, P2 e P3 das diferentes combinações adotadas e comparados com as equações de Brow e Foster (1987) e Van Dijk et al. (2002) apresentam valores de energia cinética diferentes das chuvas naturais para os mesmos valores de intensidade.

Desta forma, por mais que um aspersor apresente excelentes índices de uniformidade isso não é garantia de que o mesmo gera gotas similares de uma chuva natural. Os aspersores P1, P2 e P3 são parcialmente qualificados para serem utilizados em simuladores de chuva.

A realização da análise experimental antes da elaboração do modelo permitiu a geração de conhecimento a respeito do processo de geração de chuva simulada, bem como a identificação e explicitação dos parâmetros que fazem parte deste cenário (mecanismos, controles, entradas e saídas).

A utilização da modelagem como meio para a melhoria do processo de qualificação de aspersores para simuladores de chuva, permitiu chegar a um resultado satisfatório no que se refere a formalização do processo.

Neste sentido, a forma desenvolvida de representação do modelo para o processo de qualificação de aspersores para simuladores de chuva, atendendo aos princípios definidos pelo IDEF0, contribuiu decisivamente para o grau de estruturação necessário, e funcionou como instrumento para a organização e sistematização dos conhecimentos envolvidos, estabelecendo uma visão detalhada do processo.

Como sugestão de possíveis trabalhos futuros, pode-se apontar:

- Analisar a viabilidade técnica e econômica da utilização de simulação computacional de fluídos como uma ferramenta de apoio na qualificação de pontas aspersoras;
- Compilar a modelagem do processo de qualificação de pontas aspersoras para um programa computacional e até mesmo em um aplicativo para smartphone;
- Utilizar o processo modelado para realizar a qualificação de aspersores utilizados atualmente em simuladores de chuva.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABRANTES, J. R. C. B.; LIMA, J. L. M. P. de; MONTENEGRO, A. A. A. Desempenho da modelagem cinemática do escoamento superficial para chuvas intermitentes em solos com cobertura morta. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v.19, n.2, p.166-172, Feb. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-3662015000200166&lng=en&nrm=iso> Acessado em: 28 Mar.2016. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n2p166-172>.
- ALBRIGHT, R.; KAPPEL, T. Roadmapping in the corporation. **Research Technology Management**. v.42, n.2, p.31-40, 2003.
- ALENCAR, P. C. D. de. **Avaliação experimental do concreto poroso na atenuação do escoamento superficial em parcelas urbanizadas**. 2013. 193 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) Universidade de Brasília, Brasília, 2013.
- ALVES SOBRINHO, T. **Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil**. 1997. 85 f. (Tese Doutorado) Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1997.
- ALVES SOBRINHO, T.; FERREIRA, P. A.; PRUSKI, F. F. Desenvolvimento de um infiltrômetro de aspersão portátil. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v. 6. n. 2. p. 337-344, 2002.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. ANSI/ASAE S436,1: **Test Procedure for Determining the Uniformity of Water Distribution of Center Pivot and Lateral Move Irrigation Machines Equipped with Spray or Sprinkler Nozzles**. St. Joseph, 1989. 8p.
- AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL & BIOLOGICAL ENGINEERS – ASABE. S572.1. 2009. **Spray Nozzle Classification by Droplet Spectra**. St. Joseph, MI., 4p.
- ANTONELLO, M. G. **Proposta de metodologia para o projeto de motores de combustão interna**. 2015. 179 f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria.
- AOKI, A. M.; SERENO, R. Evaluación de la infiltración como indicador de calidad de suelo mediante um microsimulador de lluvias. 2006. **Agriscientia**. Vol. XXIII. Pg. 23-31.
- ARAQUAM, W. W. C.; CAMPECHE, L. F. S. M. Avaliação da uniformidade de aplicação de água em sistemas de irrigação do perímetro irrigado. 2012. **Revista Semiárido de Visu**, Petrolina, v. 2, n. 3, p. 303-316.

ASAE. **Field Evaluation of Microirrigation Systems**. St. Joseph, p. 792-797. 1996.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 14244: **Equipamentos de irrigação mecanizada Pivô central e lateral móvel providos de emissores fixos ou rotativos - Determinação da uniformidade de distribuição de água**. Rio de Janeiro, 1998. 11 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 11545: **Equipamentos de irrigação agrícola - Máquinas de irrigação pivô central e linear móvel, equipadas com sprayers ou aspersores - Determinação da uniformidade de distribuição de água**. Rio de Janeiro, 2009. 17p.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE DEFESA VEGTAL - ANDEF. **Manual de tecnologia de aplicação de produtos fitossanitários**. Editora Linea Creativa. Campinas, São Paulo. 2010. 52p.

ASSOCIATION OF BUSINESS PROCESS MANAGEMENT PROFESSIONALS – ABPMP. **Guia para o gerenciamento de processos de negócio**. (ABPMP BPM CBOK – 1ª Edição). St. Paul, MN. 2013. 453 p.

BACK, N. **Metodologia de Projeto de Produtos Industriais**. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1983.346 p.

BACK, N.; OGLIARI, A.; DIAS, A.; SILVA, J. C. da. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri: Manole, 2008. 601 p.

BARBALHO, S. C. M.; ROZENFELD, H. Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de produtos mecatrônicos (MRM): validação e resultados de uso. **Gestão e Produção**, São Carlos , v. 20, n. 1, p. 162-179, Mar. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0104-530X2013000100012&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 17 Nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0104-530X2013000100012>.

BARROS, G. A. KGF Indústria e Comércio de bicos para pulverização agrícola LTDA. **Patente**: MU 9101260-0 U2. IntCL: B05B 1/10. Junho. 2011.

BASTIANI, M. L. R. et al. Influência de chuva simulada após aplicação de herbicidas em pós-emergência, sobre o controle de plantas daninhas, em solo com dois níveis de umidade. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 18, n. 1, 2000. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-83582000000100006&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 19 Nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582000000100006>.

BENAMI, A.; HORE, F.R. A new irrigation-sprinkler distribution coefficient. Transactions of the ASAE, **Saint Joseph**, v.7, n.2, p.157-158, 1964.

BERGAMO, R. L. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas para empresas de pequeno e médio porte**. 2014. 303 f. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria.

BERGAMO, R. L.; ROMANO, L. N. Agricultural Machinery And Implements Design Process: Guidelines For Small And Mid-Sized Businesses. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 36, n. 1, p. 206-216, Fev. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162016000100206&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 14 Ago. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agric.v36n1p206-216/2016>.

BERTOL, I.; BERTOL, C.; BARBOSA, F. T. Simulador de chuva tipo empuxo com braços movidos hidráulicamente: fabricação e calibração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, p. 1905-1910, Dezembro 2012. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600024>.

BOLMAN, B. R.; PAULSEN, G. Spraying Systems Co. Multiple discharge orifice spray nozzle. Estados Unidos. **Patente**: US 2007/0069047 A1. IntCL: B05B 7/06; B05B 1/26; B05B 1/14; B05B 1/00. Março. 2007.

BORSSOI, A. L.; BOAS, M. A. V.; REISDORFER, M.; HERNANDEZ, R. H.; FOLLADOR, F. A. C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, p. 718-726, Ago. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162012000400011&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 18 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000400011>.

BRANDAO, V. S.; SILVA, D. D.; RUIZ, H. A.; PRUSKI, F. F.; SCHAEFER, C. E. G. R.; MARTINEZ, M. A.; SILVA, E. O. Perdas de solo e caracterização física e micromorfológica de crostas formadas em solos sob chuva simulada. **Engenharia Agrícola**. Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 129-138, Abr. 2007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162007000100006&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 25 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162007000100006>.

BRANDELERO, E. M.; MODOLO, A. J. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Simulador de chuva, erosão e deslizamento de solos portátil. Brasil. **Patente**: BR 10 2015 009204 0 A2. IntCL: E02B 1/00; G01N 33/24; G09B 25/06. Abril. 2015.

BROWN, L.C., FOSTER, G.R. **Storm erosivity using idealized intensity distributions**. 1987. Trans. Am. Soc. Agric. Eng. 30, 379–386. DOI: <http://dx.doi.org/10.13031/2013.31957>.

CARVALHO JÚNIOR, J. A.; LACAVALA, P. T.; SOUZA, E. J. J.; SOUZA, F. D. A.; HAYASHI, T. C.; VERAS, C. A. G.; SILVA, A. M. **Combustão industrial**. Salvador, Bahia, 2011. 185p.

CARVALHO, D. F.; SOUZA, W. J.; PINTO, M. F.; OLIVEIRA, J. R.; GUERRA, J. G. M. Perdas de água e solo sob diferentes padrões de chuva simulada e condições de cobertura do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 32, n. 4, Aug. 2012. Disponível em:

<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-69162012000400010&lng=en&nrm=iso>. Acesso em: 20 Ago. 2014.
<http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000400010>.

CARVALHO, D. F.; MONTEBELLER, C. A.; FRANCO, E. M.; CEDDIA, M. B.; LANA, A. M. Q. Perdas de solo e água em um Argissolo Vermelho Amarelo, submetido a diferentes intensidades de chuva simulada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 6, n. 3, p. 385-389, 2012.

CARVALHO, M. F.; TARQUI, J. L. Z.; SILVA, V. S.; LOBO, B. R. H. Avaliação do funcionamento de um simulador de chuva pelo método da farinha. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, n. 3, p.115-124, 2012.

CHEVONE, B.I.; YANG, Y. S.; WINNER, W. E.; STORKS-COTTER, I.; LONG, S. J. A Rainfall Simulator for Laboratory Use in Acidic Precipitation Studies. 1984. **Journal of the Air Pollution Control Association**, 34:4, 355-359. Disponível em: <<http://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/00022470.1984.10465755>> Acessado em: 28 Mar. 2016. DOI: 10.1080/00022470.1984.10465755.

CHRISTIANSEN, J.E. **Irrigation by sprinkling**. Berkeley: California Agricultural Station. 1942. 124p.

CHRISTOFOLETTI, J. C. **Considerações sobre a deriva nas pulverizações agrícolas e seu controle**. São Paulo: Teejet South América, 15 p. 1999.

COLARES, M. F. B. **Caracterização da chuva simulada em túnel de vento por diferentes métodos**. 2016. 70 p. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, Lavras.

CONAB – Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira de Grãos. Safra 2015/16**. Fevereiro de 2016. Disponível em: <http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_03_14_09_29_08_revista_fevereiro_2016_-_versao_final_internet.pdf> Acessado em: 28 nov. 2016. ISSN 2317-7535.

CRIDDLE, W.D.; DAVIS, S.; PAIR, C.H.; SHOCKLEY, D.G. **Methods for evaluating irrigation systems**. Washington DC: Soil Conservation Service - USDA, 1956. 24p. Agricultural Handbook.

CUNHA, F. F.; ALENCAR, C. A. B.; VICENTE, M. R.; BATISTA, R. O.; SOUZA, J. A. R. Comparação de equações para cálculo da uniformidade de aplicação de água para diferentes sistemas de irrigação. **Engenharia na Agricultura**. Viçosa – MG, v.17. n.5. p. 404-417. 2009.

DE MARIA, I. C. Cálculo da erosividade da chuva. In: **INSTITUTO AGRÔNOMO DE CAMPINAS**. Manual de programas de processamento de dados de campo e de laboratório para fins de experimentação em conservação do solo. Campinas: IAC-SCS, 1994.

DIAS, C. G.; ALMEIDA, R. B. de. Produção científica e produção tecnológica: transformando um trabalho científico em pedidos de patente. **Einstein**, São Paulo, v. 11, n. 1, p. 1-10, Mar. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1679-45082013000100003&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 09 Nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1679-45082013000100003>.

DIAS, M. A. P. **Administração de materiais: uma abordagem logística**. São Paulo: Atlas, 1993.

DOMBROWSKI, N.; JOHNS, W. R. The Aerodynamic Instability and Disintegration of Viscous Liquid Sheets. **Chemical Engineering Science**, vol. 18, 1963, pp. 203 – 214, Pergamon Press Ltd., Oxford. Printed in Great Britain.

DURÃES, M. F.; FILHO, J. A. P. C.; OLIVEIRA, V. A de. Water erosion vulnerability and sediment delivery rate in upper Iguazu river basin – Paraná. **RBRH**, Porto Alegre, 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2318-03312016005001104&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 28 nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/2318-0331.011616029>.

EMBRAPA. **Tecnologias de Produção de Soja – Região Central do Brasil**, 2014. Disponível em: <<http://www.cnpso.embrapa.br/producaosoja/exigencias.htm>> Acessado em: 28 nov. 2014.

FABRIMAR, **Aspersor spray Asfix AF4**. 2017. Disponível em: <<http://www.fabrimar.com.br/produto/aspersor-spray-asfix?linhas=195>> Acessado em: 24 Out. 2017.

FAGGION, F.; ANTUNIASSI, U. R. Ar na Aplicação. **Revista Cultivar**, p. 12 -15. 2003.

FALCÃO, S. C. **Avaliação da produção de sedimentos em áreas de diferentes escalas na Bacia Experimental do Riacho Gravatá, semi-árido Alagoano**. 2009. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió.

FAO – Food and Agriculture Organization. **Rainfall Simulators**. 2016. Disponível em: < <http://www.fao.org/docrep/t0848e/t0848e-11.htm#TopOfPage>> Acessado em: 13 de Out. de 2016.

FARIA, L. C.; BESKOW, S. COLOMBO, A.; OLIVEIRA, H. F. E. de. Modelagem dos efeitos do vento na uniformidade da irrigação por aspersão: aspersores de tamanho médio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 16, n. 2, p. 133-141, Fev. 2012. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662012000200002&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 20 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662012000200002>.

FARIA, L. C.; PRADO, G. COLOMBO, A. OLIVEIRA, H. F. E.; BESKOW, S. Simulação da distribuição de água em diferentes condições de vento e espaçamentos entre aspersores. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 17, n. 9, p. 918-925, Set. 2013. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662013000900002&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 18 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662013000900002>.

FERREIRA, D. J. L. **Velocidade e energia cinética da chuva de um emissor usado em pivô central**. 2010. 66 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Lavras, Minas Gerais, Lavras.

GONZÁLES, C. J. I. **Metodologia para mapeamento tecnológico de produtos auxiliado pelas tendências de evolução da TRIZ**. 2015. 234p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

GERHARDT, T. E.; SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. Porto Alegre: UFRGS, 2009. 120p.

GUIMARÃES, B. B.; LEAL, A. C. Simulador de chuvas, erosão e educação ambiental. **IN: Seminário internacional – questões do trabalho e da saúde do trabalhador**. Presidente Prudente, de 14 a 17 de maio de 2013.

HART, W.E. Overhead irrigation pattern parameters. *Transactions of the ASAE, Saint Joseph*, v.42, n.7, p.354-355, 1961.

HARUCH, J. Spraying Systems CO. **Desenho Industrial: US D484,411 S. IntCL; 09-07; D9/488; D9/439**. Outubro, 2002.

HUDSON, N. W. **The flour-pellet method for measuring the size of raindrops**. Harare, Zimbabwe: Department of Conservation, 1964.

IMIG, L. M.; SANTOS, C. G.; ROMANO, L. N. **Classificação dos sistemas geradores de gotas utilizados em simuladores de chuva**. In: 31ª Jornada Acadêmica Integrada - JAI, 2016, 2016, Santa Maria. Jornada Acadêmica Integrada, 2016.

INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL – INPI. **Inventando o futuro – Uma introdução às patentes para as pequenas e médias empresas**. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro. 2013. 68p.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. **Glossário**. 2016. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=home/page&page=glossario>> Acessado em: 13 de Outubro de 2016.

INTEGRATED DEFINITION METHODS – **IDEF**. IDEF0 METHOD REPORT. 2016. Disponível em: <<http://www.idef.com/downloads/>> Acessado: 25 nov. 2016.

JAYAWARDENA, A. W.; REZAUR, R. B. Drop size distribution and kinetic energy load of rainstorms in Hong Kong. **Hidrological Processes**, Sussex, v. 14, n. 6, p. 1069-1082, Apr. 2000.

KARMELI, D.; KELLER, J. **Trickle Irrigation Design**. Glendora: Rain Bird Manufacturing Corporation, 1975. 132p.

KIBET, L. C., SAPORITO, L. S., ALLEN, A. L., MAY, E. B., KLEINMAN, P. J., HASHEM, F. M., et al. **A Protocol for Conducting Rainfall Simulation to Study Soil Runoff**. J. Vis. Exp. (86), e51664, doi:10.3791/51664 (2014).

KOMORI, F. S. **Desenvolvimento de um simulador computacional de dinâmica de fluídos utilizando o método de lattice boltzmann**. 2012. 90p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

LACAVA, P. T.; ALVES, A.; OLIVEIRA, A. A. M.; CANCINO, L. R.; VERAS, C. A. G.; SILVA, L. F. F.; ORBEGOSO, E. M. M. **Combustão em turbinas a gás**. São José dos Campos, São Paulo, 2009. 195p.

LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 5º Ed. São Paulo, São Paulo: Atlas, 2003. 310p.

LAL, R. Drop size distribution and energy load of rain storms at Ibadan, western Nigeria. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 48, n. 1/2, p. 103-114, Set. 1998.

LEAL, F.; OLIVEIRA, M. L. M. de.; ALMEIDA, D. A. de.; MONTEVECHI, J. A. B.; MARINS, F. A. S. M.; MATOS, A. J. de M. Elaboração de Modelos Conceituais em Simulação Computacional Através de Adaptações na Técnica IDEF0: Uma Aplicação Prática. In: XXVII – ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Foz do Iguaçu, PR, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2007.

LEFEBVRE, A. H. **Atomization and Sprays**. Hemisphere. New York. 1989.

LIMA, C. A. de.; MONTENEGRO, A. A. de. A.; SANTOS, T. E. M dos.; ANDRADE, E. M. de.; MONTEIRO, A. L. N. Práticas agrícolas no cultivo da mandioca e suas relações com o escoamento superficial, perdas de solo e água. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 46, n. 4, p. 697-706, Dec. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1806-66902015000400697&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 28 nov. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.5935/1806-6690.20150056>.

LIMA, J. L. M. P. de.; LIMA, I. de.; MONTENEGRO, A.; ABRANTES, J. R. C. de B. Caracterização da distribuição do diâmetro de gotas de chuva: Utilização de termografia por infravermelhos. **XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste**. Natal, RN. Nov. 2014. DOI: 10.13140/2.1.5154.3360.

LIMA, L. M. B. **Modelagem de Informações para a fase de projeto informacional de produtos**. 2002. 219 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Florianópolis.

MANTOVANI, E. C. **AVALIA**: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MARQUES, V. S. **Erosão hídrica em microbacia utilizando geotecnologias**. 2013. 178p. Tese (Doutorado). Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Seropédica.

MARTINS, C. A. S.; REIS, E. F.; PASSOS, R. R.; GARCIA, G. O. Desempenho de sistemas de irrigação por aspersão convencional na cultura do milho (*Zea mays* L). **Idesia**, v. 29, n. 3, p. 65-74, Dez. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-34292011000300010&lng=es&nrm=iso>. Acessado em: 20 Out. 2016. DOI <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34292011000300010>.

MARTINS, P. E. S.; SILVA, E. R.; SANTANA, V. G.; ARAÚJO NETO, J. A.; ZANINI, J. R. Uniformidade de distribuição de água do microaspersor MC-20. **Revista de Ciências Agrárias**, Lisboa, v. 38, n. 1, p. 65-70, Mar. 2015. Disponível em: <http://www.scielo.mec.pt/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0871-018X2015000100010&lng=pt&nrm=iso>. Acessado em: 18 Out. 2016.

MATUO, T. **Técnicas de aplicação de defensivos agrícolas**. Jaboticabal. FUNEP, 1990. 139p.

MELO FILHO, M. S. de. **Uniformidade da irrigação por aspersão na cultura da cana-de-açúcar em dois estágios de desenvolvimento**. 2015. 50 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Recife.

MEYER, L. D.; HARMON, W. C. Multiple intensity simulator for erosion research on row sideslopes. **Transactions of the ASAE**, v. 1, p. 100-103, 1979.

MEYER, L. D.; McCUNE, D. L. Rainfall simulator for runoff plots. **Agriculture Engineering**, v. 34 p. 644-648, 1958.

MONTEBELLER, C. A.; CARVALHO, D. F.; SOBRINHO, T. A.; NUVES, A. C. S.; RUBIO, E. Avaliação hidráulica de um simulador de chuvas pendular. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 1-5, Abr. 2001. Disponível em:
<http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662001000100001&lng=pt&nrm=iso> Acessado em: 18 Out. 2016. DOI:
<http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662001000100001>.

MORIN, J.; GOLDBERG, D.; SEGNER, I. **A rainfall simulator with a rotating disk**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.10, p.74-79, 1967.

NARA, E. O. B.; MORAES, J. A. R.; KIPPER, L. M.; FURTADO, J. C.; SILVA, A. L. E.; ISERHARD, F. Z.; HOFFMANN, F. Sistema de codificação e sua relação com controle de projetos: Um estudo de caso. **Revista Exacta – EP**. São Paulo, v. 11, n. 2, p. 213-223, 2013.

NIST - NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY.
Standard for integration definition for function modeling (IDEF0). Gaithersburg, 1993. p.128. (Draft Federal Information Processing Standards Publication, 1983).

OLIVEIRA, C. S. D.; GOMIDE, H. A.; OLIVEIRA, S. A. G. **Relação funcionais de aspersores tipo spray usados em pivô central**. In: CONEM - Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2010, Natal – Rio Grande do Norte. CONEM 2000, 2000.

OLIVEIRA, J. N. D. de.; ROSA, L. C. da. Modelagem de processos IDEF: Modelo descritivo da cadeia produtiva do biodiesel. **Revista Gestão Industrial**, Ponta Grossa, PR, v. 06, n. 02, p. 159-174, 2010. Disponível em:
<<https://periodicos.utfpr.edu.br/revistagi/article/view/525>> Acessado em: 12 Jul. 2017. DOI: 10.3895/S1808-04482010000200009.

OLIVEIRA, J. R. **Perdas de solo, água e nutrientes em um Argissolo Vermelho-Amarelo, sob diferentes padrões de chuva simulada**. Seropédica: UFRRJ, 2007. 52p. Dissertação Mestrado.

OLIVEIRA, M. A. P. de. **Remoção pela chuva de diferentes formulações de flutriafol aplicada em soja, com e sem a adição de óleo mineral na calda**. 2009. 97f. (Tese Doutorado) Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita filho”, Botucatu, 2009.

OLIVEIRA, M. L. M. De. **Análise da Aplicabilidade da Técnica de Modelagem IDEF-SIM nas Etapas de um Projeto de Simulação a Eventos Discretos**. 2010. 168f. (Dissertação Mestrado) Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2010.

OLIVEIRA, Z. B.; CARLESSO, R.; MARTINS, D. J.; KNIES, A. E.; SANTA, C. D. Perdas de água por escoamento superficial a partir de diferentes intensidades de chuvas simuladas. **Irriga**, Botucatu, v. 18, n. 3, p. 415-425, Julho, 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.15809/irriga.2013v18n3p415>

ORTUYA, E. G. **Simulador de Lluvia, construcción y especificaciones**. Centro del agua para zonas áridas semiáridas de América Latina y El Caribe. Ministry of the Flemish Community Science and Innovation Administration. 2004. 12p.

OTT – PARSIVEL 2 – **Disdrômetro óptico multifuncional por laser de primeira classe**. 2017. Disponível em: <<http://www.ott.com/pt-la/productos/download/catalogo-disdrometro-optico-por-laser-ott-parsivel2/>> Acessado em: 16 Out. 2017.

PAES JUNIOR, N. S. **Avaliação do processo de infiltração da água no solo residual de biotita-bnaisse para superfícies com diferentes declividades utilizando lisímetros**. 2013. 101 f. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, São Paulo, Bauru.

PALL, R.; DICKINSON, W. T.; REALS, D.; MCGIRR, R. Development and calibration of a rainfall simulator. **Canadian Agricultural Engineering**. vol. 25. n. 2. f. 181-187, 1983.

PEDRINHO JUNIOR, A. F. F. et al. Momento da chuva após a aplicação e a eficácia dos herbicidas sulfosate e glyphosate aplicados em diferentes formulações. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 20, n. 1, Apr. 2002. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-83582002000100015&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 19 Nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582002000100015>.

PEUMAX – Bicos aspersores industriais. **Catálogo de produtos**. 2017. Disponível em: <<http://www.peumax.com.br/produtos/>> Acessado em: 03 Jan. 2017.

PRADO, G. do. Water distribution from medium-size sprinkler in solid set sprinkler systems. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 20, n. 3, p. 195-201, Mar. 2016. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662016000300195&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 18 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n3p195-201>.

PROJECT MANAGEMENT INSTITUTE - PMI. **Um guia do conhecimento em gerenciamento de projetos** (PMBOK Guide – 5ª Edição). Pennsylvania: Project management Institute, 2013.595p.

QUEST ORBIT. **Orbit intelligence**. Software. Versão 1.9.7. 2016. Disponível em: <<https://www.orbit.com/>> Acessado em: 25 nov. 2016.

RAMON, R.; MINELLA, J. P. G.; MERTEN, G. H.; BARROS, C. A. P. de; CANALE, T. Kinetic energy estimation by rainfall intensity and its usefulness in predicting hydrosedimentological variables in small rural catchment in southern Brazil. **Catena**. 2017. v.148; p. 176-184. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.07.015>.

REIS, S. S. **Influência da densidade e da altura de edificações na transformação de precipitação-escoamento utilizando chuva simulada em modelo reduzido de bacia hidrográfica urbana com diferentes declividades**. 2015. 91 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Alfenas, Minas Gerais, Poços de Caldas.

RIBEIRO, B. T. **Energia cinética de gotas de chuva simulada e energia ultra-sônica na desagregação de um cambissolo**. 2006. 76 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais.

ROCHA, E. M. M.; COSTA, R. N. T.; MAPURUNGA, S. M. S.; CASTRO, P. T. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 154-160, Ago. 1999. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43661999000200154&lng=pt&nrm=iso>. Acessado em 18 Out. 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n2p154-160>.

ROMANO, L. N. **Desenvolvimento de máquinas agrícolas: planejamento, projeto e produção**. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2013. 310p.

ROMANO, L. N. **Modelo de referência para o processo de desenvolvimento de máquinas agrícolas**. 2003. 266p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ROMANO, L. N.; BACK, N.; OGLIARI, A.; MARINI, V. K. An introduction to the reference model for the agricultural machinery development process. **Product: Management & Development**. v. 3, n. 2, dez, 2005.

ROTH, C. H.; HENKLAIN, J. C.; FARIAS, G. S. Avaliação do tamanho de gotas de chuva natural e simulada para o norte do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 9, p. 171-174, maio/ago. 1985.

SANGÜESA, C.; ARUMÍ, J.; PIZARRO, R.; LINK, O. A Rainfall Simulator for the in situ Study of Superficial Runoff and Soil Erosion. **Chilean Journal Agricultural Research**. Chile, v. 70, n. 1, p. 178-182, Mar. 2010. Disponível em: <http://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-58392010000100019&lng=es&nrm=iso>. Acessado em: 28 Mar. 2016. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-58392010000100019>.

- SANTOS, C. G. dos. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle Automático para Simulador de Chuva**. 2015. 142 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria.
- SANTOS, C. G. dos. **Diretrizes para o processo de qualificação de sistemas aspersores para simuladores de chuva**. 2016. 296 p. Qualificação de Doutorado (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, Santa Maria.
- SANTOS, J. Y. G. dos. **Avaliação das perdas de água e solo no semiárido paraibano mediante chuva simulada e modelagem hidrossedimentológica**. 2011. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana e Ambiental) – Universidade Federal da Paraíba, Paraíba, João Pessoa.
- SANTOS, T. E. M. **Avaliação de técnicas de conservação de água e solo na bacia experimental do semi-árido Pernambucano**. 2006. 69 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Pernambuco, Recife.
- SCHULTZ, G. **Introdução à gestão de organização**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2016. 159p.
- SILVA, M. B. da. **Estudo Experimental do Processo de Formação de Gotas em Aspersores Jato-Placa**. 2002. 192f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SILVA, M. B. da.; SILVEIRA NETO, A. S. Metodologia para estudo de sistemas aspersores comerciais. In: XXVI – ENEGEP – Encontro Nacional de Engenharia de Produção – Fortaleza, CE, Brasil, 9 a 11 de Outubro de 2006.
- SILVA, M. B. **Formação de gotas em aspersores**. São Paulo: Blucher Acadêmico, 2011. 146p.
- SOUZA, G. S. F. et al. Ação da chuva sobre a eficiência de Glyphosate no controle de *Eichhornia crassipes* e *Pistia stratiotes*. **Planta Daninha**, Viçosa, v. 29, n. 1, Mar. 2011. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-83582011000100007&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 19 Nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-83582011000100007>.
- SOUZA, S. F. J.; SIQUEIRA, E, Q. **Development and Calibration of a Rainfall Simulator for Urban Hydrology Research**. 12th International Conference on Urban Drainage. Porto Alegre-Brazil, 11-16 September. 2011.
- SPOHR, R. B. et al. Modelagem do escoamento superficial a partir das características físicas de alguns solos do Uruguai. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n. 1, Fev. 2009. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-84782009000100012&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 20 Ago. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782009000100012>.

SPRAYING SYSTEMS. **Industrial Hydraulic Spray products**. 2016. 219p. Catálogo. Disponível em :< <http://www.spray.com/cat75/hydraulic-m/index.html>> Acessado em: 25 nov. 2016.

SWANSON, N. P. **Rotating boom rainfall simulator**. Transactions of the ASAE, S1. Joseph, Mich., v.8, p. 71-72, 1965.

TAMAGI, J. T. **Variabilidade espacial da uniformidade da lâmina de água aplicada por sistemas fixos de irrigação por aspersão**. 2012. 128 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, Paraná, Cascavel.

TEEJET. **Catálogo 51-PT – Seleção**. 2011. 150p. Catálogo. Disponível em: <<http://teejet.it/portuguese/home/literature/catalogs/catalogo-51a-pt.aspx>> Acessado em: 25 nov. 2016.

TEEJET. **Guia do usuário para bicos de pulverização**. 2006. 56p. Catálogo. Disponível em: < <http://www.teejet.it/media/350060/lms112%20users%20guide%20portuguese.pdf>> Acessado em: 25 nov. 2016.

TUNDISI, J. G. Recursos hídricos no futuro: problemas e soluções. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-40142008000200002&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 28 nov. 2016. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-40142008000200002>.

VAN DIJK, A.I.J., BRUIJNZEEL, L., ROSEWELL, C. Rainfall intensity–kinetic energy relationships: a critical literature appraisal. J. 2002. **Hydrology**. 261, 1–23. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694\(02\)00020-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-1694(02)00020-3).

VERNADAT, F. D. **Enterprise Modeling and Integration: principles and applications**. London: Champan & Hall, 1996.

VOLK, L. B. da S.; COGO, N. P. Erosão hídrica, em três momentos da cultura do milho, influenciada por métodos de preparo do solo e semeadura. **Revista Brasileira Ciência dos Solo**, Viçosa, v. 38, n. 2, Abr. 2014. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-06832014000200021&lng=en&nrm=iso>. Acessado em: 25 Nov. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000200021>

WAGNER, C. S.; MASSAMBANI, O. Análise da relação intensidade de chuva energia cinética de Wischmeier & Smith e sua aplicabilidade à região de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 12, n. 3, p. 197-203, set./dez. 1988.

WILCOX, B. P.; WOOD, M. K.; TROMBLE, J. T.; WARD, T. J. A Hand-Portable Single Nozzle Rainfall Simulator Designed for Use on Steep Slopes. **Journal of Range Management**. Vol. 39, No. 4, pp. 375-377, 1986.

WILCOX, J.C.; SWAILES, G.E. Uniformity of water distribution by some under tree orchard sprinklers. **Scientific Agriculture**, v.27, n.11, p.565-583, 1947.

WILSON, T. G.; CORTIS, C.; MONTALDO, N.; ALBERTSON, J. D. Development and testing of a large, transportable rainfall simulator for plot-scale runoff and parameter estimation. **Hydrology and Earth System Sciences**. v.18, p. 4169-4183, Outubro 2014. DOI:10.5194/hess-18-4169-2014.

WISCHMEIER, W. H.; SMITH, D. D. Rainfall energy and its relationships to soil loss. **Transactions of the American Geophysical Union**, Washington, v. 39, n. 2, p. 285-291, 1958.

ANEXOS

ANEXO A – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS TEEJET

	Herbicidas				Fungicidas		Inseticidas	
	Incorporado ao Solo	Pré-Emergência	Pós-Emergência		Contato	Sistêmico	Contato	Sistêmico
			Contato	Sistêmico				
Jato Plano de Faixa Estendida			Excelente	Bom	Excelente	Bom	Excelente	Bom
Jato Plano de Faixa Estendida <i>a pressões abaixo de 2 bar</i>	Bom	Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom	Bom	Muito Bom
Jato Plano de Ângulo Grande com Pré-orifício			Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom	Muito Bom
Jato Plano de Ângulo Grande com Pré-orifício <i>a pressões abaixo de 2 bar</i>	Bom	Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Bom	Excelente
Jato Plano com Indução de Ar	Muito Bom	Muito Bom	Bom	Bom	Bom	Excelente	Bom	Excelente
Jato Plano Duplo			Excelente		Excelente		Excelente	
Jato Plano de Impacto de Ângulo Grande com Pré-orifício	Excelente	Excelente		Muito Bom				Muito Bom

ANEXO C – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS SPRAYING SYSTEMS PARA APLICAÇÕES ESPECIAIS

		HERBICIDAS			FUNGICIDAS		INSETICIDAS	
		PRÉ-EMERGÊNCIA	PÓS-EMERGÊNCIA		CONTATO	SISTÊMICO	CONTATO	SISTÊMICO
			CONTATO	SISTÊMICO				
EM FAIXA	 AI TeeJet⁺ UNIFORME Consulte a página 29	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE
	 TeeJet⁺ UNIFORME Consulte a página 31	BOM	MUITO BOM	BOM	MUITO BOM	BOM	MUITO BOM	BOM
	 TwinJet⁺ UNIFORME Consulte a página 32		EXCELENTE		EXCELENTE		EXCELENTE	
PULVERIZAÇÃO DIRIGIDA	 AI TeeJet⁺ UNIFORME Consulte a página 29	MUITO BOM	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE
	 TeeJet⁺ UNIFORME Consulte a página 31	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM	BOM
	 TwinJet⁺ UNIFORME Consulte a página 32		MUITO BOM		MUITO BOM		MUITO BOM	
	 AIUB TeeJet Consulte a página 33		BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE
	 AITX ConeJet Consulte a página 38		BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE
	 ConeJet Consulte a página 28 & 35		EXCELENTE		EXCELENTE		EXCELENTE	
	 ConeJet Consulte a página 36–37		EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM
JATO DE AR	 Disc-Core Consulte a página 40–41		EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM

ANEXO D – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS SPRAYING SYSTEMS PARA FERTILIZANTES LÍQUIDOS

	ÁREA TOTAL	DIRIGIDO
 <p>StreamJet (7-ORIFÍCIOS) Consulte a página 43</p>	EXCELENTE	MUITO BOM
 <p>StreamJet (3-ORIFÍCIOS) Consulte a página 42</p>	MUITO BOM	EXCELENTE
 <p>StreamJet (ÚNICO-ORIFÍCIOS) Consulte a página 45</p>		EXCELENTE
 <p>CP4916 (PLACA DE ORIFÍCIO) Consulte a página 44</p>		EXCELENTE
 <p>TP TeeJet (GRANDE CAPACIDADE) Consulte a página 12</p>	MUITO BOM	
 <p>AI TeeJet AIC TeeJet (BAIXO VOLUME) Consulte a páginas 7-8</p>	MUITO BOM	
 <p>AIUB TeeJet (BAIXO VOLUME) Consulte a página 33</p>		MUITO BOM
 <p>Turbo TeeJet Induction Consulte a página 9</p>	EXCELENTE	
 <p>Turbo FloodJet Consulte a página 19</p>	EXCELENTE	
 <p>QCTF Turbo FloodJet Consulte a página 21</p>	EXCELENTE	

ANEXO E – QUADRO DE SELEÇÃO DE PONTAS ASPERSORAS JACTO

Bicos		Herbicidas				Fungicidas		Inseticidas		Fertilizante Líquido
		Incorporados	Pré-Emergentes	Pós-Emergentes Contato	Pós-Emergentes Sistêmicos	Contato	Sistêmicos	Contato	Sistêmicos	
 AXI	 UF			EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	
 AXI pressões inferiores a 10 bar/psi ²	 UF pressões inferiores a 10 bar/psi ²			BOM	MUITO BOM	BOM	MUITO BOM	BOM	MUITO BOM	
 API	 SF			EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	
 ADI	 LD	BOM	BOM	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	
 DEF	 APM	EXCELENTE	EXCELENTE	BOM	MUITO BOM		MUITO BOM		MUITO BOM	
 EF			BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE		
 AXI TWIN	 SF TWIN			EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	
 AVI TWIN	 BJ TWIN	EXCELENTE	EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	
 HC	 JA					EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	
 DISC E CDRE	 J					EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	
 ATR						EXCELENTE	MUITO BOM	EXCELENTE	MUITO BOM	
 TVI				BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	
 AVI	 BJ	EXCELENTE	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	
 CVI		EXCELENTE	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	
 MVI		EXCELENTE	EXCELENTE	BOM	MUITO BOM		MUITO BOM		MUITO BOM	
 ESI jato sólido										EXCELENTE
 AVI OC leque descentralizado		EXCELENTE	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	
 OCI leque descentralizado				EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	EXCELENTE	BOM	

ANEXO F – CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DO DISDRÔMETRO OTT PARSIVEL.



Software de usuario OTT ASDO

El cómodo software de operación y de observación OTT ASDO está disponible en dos variantes:

- Versión básica para configurar todos los parámetros del sistema durante la puesta en servicio así como para el registro online y la visualización de los datos (incluido en el suministro)
- Versión completa con base de datos integrada para el servicio online automatizado y cómodo. Con la ayuda del software se guardan en un ordenador los valores de medición de forma controlada por intervalos de tiempo.



Características técnicas

Sensor óptico, diodo láser

- Longitud de onda: 780 nm, potencia de salida: 0,5 mW
- Clase de láser: 1 (21 CFR 1040.10 y 1040.11) 1 (IEC/EN 60825-1 A2:2001)

Superficie de medición

180 x 30 mm (54 cm²)

180 x 30 mm (54 cm²)

Márgenes de medición

- Tamaño de las partículas: precipitación líquida: 0,2 ... 5 mm precipitación sólida: 0,2 ... 25 mm
- Velocidad de las partículas: 0,2 ... 20 m/s

Clasificación

- 32 clases de tamaño y 32 clases de velocidad
- Precisión de medición¹⁾: ± 1 Clase de tamaño (0,2 ... 2 mm) ± 0,5 Clase de tamaño (> 2 mm)

Clases de precipitaciones

8 clases de precipitaciones (lluvia fina, lluvia, lluvia, aguanieve, nieve, granizo con un diámetro de grano de 1 mm, granizo y granizo menudo)

Distinción de las clases de precipitación

Lluvia fina, lluvia, granizo, nieve > 97% (en comparación con el observador meteorológico)

Intensidad de precipitación

- 0,001 ... 1.200 mm/h
- Precisión cantidad de precipitación¹⁾ ±5% (líquida) / ±20% (sólida)
- Energía cinética 0,001 ... 30 kJ
- Salidas del código de tiempo WMO 4680/4677 (SYNOP), 4678 (METAR/SPEC) y tablas de NWS

Visibilidad con precipitación (MOR)

- 100 ... 5.000 m; ± 10%

Reflectividad de radar (Z)

- 9,9 ... 99 dB de reflectividad; ±20%

Intervalo de medición

De 10 segundos a 60 minutos

Tensión de alimentación

- Electrónica: 10 ... 28 V CC
- Calefacción: 12/24 V CC

Intensidad absorbida

- Electrónica: 1,5 W (60 mA@24 V CC)
- Calefacción: 50/100 W (4A@12/24 V CC)

Protección contra sobretensiones

EN 61000-4-2/4/5/6 (4 kV y 10 V/m), para cables de suministro de corriente y circuitos de interfaz integrados

Protección

IP 65

Interfaces (configurables)¹⁾

- RS-485 para todos los valores incluidos los datos espectrales (1.200 ... 57.600 baudios)
- SDI-12 para valores calculados
- Salida de relé opto-electrónico, sin rebote, para salida de impulsos de la cantidad de precipitación: 0,1 mm (2 Hz)/0,01 mm (20 Hz) Voltaje: máx. 28 V CC Corriente: máx. 120 mA, resistente al cortocircuito
- USB 2.0 para la conexión al PC (configuración y servicio)

Material

Aluminio resistente al agua de mar

Peso

6,4 kg

Dimensiones (altura x anchura x profundidad)

670 x 600 x 114 mm

Condiciones ambientales

- - 40 ... +70 °C
- 0 ... 100% humedad relativa del aire

Montaje

Tubo de 2 pulgadas, Ø 50 - 62 mm

CEM / IEM

- EN 61000-4-3, conforme CE
- EN 55022 clase B, conforme CE

ANEXO G – QUADRO DE DESEMPENHO DAS PONTAS B1/4 HH-SS 14.5SQ E B1/8 HH-SS 3.6SQ

DESEMPENHO

*Pressão expressa em bar.

Conexão de Entrada (pol.)	Tipo do Bico				Capacidade	Diâmetro do Orifício (mm)	Diâmetro Máximo de Passagem Livre (mm)	Vazão (litros por minuto)*										Ângulo de Pulverização (°)*		
	G-SQ	GG-SQ	HH-SQ	H-SQ				0.4	0.5	0.7	1.5	2	3	4	6	7	10	0.5	1.5	6
1/8	●	●	●		3.6SQ	1.6	1.3	1.1	1.2	1.4	1.9	2.2	2.7	3.1	3.7	4.0	4.7	40	52	47
	●	●	●		4.8SQ	1.9	1.3	1.4	1.6	1.8	2.6	3.0	3.6	4.1	4.9	5.3	6.2	48	63	57
	●	●	●		6SQ	2.4	1.3	1.8	2.0	2.3	3.2	3.7	4.5	5.1	6.1	6.6	7.8	60	66	60
1/4	●	●	●		10SQ	2.8	1.6	2.9	3.3	3.8	5.4	6.2	7.4	8.5	10.2	11.0	13.0	62	67	61
	●	●	●		12SQ	3.2	1.6	3.5	3.9	4.6	6.5	7.4	8.9	10.2	12.3	13.2	15.5	70	75	68
			●		14.5SQ	3.9	1.6	4.3	4.7	5.5	7.8	9.0	10.8	12.3	14.8	15.9	18.8	78	82	75
3/8	●	●	●		18SQ	4.0	2.4	5.3	5.9	6.9	9.7	11.1	13.4	15.3	18.4	19.8	23	71	75	68
1/2	●	●	●		29SQ	5.6	3.2	8.5	9.5	11.1	15.7	17.9	22	25	30	32	38	71	75	68
			●		36SQ	6.4	3.2	10.6	11.8	13.7	19.5	22	27	31	37	40	47	78	82	75
3/4			●		50SQ	6.7	4.4	14.7	16.3	19.1	27	31	37	42	51	55	65	71	75	68
1			●	●	106SQ	9.9	5.6	31	35	40	57	65	79	90	109	117	137	78	80	73
1-1/4				●	177SQ	12.7	6.4	52	58	67	96	109	132	150	181	195	229	78	80	73
1-1/2				●	230SQ	14.3	8.7	68	75	88	124	142	171	195	236	253	298	73	77	70
				●	290SQ	15.5	11.1	85	95	111	157	179	216	246	297	319	376	66	70	64
				●	360SQ	17.4	11.1	106	118	137	195	222	268	306	369	396	466	70	74	67
2				●	480SQ	21	11.1	141	157	183	260	297	357	408	492	528	622	79	82	74
				●	490SQ	19.8	14.3	144	160	187	265	303	365	416	502	539	635	62	67	61
				●	590SQ	22.2	14.3	174	193	225	319	365	439	501	604	649	764	75	78	71
2-1/2				●	950SQ	28.6	17.5	280	310	362	514	587	707	807	973	1044	1231	81	84	76
				●	2980SQ	47.6	28.6	878	973	1136	1613	1841	2219	2533	3052	3276	3860	89	91	83
5				●	5690SQ	81.8	44.5	1677	1858	2169	3080	3515	4236	4836	5827	6255	7371	102	105	95

Diâmetro máximo de passagem livre é o diâmetro máximo das partículas estranhas que podem passar através do bico sem entupimento.

ANEXO H – QUADRO DE DESEMPENHO DA PONTA B1/4T-SS+TG-SS6.

TG

*At the stated pressure in psi.

Body Inlet Conn. (in.)	Capacity Size	Orifice Dia. Nom. (in.)	Max. Free Passage Dia. (in.)	Capacity (gallons per minute)*										Spray Angle (°)*			
				5	7	10	20	30	40	60	80	100	150	7	20	80	
1/4	.3	.020	.016	-	-	-	.041	.050	.057	.068	.078	.087	.10	-	-	50	61
	.4	.022	.018	-	-	-	.055	.066	.076	.091	.10	.12	.14	-	-	56	63
	.5	.024	.020	-	-	-	.069	.083	.095	.11	.13	.14	.17	-	-	56	63
	.6	.027	.020	-	-	-	.083	.099	.11	.14	.16	.17	.21	-	-	54	62
	.7	.030	.020	-	-	-	.096	.12	.13	.16	.18	.20	.24	-	-	54	63
	1	.036	.025	-	-	-	.14	.17	.19	.23	.26	.29	.35	-	-	58	53
	2	.047	.040	-	-	.20	.28	.33	.38	.46	.52	.58	.70	-	-	50	46
	3	.062	.040	-	-	.30	.41	.50	.57	.68	.78	.87	1.0	-	-	65	59
	3.5	.067	.050	-	-	.35	.48	.58	.66	.80	.91	1.0	1.2	-	-	50	46
	5	.082	.050	-	-	.50	.69	.83	.95	1.1	1.3	1.4	1.7	-	-	65	59
6.5	.094	.063	.47	.55	.65	.89	1.1	1.2	1.5	1.7	1.9	2.3	45	50	46	46	
10	.109	.063	.73	.85	1.0	1.4	1.7	1.9	2.3	2.6	2.9	3.5	58	67	61	61	

APENDICE

APENDICE A – PROTOCOLO PARA ENSAIO DE EROSÃO DOS SOLOS UTILIZANDO SIMULADOR DE CHUVA

1ª Etapa: Coleta e preparação do solo

Atividade 1: A coleta dos solos deve ser realizada no perfil horizontal da superfície do solo de tal modo a representa com maior precisão possível as condições físicas e químicas do solo. Observação: Procurar coletar a amostra do solo com no máximo 5 centímetros de profundidade e a área de coleta do solo deve ser pequena para minimizar a variação das propriedades físicas e químicas do solo.

Atividade 2: O solo deve ser peneirado utilizando uma tela padrão 20mm para remover partículas rochosas. Observação: O peneiramento é facilitado com o solo um pouco úmido.

Atividade 3: O solo deve ser espalhado sobre uma lona plana em uma fina camada para facilitar a secagem. Observação: Procurar utilizar um ambiente com condição térmica controlada.

Atividade 4: Utilizando uma pá, o solo deve ser completamente misturado. Observação: ao misturar o solo deve se ter o cuidado para não danificar a lona com a pá.

Atividade 5: Selecione dez amostras de diferentes pontos da amostra de solo coletada e bem misturada, realize um teste de fósforo para testar a homogeneidade. Observação: O nível de homogeneidade é aceito quando as amostras analisadas apresentarem um coeficiente de variação menor que 5%. Considere coeficiente de variação igual a divisão entre o desvio padrão e a média.

Atividade 6: Se o coeficiente de variação do teste de fósforo for maior que 5%, o solo deve ser novamente misturado e repetido o teste de homogeneidade.

2ª Etapa: Embalagem para os solos

Atividade 1: As caixas devem ser com dimensões uniformes de comprimento, largura e profundidade (1000 mm x 200 mm x 75 mm), contendo nove furos com 5 mm de diâmetro para a drenagem. As caixas devem conter uma aba de 50 mm e uma calha para coleta em uma das extremidades.

Atividade 2: Colocar um pano no fundo das caixas para evitar que o solo seja levado para fora das caixas, de tal forma que permita que a água flua quando o solo estiver encharcado.

Atividade 3: Adicionar o solo preparado (peneirado e homogeneizado) na caixa até aproximadamente a metade da altura, espalhando uniformemente o solo e colocando sobre o solo um tijolo plano. Nota: O solo deve estar seco de tal forma que o peso do tijolo não compacta o solo.

Atividade 4: Adicione mais 2 cm de solo e nivele com um medidor de nivelamento, obtendo uma altura de 5 cm de solo.

Atividade 5: Pesar a primeira caixa com o solo e adicionar o mesmo peso a todas as demais caixas, de tal forma que todas as caixas tenham uma profundidade de solo de 5 cm e densidade uniforme entre elas.

Atividade 6: Remova qualquer impureza ou excesso de solo das calhas das caixas.

3ª Etapa: Montagem das caixas no Simulador de chuva.

Atividade 1: Posicione uma estrutura de madeira sob o simulador de chuva, de tal forma que as caixas contendo o solo preparado são posicionadas. Nota: A estrutura de madeira deve ter uma rigidez o suficiente para suportar o peso das caixas com o solo.

Atividade 2: Posicione a estrutura de madeira sobre blocos de cimento a uma altura que permita a colocação das garrafas de coleta e funis abaixo das calhas de coleta.

Atividade 3: Elevar a parte de trás da plataforma, usando tijolos e calços, de modo que a parte de trás da caixa do solo esteja 3 cm maior que a parte frontal da caixa, resultando em uma inclinação de 3%.

Atividade 4: Localize o ponto diretamente abaixo do bico aspersor e evite de colocar uma caixa com solo nesta posição, com isso evita-se grandes gotas formadas pelo bico no momento de início e fim de cada chuva simulada. Marque a posição das caixas e sempre colocar as caixas na mesma posição.

4ª Etapa: Selecionando a fonte de água para chuva simulada.

Atividade 1: Selecione uma fonte de água que esteja livre de impurezas e partículas que possam interferir no estudo.

Atividade 2: Utilize uma fonte de água principal para o simulador de chuva que garanta a pressão e vazão determinada. Nota: Ao utilizar bombas para recalque da água, certifique-se de que as características da bomba atendem as necessidades da chuva a ser simulada.

5ª Etapa: Selecionando o mecanismo aspersor

Atividade 1: Selecionar um dos quatro modelos de aspersor que são usados para simular precipitações (17 wsq Full Jet 3/8 HH, 24 wsq Full Jet 3/8 HH, 30 w Full Jet 1/2 HH e 50 w Full Jet 1/2 HH). Nota: Cada aspersor tem uma pressão e vazão de melhor desempenho para garantir o tamanho e a intensidade de gotas apropriado.

6ª Etapa: Operando o Simulador de Chuva

Atividade 1: Posicione a válvula de esfera na posição fechada, e acione a fonte principal de alimentação de água (bomba).

Atividade 2: Abrir completamente a válvula de pressão e de vazão.

Atividade 3: Acione o sistema e regule a válvula de pressão de acordo com o valor recomendado para o bico aspersor selecionado. Nota: durante a geração de chuva simulada as válvulas não devem ser reguladas.

Atividade 4: Regular a válvula de vazão até que a mesma atinja o valor especificado na tabela do bico aspersor.

Atividade 5: Feche a válvula de alimentação principal sem mexer nas válvulas de pressão e de vazão.

7ª Etapa: Calibração do bico aspersor e da uniformidade da chuva simulada.

Atividade 1: Feche os furos das caixas vazias com fita adesiva para evitar que a água saia das caixas e as posicione nas marcações na estrutura.

Atividade 2: Posicione e segure um tudo plástico sobre o bico aspersor e abra a válvula principal.

Atividade 3: Colete a água em uma proveta graduada durante 10 segundos.

Atividade 4: Faça os ajustes necessários na válvula de controle de vazão e repita o processo até garantir a vazão correspondente ao bico aspersor. Após a conferência, usar o valor do medidor de vazão como mecanismo de monitoramento.

Atividade 5: Remova o tubo plástico do bico aspersor para permitir que as gotas de chuva simulada atinjam as caixas com solo e anote o tempo de início.

Atividade 6: Após 10 minutos de geração de chuva simulada sobre as caixas de solo, interrompa a chuva posicionando o tubo plástico sobre o bico aspersor e após fechar a válvula de alimentação principal.

Atividade 7: Medir em uma proveta graduada o volume de água coletado em cada uma das caixas com solo, e calcule a profundidade da chuva simulada dividindo o volume pela área do fundo da caixa.

Atividade 8: Calcular o coeficiente de variação para a profundidade da chuva simulada. Nota: A uniformidade da precipitação é alcançada quando atinge um coeficiente de variação $<0,05$. Onde: Coeficiente de Variação (CV) = Desvio Padrão dividido pela média.

Atividade 9: Se o CV for maior que 0,05, ajuste o bico aspersor (rotacione um quarto de volta) e repita o processo de calibração. Nota: Pode ser necessário ajustar mais de uma vez para alcançar um CV menor que 0,05.

Atividade 10: Quando o Coeficiente de Variação for menor que 0,05, repita a calibração várias vezes para garantir que a intensidade da chuva seja constante.

8ª Etapa: Realização da chuva simulada

Atividade 1: Após a calibração, posicione as caixas com solo nas posições demarcadas na estrutura de madeira.

Atividade 2: Posicione as garrafas e funis de coleta de escoamento abaixo dos bicos de drenagem e posicione um suporte para evitar que as gotas de chuva simulada caiam diretamente sobre a calha.

Atividade 3: Repita as atividades 7.2 e 7.5 para conferir a vazão da água no bico aspersor antes de começar a geração de chuva simulada.

Atividade 4: Registre o tempo de início do escoamento para cada caixa de solo quando no bico de drenagem passar de um gotejamento lento para um fluxo contínuo.

Atividade 5: Coletar amostras da água escoada em intervalos de tempo pré-determinados, trocando as garrafas de coleta quando necessário ou no final da geração da chuva simulada.

Atividade 6: Para interromper a geração de chuva simulada, posicione o tubo plástico sobre o bico aspersor para desviar o fluxo de água bruscamente e então fechar a válvula principal do sistema de alimentação.

Atividade 7: Colete as amostras de escoamento e registre o seu volume usando uma proveta graduada ou uma balança.

Atividade 8: Misture as amostras cuidadosamente para que todos os sedimentos estejam em suspensão e encaminhe as amostras para análise em laboratório.

APENDICE B – VALORES DE CUC DAS 162 UNIDADES EXPERIMENTAIS

continua

Combinação	Bico	Pressão (kPa)	Altura (m)	Repetição	CUC (1m ²) %	CUC (1m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	CUC (0,36 m ²) %	CUC (0,36m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
1	b1	50	1,1	1	64,12	58,27	8,03	13,78	71,21	65,78	5,38	8,18
	b1	50	1,1	2	64,14				70,83			
	b1	50	1,1	3	48,49				59,29			
	b1	50	1,1	4	46,35				57,93			
	b1	50	1,1	5	59,31				65,79			
	b1	50	1,1	6	67,19				69,63			
2	b1	50	2,1	1	79,83	79,22	0,88	1,11	83,6	84,61	1,22	1,44
	b1	50	2,1	2	80,66				87,25			
	b1	50	2,1	3	79,37				84,27			
	b1	50	2,1	4	79,08				84,19			
	b1	50	2,1	5	78,08				84,52			
	b1	50	2,1	6	78,29				83,84			
3	b1	50	3,1	1	84,89	86,92	1,37	1,57	90,18	89,47	1,75	1,96
	b1	50	3,1	2	87,39				90,01			
	b1	50	3,1	3	85,51				88,03			
	b1	50	3,1	4	89,04				92,7			
	b1	50	3,1	5	87,18				87,47			
	b1	50	3,1	6	87,5				88,42			
4	b1	100	1,1	1	77,8	76,68	2,28	2,97	87,37	87,64	1,68	1,91
	b1	100	1,1	2	74,5				87,25			
	b1	100	1,1	3	77,95				88,14			
	b1	100	1,1	4	73,25				84,54			
	b1	100	1,1	5	80,09				88,44			
	b1	100	1,1	6	76,47				90,12			
5	b1	100	2,1	1	90,18	89,45	2,40	2,68	93,8	92,21	3,08	3,34
	b1	100	2,1	2	89,28				93,15			
	b1	100	2,1	3	92,83				96,55			
	b1	100	2,1	4	90,95				93,39			
	b1	100	2,1	5	85,06				87,47			
	b1	100	2,1	6	88,42				88,92			
6	b1	100	3,1	1	86,77	87,87	1,41	1,60	87,11	89,65	1,62	1,81
	b1	100	3,1	2	88,37				88,54			
	b1	100	3,1	3	90,16				92,14			
	b1	100	3,1	4	86,92				89,16			
	b1	100	3,1	5	86,09				90,06			
	b1	100	3,1	6	88,92				90,88			
7	b1	150	1,1	1	81,68	82,93	1,30	1,57	85,15	86,34	1,74	2,02
	b1	150	1,1	2	82,92				88,55			
	b1	150	1,1	3	83,52				83,16			
	b1	150	1,1	4	81,24				87,41			
	b1	150	1,1	5	82,98				86,73			
	b1	150	1,1	6	85,25				87,01			

continua

Combinação	Bico	Pressão (kPa)	Altura (m)	Repetição	CUC (1m ²) %	CUC (1m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	CUC (0,36 m ²) %	CUC (0,36m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
8	b1	150	2,1	1	93,32	92,67	1,12	1,21	92,07	94,71	1,22	1,29
	b1	150	2,1	2	94,56				95,06			
	b1	150	2,1	3	93,21				95,83			
	b1	150	2,1	4	91,64				95,15			
	b1	150	2,1	5	91,48				94,82			
	b1	150	2,1	6	91,82				95,31			
9	b1	150	3,1	1	90,64	88,63	1,35	1,52	93,93	91,83	1,26	1,37
	b1	150	3,1	2	89,55				92,13			
	b1	150	3,1	3	88,82				91,41			
	b1	150	3,1	4	88,82				90,7			
	b1	150	3,1	5	86,51				90,14			
	b1	150	3,1	6	87,43				92,69			
10	b2	50	1,1	1	1,03	6,72	2,80	41,60	39,95	40,38	1,97	4,89
	b2	50	1,1	2	6,73				41,27			
	b2	50	1,1	3	10,1				37,63			
	b2	50	1,1	4	8,18				38,48			
	b2	50	1,1	5	7,71				41,33			
	b2	50	1,1	6	6,59				43,59			
11	b2	50	2,1	1	16,68	18,32	2,19	11,95	41,59	45,54	1,96	4,30
	b2	50	2,1	2	20,47				45,48			
	b2	50	2,1	3	21,98				47,94			
	b2	50	2,1	4	16,48				46,08			
	b2	50	2,1	5	18,1				46,69			
	b2	50	2,1	6	16,18				45,48			
12	b2	50	3,1	1	30,56	28,17	3,51	12,46	54,32	52,51	1,96	3,73
	b2	50	3,1	2	26,87				51,32			
	b2	50	3,1	3	28,74				54,85			
	b2	50	3,1	4	21,07				52,45			
	b2	50	3,1	5	31,62				48,99			
	b2	50	3,1	6	30,15				53,14			
13	b2	100	1,1	1	14,11	11,33	1,30	11,47	59,63	60,13	0,38	0,63
	b2	100	1,1	2	10,13				60,52			
	b2	100	1,1	3	10,85				60,68			
	b2	100	1,1	4	10,5				60,23			
	b2	100	1,1	5	11,13				59,77			
	b2	100	1,1	6	11,28				59,97			
14	b2	100	2,1	1	30,05	29,40	1,13	3,85	59,18	57,66	1,66	2,87
	b2	100	2,1	2	28,2				58,74			
	b2	100	2,1	3	30,19				58,26			
	b2	100	2,1	4	30,51				58,56			
	b2	100	2,1	5	27,48				56,92			
	b2	100	2,1	6	29,94				54,3			

continua

Combinação	Bico	Pressão (kPa)	Altura (m)	Repetição	CUC (1m ²) %	CUC (1m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	CUC (0,36 m ²) %	CUC (0,36m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
15	b2	100	3,1	1	40,31	41,22	2,10	5,10	65,69	64,19	3,02	4,71
	b2	100	3,1	2	44,87				68,06			
	b2	100	3,1	3	40,39				63,22			
	b2	100	3,1	4	40,26				64,92			
	b2	100	3,1	5	43				65,01			
	b2	100	3,1	6	38,46				58,24			
16	b2	150	1,1	1	24,67	22,65	2,00	8,82	59,84	59,85	1,11	1,85
	b2	150	1,1	2	22,72				59,76			
	b2	150	1,1	3	19,41				58,42			
	b2	150	1,1	4	25,23				58,71			
	b2	150	1,1	5	22,82				61,66			
	b2	150	1,1	6	21,02				60,69			
17	b2	150	2,1	1	36,3	35,85	1,86	5,17	64,17	64,59	0,97	1,51
	b2	150	2,1	2	35,65				63,89			
	b2	150	2,1	3	34,49				65,41			
	b2	150	2,1	4	39,67				66,38			
	b2	150	2,1	5	34,9				63,96			
	b2	150	2,1	6	34,1				63,72			
18	b2	150	3,1	1	43,1	42,39	4,30	10,13	63,64	62,21	6,44	10,36
	b2	150	3,1	2	33,77				48,89			
	b2	150	3,1	3	41,34				63,56			
	b2	150	3,1	4	46,48				66,95			
	b2	150	3,1	5	46,59				68,89			
	b2	150	3,1	6	43,04				61,33			
19	b3	50	1,1	1	12,58	14,15	3,25	22,97	73,99	71,81	2,92	4,07
	b3	50	1,1	2	12,54				67,85			
	b3	50	1,1	3	20,12				68,07			
	b3	50	1,1	4	9,87				71,7			
	b3	50	1,1	5	16,18				75,33			
	b3	50	1,1	6	13,62				73,93			
20	b3	50	2,1	1	38,97	37,86	1,56	4,12	57,19	56,94	0,85	1,50
	b3	50	2,1	2	39,35				56,8			
	b3	50	2,1	3	35,12				56,99			
	b3	50	2,1	4	37,52				55,2			
	b3	50	2,1	5	39,42				57,83			
	b3	50	2,1	6	36,8				57,63			
21	b3	50	3,1	1	43,06	43,21	2,16	5,01	65,16	62,63	3,85	6,14
	b3	50	3,1	2	47,24				67,45			
	b3	50	3,1	3	43,43				66,62			
	b3	50	3,1	4	43,63				58,33			
	b3	50	3,1	5	41,76				58,94			
	b3	50	3,1	6	40,13				59,29			

conclusão

Combinação	Bico	Pressão (kPa)	Altura (m)	Repetição	CUC (1m ²) %	CUC (1m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)	CUC (0,36 m ²) %	CUC (0,36m ²) % Média	Desvio padrão	Coefficiente de variação (%)
22	b3	100	1,1	1	20,32	23,67	2,99	12,63	85,53	82,14	4,66	5,67
	b3	100	1,1	2	23,78				88,72			
	b3	100	1,1	3	21,31				77,29			
	b3	100	1,1	4	27,12				83,2			
	b3	100	1,1	5	28,1				83,01			
	b3	100	1,1	6	21,38				75,06			
23	b3	100	2,1	1	44,16	47,31	1,72	3,63	61,58	60,69	1,68	2,76
	b3	100	2,1	2	48,51				62,39			
	b3	100	2,1	3	48,67				61,9			
	b3	100	2,1	4	49,18				61,51			
	b3	100	2,1	5	46,92				58,72			
	b3	100	2,1	6	46,42				58,01			
24	b3	100	3,1	1	53,06	48,27	5,62	11,64	77,33	71,90	8,51	11,84
	b3	100	3,1	2	50,14				74,87			
	b3	100	3,1	3	43,57				73,78			
	b3	100	3,1	4	52,08				76,35			
	b3	100	3,1	5	37,98				53,03			
	b3	100	3,1	6	52,8				76,04			
25	b3	150	1,1	1	33,29	34,34	1,07	3,12	87,66	88,90	1,17	1,31
	b3	150	1,1	2	33,29				87,87			
	b3	150	1,1	3	33,48				91,03			
	b3	150	1,1	4	36,11				88,31			
	b3	150	1,1	5	35,14				88,79			
	b3	150	1,1	6	34,75				89,73			
26	b3	150	2,1	1	58,01	53,74	2,60	4,84	74,85	72,28	2,17	3,00
	b3	150	2,1	2	52,67				72,23			
	b3	150	2,1	3	54,06				71,91			
	b3	150	2,1	4	53,36				72,89			
	b3	150	2,1	5	54,99				73,86			
	b3	150	2,1	6	49,34				67,96			
27	b3	150	3,1	1	58,14	58,80	2,86	4,87	81,56	81,48	2,20	2,71
	b3	150	3,1	2	54,24				77,4			
	b3	150	3,1	3	58,46				81,92			
	b3	150	3,1	4	63,87				84,58			
	b3	150	3,1	5	58,05				80,57			
	b3	150	3,1	6	60,03				82,85			