

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PAMPA

MATEUS SPECHT

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
FLUXO EM APLICADOR DE
HERBICIDA AMPARADA POR
SIMULAÇÃO COM ÊNFASE EM
EXPLORAÇÃO DE PARALELISMO**

**Bagé
2019**

MATEUS SPECHT

**MODELAGEM COMPUTACIONAL DE
FLUXO EM APLICADOR DE
HERBICIDA AMPARADA POR
SIMULAÇÃO COM ÊNFASE EM
EXPLORAÇÃO DE PARALELISMO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Computação Aplicada.

Orientador: Naylor Bastiani Perez
Coorientador: Leonardo Bidese de Pinho

**Bagé
2019**

Ficha catalográfica elaborada automaticamente com os dados fornecidos
pelo autor através do Módulo de Biblioteca do
Sistema GURI (Gestão Unificada de Recursos Institucionais) .

S741m Specht, Mateus

Modelagem Computacional de Fluxo em Aplicador de Herbicida
Amparada por Simulação com Ênfase em Exploração de Paralelismo
/ Mateus Specht.

76 p.

Dissertação (Mestrado)-- Universidade Federal do Pampa,
Programa de Pós-Graduação em Computação Aplicada, 2019.

"Orientação: Naylor Bastiani Perez;

Coorientação: Leonardo Bidese de Pinho".

1. Aplicação sustentável de herbicida. 2. Computação de
alto desempenho. 3. Controle de plantas daninhas. 4. Pecuária
de precisão. 5. Roçadeira Campo Limpo. I. Título.

MATEUS SPECHT

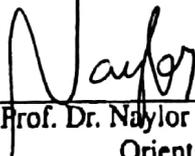
MODELAGEM COMPUTACIONAL
DE FLUXO EM APLICADOR DE
HERBICIDA AMPARADA POR
SIMULAÇÃO COM ÊNFASE EM
EXPLORAÇÃO DE PARALELISMO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Computação Aplicada
como requisito parcial para a obtenção do título
de Mestre em Computação Aplicada.

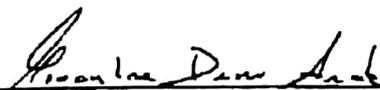
Área de concentração: Tecnologias para a
Produção Agropecuária

Dissertação defendida e aprovada em: 10 de dezembro de 2019.

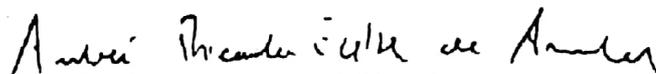
Banca examinadora:



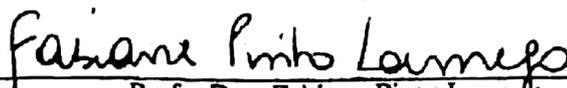
Prof. Dr. Naylor Bastiani Perez
Orientador
EMBRAPA



Prof. Dr. Alexandre Denes Arruda
UNIPAMPA



Prof. Dr. André Ricardo Felkl de Almeida
UNIPAMPA



Profa. Dra. Fabiane Pinto Lamego
EMBRAPA



Prof. Dr. Marcelo Romero de Moraes
UNIPAMPA

RESUMO

A presente pesquisa analisa o funcionamento do aplicador seletivo de herbicida Campo Limpo, que promove o controle de plantas daninhas em pastagem por contato direto com os aplicadores embebidos com a calda herbicida. Visando entender melhor a sua operação para aprimorar a precisão de sua aplicação, foram realizados experimentos computacionais com foco no comportamento do escoamento, envolvendo a simulação a partir da construção da malha de fundo, da malha de simulação, do refinamento da malha e da definição das condições iniciais e dos parâmetros da simulação. Também foi necessário desenvolver uma série de experimentos laboratoriais com aparato próximo da realidade de operação do implemento aplicador. A experimentação da simulação nos diferentes ambientes computacionais foi conduzida de forma a representar o comportamento obtido no laboratório. Alguns experimentos de campo foram realizados para possibilitar os estudos de validação cruzada das modelagens de partes da roçadeira, contrastando o comportamento laboratorial com a escala real da Campo Limpo. A construção de um modelo da geometria para uso no desenvolvimento da malha e, posteriormente, a resolução dos cálculos demandaram soluções de computação de alto desempenho. A aplicação de técnicas de paralelismo com a divisão de trabalhos computacionais em diferentes unidades de processamento propiciou o aumento da velocidade dos ambientes computacionais em até 4 vezes e viabilizou o acréscimo da complexidade da malha simulação evoluir de um cenário de 7 faces a um de 37 faces e mais de 400 mil células. A avaliação de desempenho possibilitou a comparação entre ambientes computacionais e indicou a arquitetura baseada no uso de computação distribuída com uma redução do tempo de processamento de aproximadamente 40%, com especial atenção às técnicas de paralelismo, buscando a resolução de estudos de caso com restrições de tempo. Os diferentes estudos de caso proporcionaram formas de se aprimorar as métricas construtivas e condições operacionais da Campo Limpo com base nos dados obtidos em experimentos e nas simulações.

Palavras-chave: Aplicação sustentável de herbicida. Computação de alto desempenho. Controle de plantas daninhas. Pecuária de precisão. Roçadeira Campo Limpo.

ABSTRACT

The present research analyzes the functioning of the selective herbicide applicator Campo Limpo, which promotes the control of weeds in pastures by direct contact with the applicators soaked with a herbicide syrup. In order to better understand its operation, with a focus on flow behavior, to improve the accuracy of its application, computational experiments were performed using the simulation with the construction of the background mesh, simulation mesh, mesh refinement, initial condition settings and simulation parameters. It was also necessary to develop series of laboratory experiments with an apparatus close to the reality of the operation of the applicator implement. The simulation experiment in different computational environments was conducted in order to execute behaviors in the laboratory. Some field experiments were carried out to enable cross-validation studies of the proposed models, contrasting in a laboratory with a real Campo Limpo scale. The construction of a geometry model for use in the construction of mesh and, later, resolution of calculations requires high performance computing solutions. The application of parallelism techniques dividing of computational work in different processing units provided an increase in speed of computational environments processing by up to 4 times and increased simulation complexity of simulation mesh from 7-sided to 37-sided scenario with more than 400 thousand cells. A performance evaluation made it possible to compare computational environments and indicated an architecture based on use of distributed computing with a reduction of processing time in approximately 40%, with special attention to parallelism techniques, seeking a resolution of case studies with time restrictions. The different case studies point out possible ways to improve the construction metrics and operational conditions of Campo Limpo based on the data obtained in experiments and simulations.

Keywords: Campo Limpo trimmer. High performance computing. Precision livestock. Sustainable herbicide application.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ferramenta manual para aplicação de herbicida, enxada química.	19
Figura 2	Implemento agrícola aplicador de herbicida, Campo Limpo.	20
Figura 3	Representação do interior de um dos elemento de aplicação de herbicida do Campo Limpo e seus componentes construtivos.	21
Figura 4	Representação do reservatório e das entradas e saídas do distribuidor de herbicida do Campo Limpo.	21
Figura 5	Espigões da haste de distribuição e a mangueira do elemento de aplicação desacoplados do Campo Limpo.	22
Figura 6	Representação dos diretórios de estudo de caso básico do <i>software</i> de CFD OpenFOAM.	31
Figura 7	Fluxograma das etapas da construção de estudo de caso de simulação do <i>software</i> CFD OpenFOAM.	32
Figura 8	Fluxograma da ferramenta de refinamento da malha de simulação <i>SnappyHexMesh</i> do <i>software</i> CFD OpenFOAM.	34
Figura 9	Experimento laboratorial com parte do distribuidor sem as cordas dos elementos de aplicação e com a bomba peristáltica da Campo Limpo para teste de vazão.	42
Figura 10	Esquemático dos entes do escoamento do experimento laboratorial com parte do distribuidor da Campo Limpo.	42
Figura 11	Esquema de entradas e saídas da malha de simulação da mangueira do elemento de aplicação da Campo Limpo.	44
Figura 12	Resultados das medidas das vazões dos espigões no experimento laboratorial, ao longo das hastes de distribuição, com parte do distribuidor da Campo Limpo.	45
Figura 13	Vazões dos espigões dispostos ao longo da haste de distribuição de uma sessão da Campo Limpo submetida a diferentes ângulos de operação: 0°; 2,5°; 5,0°, no experimento laboratorial.	47
Figura 14	Representação modelo da geometria da haste de distribuição da Campo Limpo criado no Onshape no formato STL.	48
Figura 15	Representação do arquivo STL de uma face dos modelos das geometrias.	50
Figura 16	Representação da malha de simulação da mangueira de um elemento de aplicação da Campo Limpo gerada a partir da ferramenta ParaView do <i>software</i> CFD OpenFOAM.	51
Figura 17	Apresentação das malhas de fundo e da geometria final da haste de distribuição da Campo Limpo geradas pela ferramenta ParaView do <i>software</i> CFD OpenFOAM.	51
Figura 18	Resultados da simulação da velocidade do escoamento dentro mangueira do elemento de aplicação da Campo Limpo em diferentes pontos de vista.	53
Figura 19	Experimento com detalhe da Campo Limpo em condição de operação em desnível.	55
Figura 20	Experimento com detalhe da Campo Limpo com obstrução do escoamento na entrada de uma das hastes de distribuição.	56
Figura 21	Representação do referencial numérico do experimento de vazão com a Campo Limpo.	56
Figura 22	Esquemático das correlações entre os ambientes computacionais, as partes da Campo Limpo e os experimentos computacionais, simulados com o <i>software</i> CFD OpenFOAM.	58

Figura 23 Vazões dos elementos aplicadores ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo submetida a diferentes ângulos de operação: 0°; 2,5°; 5,0°, no experimento de campo.	61
Figura 24 Vazões dos elementos aplicadores ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo, nas condições com e sem reciclo, quando submetida a um ângulo de operação de 0°, no experimento de campo.....	62
Figura 25 Vazão média dos elementos aplicadores da Campo Limpo e desvio padrão associado, quando submetida a diferentes ângulos de operação: 0°; 2,5°; 5,0°, com e sem reciclo, no experimento de campo.	63
Figura 26 Simulação da distribuição das vazões dos elementos aplicadores, conforme sua posição na haste de distribuição da Campo Limpo.	65
Figura 27 Desempenho do experimento computacional I para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do <i>software</i> CFD OpenFOAM em contraste com o aumento de desempenho ideal.	66
Figura 28 Desempenho do experimento computacional II para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do <i>software</i> CFD OpenFOAM.....	67
Figura 29 Desempenho do experimento computacional III para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do <i>software</i> CFD OpenFOAM.....	67
Figura 30 Desempenho do experimento computacional IV para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do <i>software</i> CFD OpenFOAM.....	68
Figura 31 Desempenho do experimento computacional V em arquiteturas em série, distribuída e híbrida para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do <i>software</i> CFD OpenFOAM.	69
Figura 32 Simulação no <i>software</i> CFD OpenFOAM da distribuição da porcentagem da vazão total por espigão, conforme sua disposição ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo em condições de injeção paralela e transversal da calda herbicida.....	71
Figura 33 Simulação no <i>software</i> CFD OpenFOAM da distribuição da porcentagem da vazão total por espigão, conforme sua disposição ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo da calda herbicida na haste de distribuição sob condições estruturais distintas, configuração atual e configuração com diâmetro da sessão interna dobrado.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Resultados das buscas exploratórias em repositórios de trabalhos científicos com palavras-chave previamente selecionadas.....	37
Tabela 2 Resultados das medidas de vazão da bomba do experimento laboratorial com parte do distribuidor da Campo Limpo.	45
Tabela 3 Proporções das divisões das malhas de fundo da simulação criadas com a ferramenta BlockMesh no <i>software</i> CFD OpenFOAM.	48
Tabela 4 Número de fronteiras para os modelos de geometria da Campo Limpo.	49
Tabela 5 Comparação das médias das vazões em diferentes ângulos de operação dos experimentos sem reciclo na Campo Limpo.	61
Tabela 6 Resultados da análise estatística das médias das vazões em diferentes ângulos de operação e nas condições com e sem reciclo dos experimentos na Campo Limpo.	64
Tabela 7 Resultados dos testes com a indicação do potenciômetro de controle da rotação da bomba peristáltica e as taxas de reciclo do experimento na Campo Limpo.	64

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ALICE	Acesso Livre à Informação Científica da Embrapa
BDTD	Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações
CAD	<i>Computer aided design</i>
CBCFD	Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional
CFD	<i>Computational fluid dynamics</i>
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
CPU	<i>Central process unit</i>
DDR	<i>Double data rate</i>
ECC	<i>Error correcting code</i>
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
ERAD	Escola Regional de Alto Desempenho
HPC	<i>High performance computing</i>
ICCFD	International Conference on Computational Fluid Dynamics
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers
MPI	<i>Message passing interface</i>
NUMA	<i>Non-uniform memory architecture</i>
OBJ	<i>Object</i>
OpenFOAM	Open Source Field Operation And Manipulation
PISO	Pressure Implicit with Splitting of Operators
RAM	<i>Random access memory</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
STL	<i>Stereolithography</i>
TCP	Transmission Control Protocol
UDP	User Datagram Protocol

UNIPAMPA Universidade Federal do Pampa

UMA *Uniform memory architecture*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 Justificativa	15
1.2 Hipótese.....	16
1.3 Objetivos	16
1.4 Organização do trabalho.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 Implemento aplicador de herbicida	18
2.2 Fluidodinâmica computacional	22
2.2.1 Classificação do regime do escoamento.....	24
2.2.2 Equações fluidodinâmicas	24
2.3 Análise de processamento e exploração do paralelismo	25
2.3.1 Protocolos de comunicação	27
2.3.2 Métricas de desempenho computacional	28
2.3.3 Passagem de mensagens	30
2.3.4 Granularidade	30
2.4 <i>Software</i> CFD.....	30
2.4.1 Geração da malha	32
2.4.1.1 Ferramenta de refinamento da geometria	33
2.4.1.2 Refinamento da malha.....	34
2.4.2 <i>Solver</i>	35
2.4.3 Pós-processamento	36
2.4.4 OpenMPI	36
2.5 Trabalhos relacionados.....	36
2.5.1 Ferramentas de fluidodinâmica computacional.....	38
2.5.2 Um esquema dinâmico de reparticionamento de malha para simulações de rompimento de barragem no OpenFOAM.....	39
2.5.3 Otimização de desempenho do OpenFOAM em <i>clusters</i> de processadores.	39
2.5.4 Análise numérico-experimental da agitação de calda em reservatórios de pulverizador agrícolas	39
3 METODOLOGIA EXPLORATÓRIA	41
3.1 Materiais e métodos exploratórios	41
3.1.1 Experimento laboratorial de vazão	43
3.1.2 Experimento laboratorial do efeito do ângulo de aplicação	43
3.1.3 Construção das geometrias	43
3.1.4 Simulação da mangueira do elemento aplicador	44
3.2 Resultados e discussões do experimentos laboratoriais.....	44
3.3 Resultados e discussões da construção da geometria.....	47
3.4 Resultados e discussões da simulação da mangueira do elemento aplicador	52
4 METODOLOGIA EXPLICATIVA	54
4.1 Materiais e métodos explicativos	54
4.1.1 Experimento de campo	54
4.1.2 Simulação da haste de distribuição	57
4.1.3 Experimentos computacionais	57
4.1.3.1 Ambiente computacional I	58
4.1.3.2 Ambiente computacional II.....	58
4.1.3.3 Ambiente computacional III	59
4.1.4 Propostas de melhorias no implemento	60
4.2 Resultados e discussões do experimento de campo.....	60

4.3	Resultados e discussões da simulação da haste de distribuição	64
4.3.1	Resultados e discussões dos experimentos computacionais	65
4.4	Resultados e discussões das propostas de melhorias	70
5	CONCLUSÃO	72
5.1	Considerações finais.....	73
	REFERÊNCIAS	75

1 INTRODUÇÃO

A indústria de alimentos de origem animal depende da capacidade da atividade pecuária se sustentar no ambiente de competição contemporâneo. As mudanças climáticas e o uso intensivo das áreas modificam as condições de crescimento e a reprodução das plantas usadas como fonte de alimento de animais, o que torna a atividade cada vez mais desafiadora (LUI, 2015).

Nas pastagens, as plantas mais nutritivas e preferencialmente escolhidas pelos animais são consumidas em uma velocidade maior que as demais e assim criam-se diferenças entre a população dos dois grupos em áreas de pastoreio. Além desta diferença do consumo, a competição entre as espécies fica mais acirrada com a presença de plantas com facilidades de adaptação ao ambiente. As espécies indesejáveis acabam ganhando volume com a falta de consumo pelos animais, aumentando a competição com as plantas desejáveis por sol, água e nutrientes nas áreas destinadas a pecuária. Atualmente, existem diferentes técnicas para buscar o controle das plantas indesejáveis, incluindo as que fazem uso de herbicidas.

Ao longo dos anos, implementos foram criados e aprimorados com o intuito de melhorar a qualidade da aplicação de herbicidas com a contribuição da comunidade de usuários e dos fabricantes dos mesmos. A aplicação é comumente realizada por pulverização. Contudo essa técnica depende de herbicidas que apresentem seletividade, de modo a controlar as plantas daninhas e preservar as de interesse, o que nem sempre é possível. Assim, o efeito de mortandade causado por pulverizadores convencionais acaba atingindo as plantas desejáveis, o que gera uma redução na oferta de alimento para os animais e, por fim, uma redução na oportunidade de ganho de peso animal.

Implementos com diferentes formas de aplicar os herbicidas estão sendo criados para não afetar as plantas importantes para a dieta animal. A roçadeira Campo Limpo é um aplicador seletivo de herbicida que permite atingir as plantas alvo com aplicadores umedecidos em um conjunto de tubulações e mangueiras acopladas ao longo de sua estrutura. Boa parte da concepção estrutural deste equipamento se caracteriza pelo empirismo e pelo uso de peças fabricadas para fins diversos. O processo de desenvolvimento e melhoria de implementos agrícolas em geral requer conhecimento envolvendo as características de sua operação. No caso da Campo Limpo, é necessário entender sobretudo os fenômenos fluidodinâmicos que ocorrem no escoamento de herbicida dentro da roçadeira.

Existem abordagens científicas na área da fluidodinâmica computacional que buscam possibilitar a modelagem de sistemas com equações de comportamento, cuja resolução é complexa e, muitas vezes, obtida somente a partir de técnicas computacionais. As modelagens fluidodinâmicas desenvolvidas em ambiente computacional (*computational fluid dynamics* - CFD) são amplamente utilizadas para diversos problemas de engenharia, por exemplo, nos estudos da dinâmica de mistura em tanques de implementos aplicadores de defensivos agrícolas, de modelagem da ventilação de ambientes para criar animais, de avaliação de melhorias nos aspectos construtivos e operacionais em bombas para aumento de eficiência do equipamento, de modelagem de aerodinâmica de veículos, de simulação de comportamento de escoamentos de fluidos complexos, mas sendo utilizadas nas mais diversas áreas.

Em um *software* CFD o objeto da simulação é dividido em pequenos volumes de modo a permitir a realização dos cálculos das variáveis e, posteriormente, visualizar os resultados referenciados aos eixos cartesianos. As variáveis são calculadas para cada um destes volumes através de uma metodologia numérico-computacional. A execução destes processos demandam soluções de computação de alto desempenho para a construção da malha, que busca representar o objeto, e para a execução do algoritmo de resolução das equações, que representam o sistema. Por isso, se almeja a aplicação de técnicas de melhoramento da eficiência de processamento através de paralelismo na resolução das rotinas de cálculo.

As modelagens fluidodinâmicas clássicas iniciam em princípios fundamentais até se tornar um conjunto de equações complexas para cada sistema analisado. Estes conjuntos de equações são amplamente estudados e implementados em *software* CFD para a resolução dos processos utilizando metodologias de processamento capazes de atender a demanda computacional (MITCHELL *et al.*, 2015). Os simuladores aplicados em CFD contam com uma série de ferramentas para resolução de cálculos chamadas de *solvers* e cada um é indicado para determinadas condições físicas do ambiente a ser simulado. Possuem também ferramentas geradoras de malha e de visualização dos resultados obtidos. Alguns *softwares* também possibilitam a exploração do paralelismo como uma forma de melhorar o desempenho computacional. Neste contexto existem *softwares* que possibilitam o melhor entendimento dos fenômenos envolvendo escoamentos em implementos agrícolas e auxiliam na especificação do aparato construtivo como diâmetros e velocidades de escoamento.

No presente trabalho, a primeira etapa da pesquisa foi exploratória, quando vislumbrada pelo aspecto do entendimento e estudo do funcionamento de um aplicador de herbicida existente e suas características fluidodinâmicas de operação e do funcionamento de um *software* CFD livre e de código aberto. Nessa fase, os experimentos laboratoriais foram necessários para obter dados iniciais para a simulação e um cenário reduzido do problema foi simulado com o *software* **Open source Field Operation And Manipulation (OpenFOAM)** e seus resultados avaliados com base na literatura. Na segunda fase da pesquisa, que possuiu caráter explicativo e experimentos de campo, os resultados da simulação, que estavam baseados em dados laboratoriais, foram correlacionados com princípios teóricos e práticos, de forma a validar as propostas de melhorias. Soluções alternativas foram desenvolvidas para explorar os potenciais dos diferentes ambientes computacionais com o uso de técnicas de computação de alto desempenho (high performance computing - HPC) para viabilizar o aumento da complexidade nos dois cenários simulados.

1.1 Justificativa

Alguns implementos voltados à pecuária possuem uma concepção estrutural a partir de uma grande parcela de empirismo. Entretanto, o uso de técnicas de simulação computacional possibilita a experimentação com diferentes configurações e, assim, fundamentar melhorias e possíveis modificações. A Campo Limpo é um implemento agrícola para a aplicação de herbicida em pastagens que visa atacar somente as plantas indesejáveis e manter intacta a vegetação restante. O herbicida é drenado do tanque e distribuído em mangueiras, seguindo para aplicadores de tecido que ficam embebidos com a calda herbicida que entram em contato com a planta indesejada na pastagem. A capacidade de executar processos computacionais em unidades de processamento diferentes, com técnicas de paralelismo, viabilizou o aumento da complexidade na utilização de ferramentas CFD. O uso de simuladores para obter um maior conhecimento sobre as características do escoamento pode tornar o processo de aplicação da Campo Limpo mais eficiente, gerando o aperfeiçoamento desta roçadeira pode gerar um menor impacto ambiental devido à maior precisão, além de aumentar a eficiência das pastagens e o ganho de peso do animal.

1.2 Hipótese

Esta pesquisa assume como hipótese que é viável avaliar o funcionamento e propor possíveis melhorias em implementos agrícolas, que trabalham com escoamento de fluidos líquidos, por meio de simulação dos seus fenômenos fluidodinâmicos com ferramenta CFD em ambientes computacionais que permitam a exploração de paralelismo.

1.3 Objetivos

- Desenvolver ensaios experimentais para retratar condições semelhantes com as encontradas no uso do aplicador de herbicida e coletar dados para suportar e viabilizar as técnicas CFD.
- Construir um modelo tridimensional da geometria do sistema de distribuição da calda de herbicida da roçadeira Campo Limpo, aplicável à simulação CFD.
- Simular o fluxo de calda herbicida no equipamento para conhecer os fenômenos fluidodinâmicos e verificar possíveis ineficiências do sistema aplicador de herbicida em cenários típicos.
- Desenvolver uma análise de desempenho, por meio de diferentes métricas de HPC, da simulação em diferentes ambientes computacionais visando identificar a capacidade de exploração do potencial de paralelismo.
- Identificar o potencial da inclusão de atuadores e redimensionamento de tubulações para melhorar o controle do escoamento de herbicida na máquina, permitindo aumentar a eficiência e a precisão do processo de aplicação em diferentes cenários reais de operação.

1.4 Organização do trabalho

No capítulo 2 é apresentado, em linhas gerais, o conjunto de conhecimentos necessários para se compreender melhor o andamento das metodologias de pesquisa empregadas no trabalho. Apresenta-se uma caracterização geral do implemento agrícola, contando com referencial científico, com exploração da fluidodinâmica computacional, com a análise de processamento e exploração do paralelismo para possibilitar a execução dos diferentes cenários dos experimentos computacionais, com uma série de conceitos

envolvendo a simulação com o uso do *software* OpenFOAM e, por fim, trabalhos envolvidos de alguma forma com a construção de conhecimento nas diferentes etapas deste trabalho.

No capítulo 3 é descrita a pesquisa exploratória desenvolvida preliminarmente, incluindo a explanação sobre as características dos experimentos laboratoriais, da construção das malhas, dos experimentos CFD e dos resultados obtidos envolvendo a etapa inicial da pesquisa.

No capítulo 4 é abordada a pesquisa explicativa realizada, contemplando as condições e os resultados da simulação da haste de distribuição, dos experimentos de campo com o intuito de validar a simulação, dos experimentos computacionais em diferentes arquiteturas de processamento e as propostas de melhorias propostas para a roçadeira Campo Limpo.

No capítulo 5 são destacadas as principais conclusões nos diferentes eixos do trabalho, experimentos laboratoriais e de campo, geração de malha, execução do *solver*, exploração de paralelismo e potenciais aprimoramentos.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A construção do conhecimento para este trabalho começa com um referencial teórico da evolução da Campo Limpo, origem, fundamento de funcionamento e algumas características de operação. Como a máquina se caracteriza por um escoamento de fluido passível de predição, são abordados conceitos de fluidodinâmica computacional (CFD). Para a resolução numérica desta abordagem, utilizam-se normalmente simuladores e ambientes computacionais de alto desempenho, que são relevantes para viabilizar a execução das ferramentas.

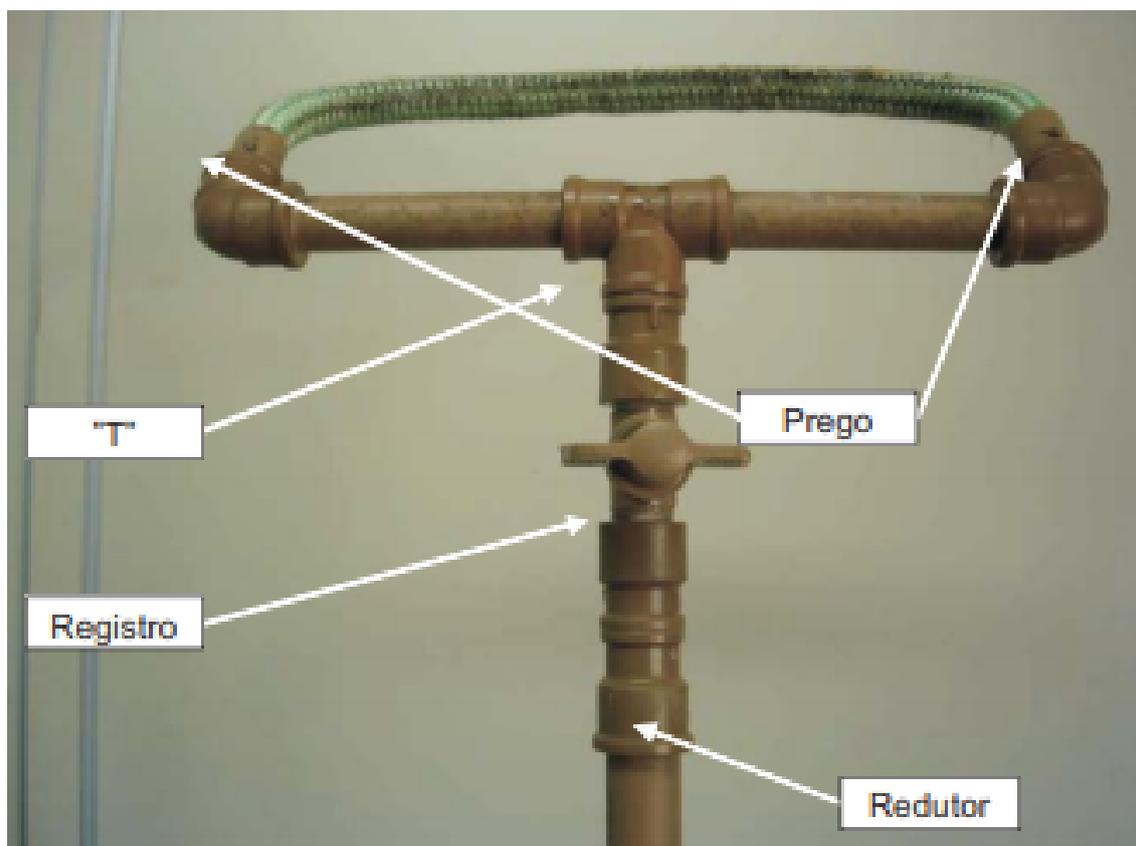
2.1 Implemento aplicador de herbicida

A Embrapa Pecuária Sul, localizada no município de Bagé, há décadas estuda as plantas invasoras, que competem por sol, nutrientes e são menos consumidas pelos animais. Ao longo do tempo, os campos destinados ao pastoreio, quando infestado por plantas invasoras, são prejudicados em termos de produtividade. O capim-annoni, inserido no Bioma Pampa, possui características invasoras e, por consequência, diminui o ganho de peso dos animais (SOUZA *et al.*, 2014).

Os pulverizadores convencionais projetam na atmosfera a calda herbicida, que acaba atingindo parte da comunidade de gramíneas ao redor da planta invasora alvo, mesmo quando utilizados de forma manual e com uso localizado, proporcionando um novo ambiente sem competição para o estabelecimento das invasoras. Em 2008, na busca por uma solução para os campos infestados de capim-annoni, foi estudado o uso da enxada química, representada na figura 1. A ferramenta consiste em um aplicador de calda de herbicida por contato, que propicia uma aplicação localizada da calda nas plantas invasoras. A solução proposta pela enxada química é controlar a vazão de calda através do registro para manter a corda embebida, constituindo um meio poroso que evita o gotejamento e propiciar a dosagem do herbicida por contato, somente a planta alvo. O método garante a sobrevivência das plantas que não foram tocadas pelo meio poroso embebido de calda (PEREZ, 2008).

No anseio de aumentar os horizontes da solução proposta pela enxada, um implemento agrícola foi desenvolvido com o mesmo princípio de aplicação da calda de herbicida. Este aplicador, chamada Campo Limpo, é dependente de tracionador para se deslocar ao longo das áreas alvo, conforme mostrado na figura 2. A ação da Campo

Figura 1 – Ferramenta manual para aplicação de herbicida, enxada química.



Fonte: Perez (2008).

Limpo se baseia na diferença de altura entre as plantas invasoras e as plantas forrageiras, que são mais consumidas pelos animais. O implemento possui regulagem de altura e isso propicia uma atuação em diferentes condições de infestação e altura de plantas invasoras. O controle das plantas daninhas em um ambiente de pastagens é um desafio que vai além do ataque às plantas adultas, necessitando de um manejo específico dos animais no local infestado, propiciando o crescimento das plantas desejáveis (PEREZ, 2010).

Conforme observado no levantamento bibliográfico, foram realizados testes para verificar a efetividade da aplicação considerando algumas variáveis, sendo constatado que, com uma única passagem pela área infestada, a Campo Limpo conseguiu controlar mais de oitenta por cento das plantas invasoras sem afetar as plantas forrageiras (MARTINS; SISTI; PEREZ, 2010). A faixa de velocidade da passagem da Campo Limpo sob a pastagem alvo é indicada entre quatro e sete quilômetros por hora, considerando que a velocidade influencia diretamente a quantidade de herbicida aplicada por unidade de área da pastagem alvo. Quanto maior a velocidade, mantendo constante a vazão de calda, terá como consequência uma redução no volume de herbicida aplicado por unidade de

Figura 2 – Implemento agrícola aplicador de herbicida, Campo Limpo.



Fonte: Perez (2010).

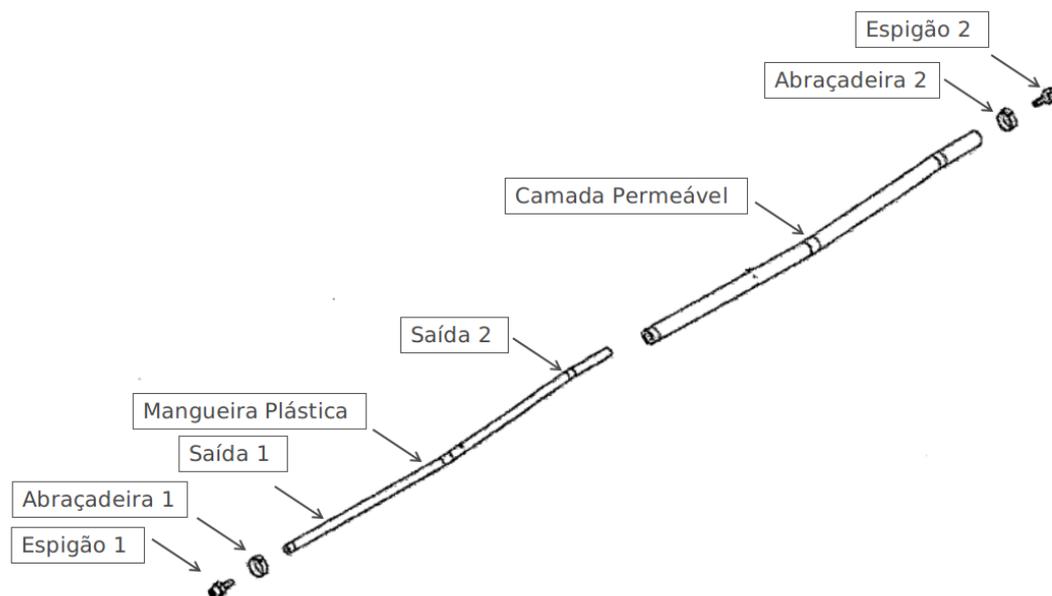
área. Entretanto, a Campo Limpo dispõe de um conjunto aplicador que permite aumentar ou diminuir a vazão independente da velocidade. Assim, diferentes dosagens de calda são indicadas para diferentes níveis de infestação, conforme quatro níveis (Baixo, Médio, Alto e Muito Alto), com o volume de calda variando de oito a cinquenta e seis litros (L) por hectare. As doses de herbicida na calda por unidade de área são indicadas conforme as espécies de plantas alvo, com uma variação de 2 a 5 L de glifosato (480 g/L) por hectare.

A altura de atuação do implemento pode ser controlada por atuadores mecânicos, de forma manual, para atingir diferentes alturas alvo. Um processo de calibragem da bomba, que conduz a calda herbicida até o elemento aplicador, é recomendado antes do início da aplicação, com medição e aferição de volumes liberados para os elementos de aplicação, com abertura e fechamento manual de válvulas realizado por um operador. A vazão pode ser controlada por um painel de controle no qual se altera a velocidade da rotação da bomba peristáltica (PEREZ, 2010).

Os detalhes construtivos dos aperfeiçoamentos registrados junto à patente da Campo Limpo trazem a compreensão detalhada do aspecto construtivo dos elementos aplicadores de modo geral. Os elementos aplicadores, conectados às hastes de distribuição, são compostos por dois espigões, onde a calda entra, duas abraçadeiras de fixação, uma mangueira plástica interna com furação revestida por uma camada externa permeável a líquidos, conforme mostra a figura 3 (PEREZ, 2011).

A calda herbicida é bombeada do reservatório até as hastes de distribuição. As duas hastes são confeccionadas em metal, com uma série de espigões para conexão de

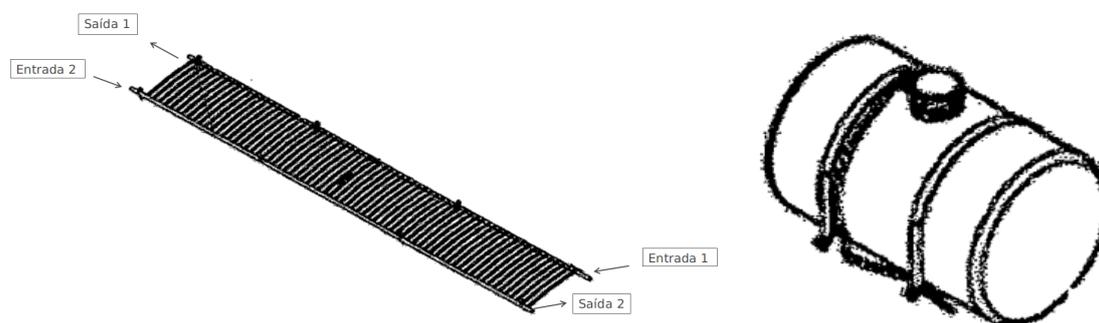
Figura 3 – Representação do interior de um dos elemento de aplicação de herbicida do Campo Limpo e seus componentes construtivos.



Fonte: Perez (2011).

mangueira, conforme mostra a figura 4. A calda é injetada nas hastes em dois pontos localizados nos extremos das hastes em vértices opostos indicados pelas entradas 1 e 2, além de possuir duas saídas utilizadas como retorno para o reservatório.

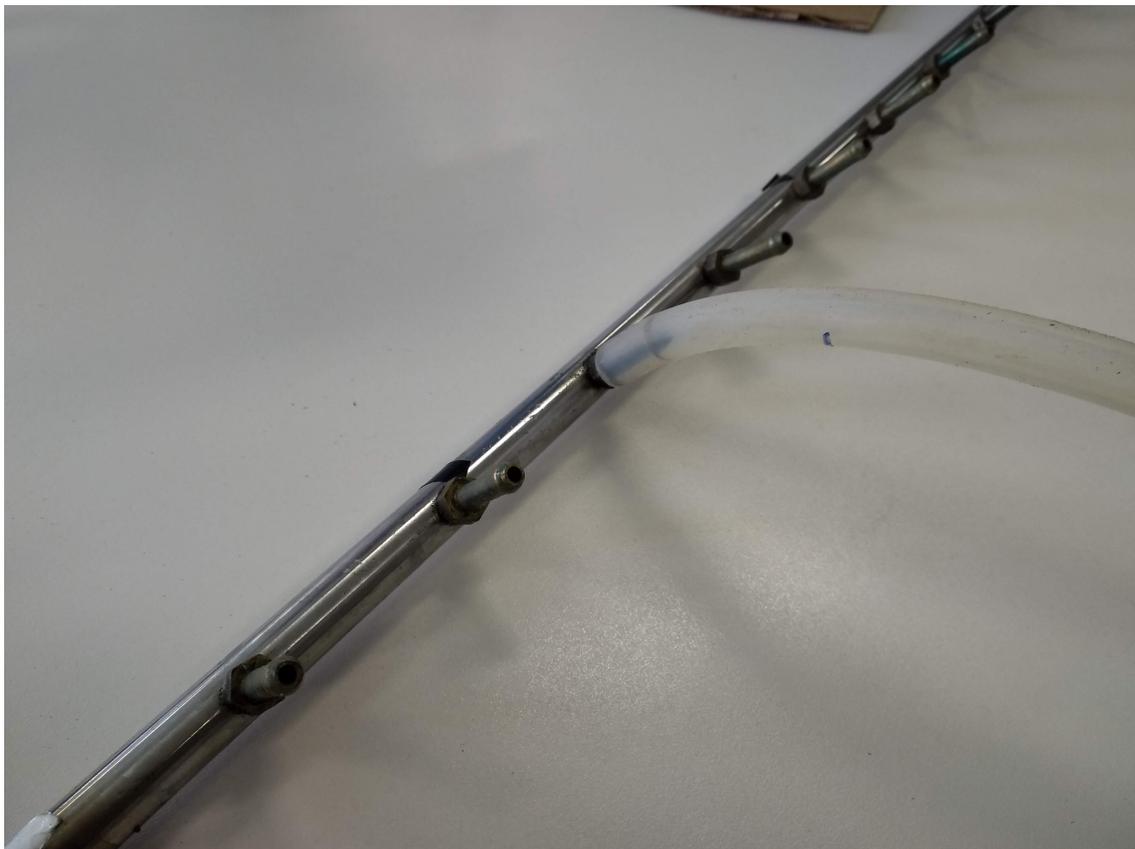
Figura 4 – Representação do reservatório e das entradas e saídas do distribuidor de herbicida do Campo Limpo.



Fonte: Perez (2011).

Um espigão, mostrado pela figura 5, propicia a conexão entre as hastes de distribuição, que são de aço inoxidável e possuem 68 espigões cada, e as 68 mangueiras conectam as duas hastes totalizando 136 espigões para todo o implemento.

Figura 5 – Espigões da haste de distribuição e a mangueira do elemento de aplicação desacoplados do Campo Limpo.



Fonte: Autor (2019).

2.2 Fluidodinâmica computacional

As simulações de fluidodinâmica computacional são usadas no processo de concepção de novas tecnologias, de forma a possibilitar a execução testes antes de construir um experimento físico. A análise de escoamentos de fluidos nas condições da Campo Limpo neste trabalho são modeladas a partir de diferentes equações que consideram características físicas de cada fluido, de cada sistema e de suas fronteiras. As equações de comportamento de um fluido podem descrever o escoamento. Contudo, a resolução de problemas muitas vezes somente é possível por métodos numéricos, embora, em geral, também demandem simplificações e conhecimento empírico para possibilitar a resolução.

A discretização das equações diferenciais em um sistema de equações algébrico é possível com a utilização de recursos computacionais na resolução. A aproximação é conduzida em pequenos domínios no espaço e tempo. Assim, o método numérico

disponibiliza resultados para cada um destes domínios. A resolução de todas essas operações matemáticas são conduzidas em ambiente computacional e, neste contexto, o tempo demandado para o processo varia conforme o número de subdivisões do domínio de estudo, da arquitetura e do ambiente computacional (FERZIGER; PERIC, 2012).

As aplicações para a resolução de problemas de fluidodinâmica computacional são criados a partir de métodos numéricos e a maioria das ferramentas possuem as etapas de pré-processamento, de execução do *solver* e pós-processamento. O pré-processamento consiste na definição de entradas dos *softwares* CDF para a resolução do problema e essas informações são utilizadas pelo *solver* na etapa posterior. Exemplos de entradas são a geometria do volume de simulação assim como as regiões de interesse, definição da forma de divisão do volume em uma malha, definição de propriedades físico-químicas dos sistema, como temperatura, viscosidade e pressão, e especificação das condições de contorno para as células do domínio do fluido em contato com o domínio da fronteira.

Normalmente, a acurácia da solução e os custos em termos de trabalho computacional são diretamente proporcionais ao aumento do refinamento da malha. Os *softwares* com pacotes de ferramentas para estudos de CFD requerem a adaptação de códigos já existentes por parte dos usuários para melhor adaptar a modelagem para os casos mais específicos. Mais de cinquenta por cento do tempo da execução de toda a simulação é gasto na determinação da geometria, da malha e das outras entradas na etapa de pré-processamento.

A etapa do *solver* se constitui na resolução das equações de comportamento do fluido para aplicação em todos os volumes em que a geometria foi dividida, discretização das equações em sistemas de equações algébricas e a solução destes é conduzida por um processo iterativo. Por fim, na etapa de pós-processamento os resultados obtidos podem ser visualizados nos planos cartesianos e em escalas de cores, para melhor compreender os resultados (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

A representação do sistema através da modelagem, puramente a partir de dados experimentais, nem sempre é satisfatória em função da condição de reprodutibilidade do sistema em escala laboratorial e do alto investimento necessário para se obter tal condição de reprodução do sistema real. Nesse contexto as simulações numéricas para resolução de problemas de mecânica dos fluidos ganham espaço com o avanço das ferramentas de computação paralela (FORTUNA, 2000).

2.2.1 Classificação do regime do escoamento

Os escoamentos são classificados em função de características espaciais, viscosas, dinâmicas, temporais e físicas. As classes dos regimes influenciam a escolha nas variáveis de entrada no pré-processamento e na escolha do conjunto de equações que representam o escoamento do fluido. Em alguns casos a categorização se baseia em condições estimadas ou por dados experimentais (POTTER; WIGGERT, 2004).

Um escoamento laminar é dominado pelas forças viscosas de um fluido e escoar sem nenhuma mistura significativa com as partículas vizinhas. Por sua vez, no escoamento turbulento, o movimento do fluido é mais desordenado. O regime (Re) depende de quatro parâmetros físicos: comprimento do campo de escoamento “ D ”; velocidade média no comprimento do campo de escoamento “ U ”; viscosidade cinemática “ μ ”; massa específica “ ρ ”. A metodologia para o cálculo do adimensional, chamado de número de Reynolds, é mostrada na equação 1 seguindo o padrão do Sistema Internacional de Unidades (SI). Quanto maior o valor, maior será a característica de um escoamento turbulento, ou seja, um escoamento com menores efeitos de viscosidade (regime turbulento) (BISTAFA, 2018).

$$Re = \frac{D.U.\rho}{\mu} \quad (1)$$

O escoamento da calda herbicida na Campo Limpo é caracterizado por conter tubulações com variação de diâmetro ao longo do percurso e, por isso, tem sua velocidade média alterada ao fluir por seções de menor área. Uma maior quantidade de fluido deve passar por unidade de tempo e, nestes casos, a velocidade é inversamente proporcional à variação de diâmetro (MITCHELL *et al.*, 2015).

2.2.2 Equações fluidodinâmicas

Um sistema de fluido líquido em regime laminar, considerado, incompressível pode ser descrito pela equação da continuidade e da conservação da quantidade de movimento. Dadas as considerações assumidas, as equações em sua forma geral sofrem uma série de simplificações e possuem formatos diferentes, dependendo das características consideradas para o sistema.

A equação da continuidade é derivada de um conjunto de equações diferenciais

que modelam o escoamento de um fluido a partir da aplicação do princípio da conservação de massa a um volume infinitesimal de controle. A forma geral da equação da continuidade considera a descrição de sistemas compressíveis, já no caso de sistemas incompressíveis a equação é simplificada para o divergente da velocidade “U” igual a zero e “∇” é o operador do divergente e seguem o padrão do SI, conforme equação 2 (POTTER; WIGGERT, 2004).

$$\nabla \cdot U = 0 \quad (2)$$

A resolução matemática da equação diferencial da quantidade de movimento demanda sua decomposição em três equações escalares na tentativa de descrever os campos vetoriais da velocidade e da pressão. Esse conjunto de equações possui componentes de tensão normal e cisalhamento do sistema atuando em cada ponto particular de um fluido. As equações gerais da continuidade e da quantidade de movimento aplicadas com as devidas considerações são conhecidas por equações Navier-Stokes, a forma simplificada da equação da quantidade de movimento é representada na equação 3. Na equação as variáveis “U” representa a velocidade, “t” o tempo, “p” pressão, “ρ” massa específica, “g” gravidade e “ν” viscosidade dinâmica e seguem o SI.

$$\rho \frac{\partial U}{\partial t} = -\nabla p + \rho g + \nu \nabla^2 U \quad (3)$$

Os esquemas numéricos de resolução de integração temporal, de divergente, de gradiente, de laplaciano, de interpolação, assim como os *solver* utilizado, variam dependendo das condições do escoamento e da forma de implementação das aplicações CFD. Geralmente a responsabilidade da definição destes parâmetros são do usuário e afetam diretamente os resultados gerados (POTTER; WIGGERT, 2004).

2.3 Análise de processamento e exploração do paralelismo

As instruções dos programas de fluidodinâmica computacional são dependentes de um conjunto de *software* de sistemas para traduzir os comandos e criar a interface com o *hardware*. O sistema operacional faz parte desse grupo e é importante para manipular as operações básicas, gerenciar memória, viabilizar e controlar o uso das diversas aplicações e com ou sem uso simultâneo do computador. O compilador, por sua vez, traduz um

programa escrito em uma linguagem de programação de alto nível para uma série de instruções legíveis para o sistema de *hardware*.

Um computador é composto genericamente por dispositivos de entrada (mouse e teclado), dispositivos de saída (monitor), a memória e o processador. A memória de acesso aleatório (*random access memory* - RAM) em geral é utilizada para armazenar as instruções e os dados do programa e, também, é uma memória de acesso não sequencial. A memória *cache* é uma memória geralmente pequena, significativamente mais veloz que RAM. O processador é a parte ativa do computador, ele executa os cálculos necessários para responder as ações requisitadas, normalmente pode ser referenciado como *central process unit* (CPU) e é composto basicamente por unidade de controle, unidade lógica e aritmética, registradores e barramentos (PATTERSON; HENNESSY, 2005).

A computação paralela é um tipo de execução de vários processos (programas em execução) mantidos simultaneamente. Um problema pode ser dividido em partes menores e as partes serem executadas ao mesmo tempo. A execução dividida dos programas ocorre em duas ou mais CPU e, posteriormente, os resultados são reconstruídos para o estado inicial. Uma das principais vantagens do paralelismo é a capacidade de resolver os mesmos cálculos em menor tempo, de utilizar processamento simultâneo e de reduzir o custo de processamento (CENTRO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO, 2012).

Um conjunto de computadores usado como um centro de processamento distribuído é genericamente chamado de *cluster* de alto desempenho. Essa técnica de processamento é explorada em diferentes ambientes, tanto por unidades de processamento com elevado número de núcleos quanto por unidades com elevado número de máquinas conectadas em rede. As arquiteturas de computadores para execução de processamento paralelo variam e possuem diferentes características. A aplicação da memória de uma unidade de processamento pode ser compartilhada, distribuída ou utilizada em um sistema híbrido.

Os computadores paralelos podem ser classificados conforme a taxonomia de Flynn. Nesta taxonomia as possibilidades de classificação destes computadores com múltiplos processadores são quatro e são delineadas sobre dois eixos e duas ramificações, instruções e dados podendo ser simples ou múltiplos. As memórias destes computadores podem ser compartilhadas, quando múltiplas CPU acessando uma memória centralizada (*uniform memory architecture* - UMA) ou quando cada CPU possui sua memória e pode usar a memória de outra CPU (*non-uniform memory architecture* - NUMA). A arquitetura

pode ser distribuída em diferentes CPU conectadas por uma rede de comunicação, os processadores se comunicam e as memórias são utilizadas individualmente. Além das duas configurações isoladas, existem arquiteturas híbridas distribuídas e compartilhadas simultaneamente, ou seja, são unidades de controle que gerenciam seus recursos independentemente com seus processadores conectados por uma rede de comunicação.

As unidades de processamento compartilhado são vantajosas pelo endereçamento global da memória que permite um acesso mais rápido à informação quando comparados a ambientes de rede de memória distribuída. Uma desvantagem é a baixa capacidade de escalabilidade principalmente pelo custo financeiro de projetos de CPU com múltiplos processadores, quando comparado com os de memória distribuída. A solução mais utilizada atualmente é a configuração híbrida, isto é, várias unidades de processamento conectadas por alguma tecnologia de redes com o cuidado da limitação no desempenho por um outro fator (CENTRO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO, 2012).

2.3.1 Protocolos de comunicação

Uma rede de computadores permite a conexão entre dois ou mais computadores, viabilizando o compartilhamento de dados e também de recursos de *hardware* e *software* entre as máquinas. Enlaces de comunicação entre as máquinas que pertencem à rede são estabelecidos com diferentes tecnologias sobre meios físicos, sendo cada elemento da rede nomeado nó. Esta conexão pode ocorrer diretamente entre os nós ou por meio de dispositivos chamados de comutadores de camada de enlace (*switches*). A tecnologia mais disseminada para comunicação entre computadores em redes locais cabeadas é a Ethernet, padronizada pela IEEE por meio do grupo 802.3. Esta evoluiu ao longo dos anos, partindo de uma vazão de poucos mega bits por segundo (Mbps) na década de 70 e chegando recentemente à uma centena de giga bits por segundo (Gbps). Atualmente, a maioria dos computadores e *switches* são equipados com interfaces Ethernet capazes de auto negociar enlaces de comunicação a 100 Mbps ou 1 Gbps.

Os protocolos são padrões de comunicação utilizados pela infraestrutura de rede para transmitir o sinal de uma máquina à outra. As interações entre os computadores se dão por meio de camadas de protocolos (pilha de protocolos), nos quais cada uma é responsável por diferentes serviços de comunicação. As redes locais são redes de computadores relativamente próximos geograficamente (dezenas de metros).

Nessas, os computadores e os demais dispositivos estão de alguma forma diretamente interconectados (PATTERSON; HENNESSY, 2005). Um nó de uma rede local pode se comunicar com nós de outras redes locais por meio de um protocolo de camada superior e elementos de rede que fazem o roteamento de pacotes entre elas.

Assim, os nós possuem endereços de acordo com o protocolo usado em cada camada, sendo estes necessários para identificar origem e destino dos pacotes de dados. Embora conceitualmente uma rede local se estabeleça por meio da camada de Enlace, com a disseminação da Internet, popularizou-se a organização das redes com base na sua pilha de protocolos, com destaque para os protocolos da camada de rede e de transporte, sendo a última responsável por fornecer dois modelos de comunicação para as aplicações.

Na camada de rede aparece o Internet Protocol (IP). O endereço IP é atribuído a uma interface de rede, de modo que, por meio de protocolos auxiliares, seja possível descobrir o endereço de camada de enlace (Ethernet) correspondente e com isso viabilizar a comunicação entre nós dentro de uma rede local sem envolver elementos de roteamento.

Já os protocolos da camada de transporte garantem um canal de comunicação entre aplicações executando em diferentes nós concebidas de acordo com o modelo cliente-servidor. O Transmission Control Protocol (TCP) e o User Datagram Protocol (UDP) são exemplos de protocolos da camada de transporte, sendo que o primeiro prioriza a confiabilidade na entrega de pacotes de dados enviados, enquanto o segundo prioriza a transferência de dados com menor latência mas sem controle de entrega. Portanto, a escolha do protocolo acaba sendo determinante para aplicações, sobretudo em *clusters*, que precisam equilibrar garantia de entrega com baixa latência

2.3.2 Métricas de desempenho computacional

O desempenho computacional está correlacionado fortemente com o tempo de execução de uma determinada tarefa e quando comparados entre si determinam quantas vezes um computador é mais veloz que o outro. A avaliação de desempenho de sistemas computacionais é complexa, considerando a complexidade e a escala das aplicações utilizadas atualmente. A demanda de cada aplicação é sensível a diferentes aspectos do ambiente computacional, por isso a compreensão da dinâmica das instruções sob o *hardware* é imprescindível para a melhoria da eficiência de um *software*.

O tempo de execução de um programa é a principal forma para avaliação do desempenho de um sistema computacional. Quanto se analisa o desempenho para um

programa específico, de forma estática, com foco na CPU, normalmente é utilizado como métrica o **tempo de CPU do usuário**, o qual é determinado pelos ciclos de *clock* gastos e o tempo do ciclo de *clock*. Cabe destacar que a quantidade de ciclos gastos por um programa é influenciada pelos ciclos de *clock* por instrução, sendo dependente de aspectos arquiteturais, de organização (uma mesma arquitetura pode ser implementada de diferentes formas) e do próprio programa (sequência de instruções que serão executadas, as quais podem apresentar níveis de complexidade computacional diferentes). Por outro lado, quando se deseja analisar o tempo total para completar uma tarefa, envolvendo não apenas o tempo de CPU decorrente das características do programa mas também as atividades de entrada e saída, acesso aos diferentes níveis de memória e também os recursos gastos por outros programas (tendo em vista que diversos programas, junto com o sistema operacional, compartilham o uso da CPU), utiliza-se a métrica **tempo de resposta**, isto é, o tempo decorrido entre o início e o final da execução do programa do usuário (PATTERSON; HENNESSY, 2005).

A equação 4 exemplifica a relação entre os tempos de execução de dois computadores. Supondo que o tempo de execução em segundos do computador 1 (t_1) é menor que o computador 2 (t_2), o valor resultante (n) será o número de vezes que o primeiro é mais rápido que o segundo (PATTERSON; HENNESSY, 2005).

$$n = \frac{t_2}{t_1} \quad (4)$$

O termo escalabilidade é usado para definir uma qualidade de um sistema acomodar maior número de elementos para processar de forma a não gerar atrasos indevidos e sem consumo improdutivo de recursos computacionais. A escalabilidade vertical é a capacidade de realizar um trabalho computacional com acréscimo ou manutenção do desempenho com a adição de recursos de *hardware* e *software* em cada nó de processamento, já a escalabilidade horizontal aponta para a inclusão de novos nós de processamento (PATTERSON; HENNESSY, 2005).

No contexto de computação paralela, a Lei de Amdahl busca analisar o ganho de tempo de execução com o aumento de processadores, de forma a estimar o número cujo tempo de processamento está no limite de ganho do caso estudado. O *speedup* é uma forma de contabilizar o efeito do aumento de velocidade de processamento que pode ser quantificada a partir da razão entre o tempo total da execução em série (t_s) e em um cenário de computação paralela (t_p) considerando o mesmo caso, representado na equação 5. A escalabilidade correlaciona a velocidade de processamento com o efeito

da inclusão de novos cores (CENTRO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO, 2012).

$$speedup = \frac{t_p}{t_s} \quad (5)$$

2.3.3 Passagem de mensagens

As tarefas computacionais com uso de paralelismo compartilham um mesmo conjunto de dados e cada CPU processa uma parte deste conjunto. Em sistemas híbridos, mesmo dentro dos nós, há o acesso compartilhado da memória que é controlado pelas aplicações e pelo sistema operacional. A passagem de mensagens, normalmente, está associada a um ambiente de memória distribuída, no qual múltiplas tarefas são distribuídas para os processadores e cada um utiliza o seu próprio espaço de memória e durante o processamento compartilham dados por comunicação (CENTRO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO, 2012).

2.3.4 Granularidade

A análise da influência do tempo da comunicação no tempo total do processamento é conduzida pela granularidade, que é representada pela equação 6. A granularidade grossa indica um sistema com cada processo gastando significativo tempo executando instruções sequenciais e reduzida comunicação, já a fina indica restrito tempo gasto com instruções em série e substancial comunicação. A velocidade da comunicação e o volume de dados são fatores importantes para evitar perda de tempo excessivo com comunicação.

$$granularidade = \frac{\text{tempo de computação}}{\text{tempo de comunicação}} \quad (6)$$

2.4 Software CFD

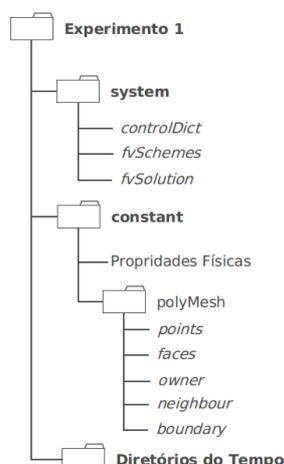
O OpenFOAM é um pacote de *softwares* desenvolvido em bibliotecas utilizando C++, o qual foi escolhido para aplicação nesta pesquisa entre outros *softwares* em função da capacidade de exploração de recursos de paralelismo, por possuir código fonte

aberto e ampla capacidade de adaptação aos sistemas mais específicos. O *software* é genericamente usado e é baseado na interseção de várias ciências com público acadêmico e comercial. O OpenFOAM é usado amplamente para resolver problemas complexos nas linhas de escoamento, sistemas turbulentos, transferências de calor, dinâmica dos sólidos e eletromagnetismo.

O *software* pode ser instalado em diferentes sistemas operacionais, inclusive nas versões mais recentes do Linux. Neste sistema, o usuário do OpenFOAM não possui uma interface gráfica nativa. A execução de comandos é realizada via terminal, dentro dos diretórios do estudo de caso. Há tutoriais disponibilizados pela comunidade usuária do *software* e normalmente as abordagens são baseadas nos arquivos destes tutoriais, mas é importante enfatizar a necessidade de adaptação às condições analisadas em cada caso, inclusive com a mescla de diferentes tutoriais para compor um novo estudo.

Um conjunto de bibliotecas básicas é necessário para o desenvolvimento dos estudos, como, por exemplo, o conjunto de pastas pertencentes ao tutorial *cavity* mostrado na figura 6, que é uma modelagem de fluxo em duas dimensões. No diretório “*polyMesh*” constam os conjuntos de arquivos que compõem a geometria final disponível para o *solver*. Os parâmetros das ferramentas e parâmetros gerais do simulador são alocados no diretório “*system*” e os diretórios de tempo são escritos concorrentemente conforme a execução do *solver* (OPENCFD, 2019).

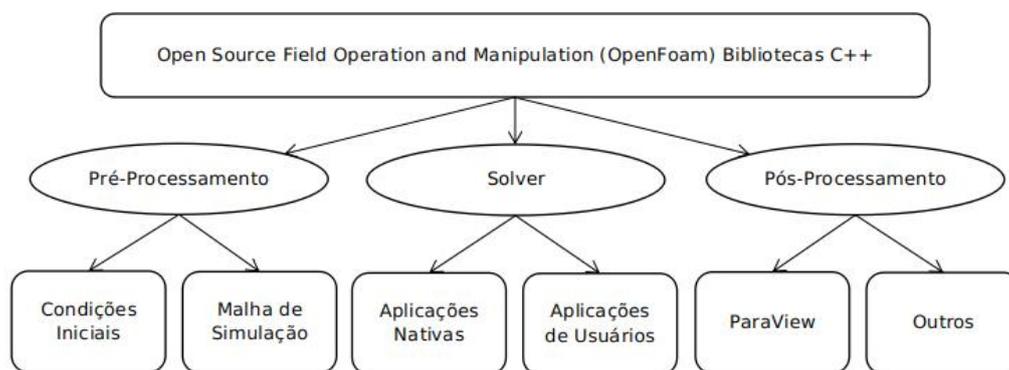
Figura 6 – Representação dos diretórios de estudo de caso básico do *software* de CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

A aplicação conta com as ferramentas de pré-processamento, *solver* e o pós-processamento, conforme mostra a figura 7. Na etapa de pré-processamento, a construção do conhecimento necessário para efetivamente definir o ambiente propício para estudo demandam mais tempo do usuário do que as demais. Nesta etapa acontece todo o levantamento bibliográfico das variáveis físicas que envolvem o problema e da construção da malha de volumes de controle.

Figura 7 – Fluxograma das etapas da construção de estudo de caso de simulação do *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Adaptado de OPENCFD (2019).

O *software* permite o uso de técnicas de processamento paralelo, o pacote disponível pelo projeto Open MPI possibilita a alteração do método de processamento de algumas das ferramentas do OpenFOAM, como por exemplo o SnappyHexMesh, CheckMesh e, também, os próprios *solvers*. A decomposição das ferramentas em múltiplos processos é conduzida de forma semelhante, mas com suas peculiaridades. Somente o diretório *contant* é usado após o processamento da SnappyHexMesh.

2.4.1 Geração da malha

O BlockMesh é um gerador de malha oferecido pelo OpenFOAM que pode criar malhas paramétricas com arestas curvas. A malha é criada a partir do arquivo chamado *blockMeshDict* localizado na pasta *system* do caso ou na pasta *polyMesh*. O modelo deste arquivo pode ser encontrado em uma série de casos com diferentes abordagens de sistemas representados por malhas. A geometria da malha pode ser composta de um ou mais blocos e para cada um deles os pontos representantes dos vértices devem ser declarados. Os vértices são descritos por coordenadas em três dimensões e a sugestão

do modelo é gravar eles em variáveis para posteriormente serem invocados em cálculos futuros (FOUNDATION, 2017).

No arquivo *blockMeshDict* os vértices são declarados para gerar a forma geométrica desejada com dimensões maiores do que a almejada para a malha final, ou seja, se a malha final tem 60 cm de comprimento, a malha de fundo deve possuir mais do que sessenta centímetros. Após as estruturas serem criadas, as faces da forma geométrica são declaradas também a partir de seus respectivos vértices, outrora declarados. Temporariamente, estas faces serão as regiões da malha, até a sobreposição por parte da SnappyHexMesh. A malha de fundo ainda pode ser dividida em blocos menores através de parâmetros para obter divisões próximas das menores dimensões do volume de controle (OPENCFD, 2019).

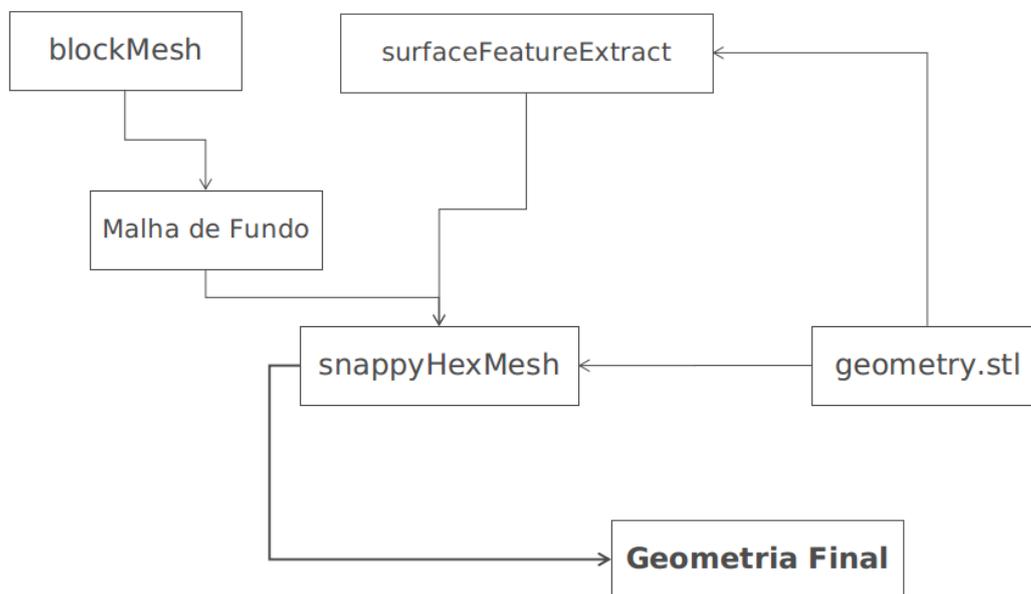
2.4.1.1 Ferramenta de refinamento da geometria

O fluxograma representado pela figura 8 mostra as etapas para a execução completa do SnappyHexMesh e indica algumas entradas para viabilizar o uso da operadora de malha. Inicialmente, um desenho foi desenvolvido em um ambiente de CAD com as medidas reais do sistema e gerado um arquivo do tipo STL, abreviatura da palavra inglesa *stereolithography* sem tradução literal, que é um arquivo descritivo de toda uma forma tridimensional com a possibilidade de estar dividido em diferentes regiões no mesmo arquivo.

Estas regiões são as fronteiras do sistema que podem ser declaradas no ambiente CAD (*computer-aided design*) dependendo do *software* selecionado. Considerando o escoamento de um líquido em um tubo com uma entrada e uma saída, na prática as fronteiras são as entradas, saídas e paredes do sistema e elas precisam estar separadas e não como um único sólido dentro do ambiente de simulação, para, posteriormente, serem atribuídas as condições de contorno das mesmas (DYNAMICS, 2020).

Paralelamente, o BlockMesh também é uma das entradas com a malha de fundo com formato que permita o SnappyHexMesh esculpir a forma desenhada no arquivo STL. Além das já mencionadas, outras entradas se fazem necessárias, por exemplo, um arquivo descrevendo com os ângulos descritos pelas faces do desenho do STL e, em alguns casos, o uso de arquivos do tipo OBJ (*object*) descrevendo o desenho criado em CAD. Estes são gerados a partir da ferramenta SurfaceFeatureExtract baseada em um dicionário específico com limite para os ângulos que serão considerados e da possibilidade de conversão do arquivo STL para OBJ. A ferramenta é executada em etapas e na biblioteca

Figura 8 – Fluxograma da ferramenta de refinamento da malha de simulação *SnappyHexMesh* do software CFD OpenFOAM.



Fonte: Adaptado de Foundation (2017).

é possível definir características para refinamento da malha, criar formas geométricas simples, ajuste da malha para diferentes geometrias disponíveis e para adicionar camadas quando necessário para as fronteiras (DYNAMICS, 2020).

2.4.1.2 Refinamento da malha

A ferramenta *SnappyHexMesh* é capaz de, a partir de uma região definida, aumentar as divisões dos volumes de controle gerados pela *BlockMesh* em locais definidos na área *castellation*. Nesta etapa podem ser definidos níveis de refinamento nas diferentes regiões já declaradas, na geometria como um todo, ou manter as configurações padrões abdicando da inserção de valor algum. Ainda na mesma subdivisão, é necessário se incluir um ponto do plano cartesiano referencial da malha localizado dentro da malha, em casos de uma malha interna, ou fora dela, em casos de malha externa. Um exemplo de malha externa é um ambiente para estudos de aerodinâmica (FOUNDATION, 2017).

A resolução dos problemas varia muito com a capacidade de processamento do computador utilizado, contudo as simulações podem durar algumas horas e até dias de operação dependendo da complexidade, por isso o processamento paralelo é fundamental

para a resolução de problemas complexos de fluidodinâmica computacional. A escolha dos conjuntos de equações com possível uso está centralizada no *solver* e seus diversos parâmetros. Os tutoriais e suas aplicações propiciam um primeiro entendimento dos *solver* mais adequado para cada caso de forma a considerar as características de cada ambiente físico de simulação.

O uso de processamento paralelo está inserido em algumas etapas do processo do OpenFOAM utilizando o arquivo *decomposeParDic* para inserção dos atributos. A seleção do número de processadores é feita no diretório e na linha de comando inserida no terminal, a *SnappyHexMesh* e o *solver* *IcoFoam* são exemplos de possíveis aplicações de paralelismo (FOUNDATION, 2017).

O OpenFOAM disponibiliza uma ferramenta para dividir os arquivos STL em diferentes regiões (*SplitMeshRegions*) e nomeia, por padrão, as diferentes superfícies com ângulos maiores do que o definido em graus como atributo na linha de comando do terminal. O nome dado as regiões serão referências ao longo de toda a simulação, inclusive para a atribuição das condições de contorno. As faces podem ser identificadas através do padrão dos vetores normais e os pontos da superfície que as compõem, ou seja o conjunto de dados com vetor normal igual ou proporcional ao vetor normal do plano (“yz”) será uma região estudada.

2.4.2 Solver

Na biblioteca *controlDict* o *solver* é selecionado, além do tempo de simulação, do degrau de tempo para cada passo da simulação e do intervalo de tempo entre os registros da simulação. A simulação pode ser encerrada a qualquer tempo pelo terminal e o *solver* conta com atributos que possibilitam exportar o histórico para arquivos de texto todos os cálculos (FOUNDATION, 2017).

O usuário é capaz de selecionar os esquemas de discretização dos termos das equações envolvidas no estudo de caso. A seleção de um *solver* depende e varia conforme as condições do ambiente de simulação, como ,por exemplo, escoamento monofásico e escoamento bifásico. Algumas opções de processamento de resultados podem ser vinculadas ao *solver* como funções objeto, que são executadas a cada passo durante a execução da simulação.

A condição de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) é usada para monitorar a convergência da solução numérica de determinada equação diferencial parcial. O

parâmetro da condição aumenta com o aumento do tempo do passo de integração e a sua extrapolação gera resultados da simulação incorretos. O valor aceitável para a condição CFL depende da forma como o indicador é calculado, mas em geral o valor não pode ser superior a unidade.

2.4.3 Pós-processamento

As aplicações CFD normalmente possuem um conjunto de ferramentas que possibilitam a visualização e processamento dos resultados oriundos da simulação. O ParaView é uma aplicação de pós-processamento de análise e visualização de dados de código aberto incluída na instalação básica do OpenFOAM, conforme mostra a figura 7. É apropriado para volumes massivos de dados, utiliza recursos de memória distribuída e computadores pessoais são capazes de rodar a aplicação (AYACHIT, 2020).

Além das funções objeto vinculadas ao *solver*, existem funções de pré-processamento para diferentes operações matemáticas com os resultados. Um conjunto de funções básicas é os operadores matemáticos em vetores localizados em alguma das fronteiras declaradas no ambiente virtual da simulação.

2.4.4 OpenMPI

O OpenMPI é uma biblioteca que disponibiliza uma interface de passagem de mensagem *open source* desenvolvida e mantida pela comunidade de usuários de computação de alto desempenho e foi criada para ser utilizada em arquitetura distribuída. A interface garante a troca de dados entre os nós de processamento, gerencia a demanda da aplicação e a disponibilidade do *hardware*.

2.5 Trabalhos relacionados

O presente trabalho inclui diferentes áreas e apresenta grande amplitude, sendo assim a pesquisa dos trabalhos correlatos foi conduzida por combinação de termos de diferentes áreas. Os bancos de dados do Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), Acesso Livre à Informação Científica da Embrapa (ALICE), Science Direct e Biblioteca Digital Brasileira de Teses e Dissertações (BDTD) foram usados para buscar

resultados com as palavras selecionadas. A presente pesquisa visa explorar possibilidades de uso de *softwares* CFD para melhoramento de um implemento agrícola aplicador de herbicida com viés em aprimoramento do desempenho computacional.

Os resultados obtidos nessa revisão estão apresentados na tabela 1, contando com as seis combinações de palavras pesquisadas e as quatro bases de dados, com base em um limite de dois anos nas datas de publicações. A Science Direct e “CFD herbicida” obtiveram os maiores e os menores quantitativos dos resultados entre todas as combinações. O uso das expressões “herbicida”, “CFD” e “simulação” generalizaram os resultados e trabalhos de diferentes áreas e, principalmente, pouco correlatas ao presente trabalho.

Tabela 1 – Resultados das buscas exploratórias em repositórios de trabalhos científicos com palavras-chave previamente selecionadas.

Palavras-chave	Base de dados			
	ALICE	IEEE	Science Direct	BDTD
CFD herbicida	2	0	32	0
Simulação herbicida	40	0	1286	9
CFD <i>speedup</i>	0	29	247	0
CFD HPC	0	73	426	3
Simulação HPC	1	1321	2180	3
CFD agricultura	10	21	1127	61

Fonte: Autor (2019).

O aumento das especificações nas palavras reduz drasticamente os resultados nas diferentes bases de dados como “CFD agricultura herbicida”, embora “simulação herbicida agricultura” gerasse um maior número de resultados. A maioria dos artigos possui semelhanças com partes e não do todo do atual trabalho, por exemplo, Ni *et al.* (2019) utiliza *software* CFD proprietário para buscar prever o comportamento dos ventos em uma propriedade rural, Zhenjun *et al.* (2019) estuda o comportamento do escoamento no interior de uma bomba magnética utilizada para aumentar a eficiência do equipamento com uso de *software* CFD e Sedano, Aguirre e Brizuela (2019) usa *software* CFD proprietário para simular a deriva de herbicida em aplicações com bicos aspersores. Nos primeiro e terceiro casos há um cunho aplicado das pesquisas mas sem explorar as potencialidades de um *software* livre ou de aplicações em diferentes ambientes computacionais.

Uma segunda pesquisa bibliográfica foi dedicada para explorar três eventos CFD e HPC envolvendo os principais assuntos do atual trabalho. O evento da Escola Regional

de Alto Desempenho do Rio Grande do Sul (ERAD/RS) em 2019 trouxe somente um trabalho envolvendo a temática do agronegócio no trabalho de Vasconcellos *et al.* (2019). O Congresso Brasileiro de Fluidodinâmica Computacional (CBCFD) em 2018 teve três publicações de aplicações de *softwares* CFD no âmbito da agropecuária, os quais se tratavam de indústria de fertilizantes e um voltado para pesquisa em aquicultura e, em todos os casos, houve uso de *softwares* proprietários. Por fim, International Conference on Computational Fluid Dynamics (ICCFD) em 2018 não teve trabalhos com foco e direcionados as ciências agrárias.

Além das pesquisas com caráter de entendimento das fronteiras do conhecimento do atual trabalho, alguns artigos foram importantes para o desenvolvimento dessa pesquisa. Uma síntese de quatro trabalhos foi desenvolvida para contextualização de aspectos práticos da construção das malhas, execução do *solver*, exploração de paralelismo e propostas de melhorias.

2.5.1 Ferramentas de fluidodinâmica computacional

O artigo de Mohiuddin e Mathkour (2015) é bastante relevante para entender as principais nuances entre alguns *softwares* CFD. O objetivo foi comparar as potencialidades de diferentes aplicações CFD a partir de uma série de critérios estabelecidos, como a capacidade de utilização de processamento paralelo, presença de interface gráfica entre outros. Cada um é vinculado a uma nota para realizar um comparativo quantitativo entre diferentes *softwares* de fluidodinâmica computacional, embora os pesos e as notas são relativas a interpretação dos autores.

Os *softwares* testados foram o OpenFOAM, SU2, PyFR, CodeSaturn e Palabos, que são todos *open source*. O OpenFOAM teve 88% de nota e pontuou em todos os critérios elencados como desejáveis para um *software*, mostrando-se uma ferramenta que pode ser explorada para resolução de problemas de escoamento, transferência de calor e até reações químicas (MOHIUDDIN; MATHKOUR, 2015).

2.5.2 Um esquema dinâmico de reparticionamento de malha para simulações de rompimento de barragem no OpenFOAM

O artigo de Wang *et al.* (2016) simula um tutorial com um caso de rompimento de uma barragem com duas fases de fluido e é um artigo que usa o OpenFOAM como uma plataforma de testes de desempenho. O principal resultado é o estudo do sistema sobre um ambiente computacional com uso de paralelismo composto por duas CPU e com 418 nós de processamento.

O trabalho estuda uma abordagem de um teste para avaliar um ambiente, avaliando se o aumento do número de processadores, aumenta efetivamente a velocidade de processamento para a resolução do estudo de caso, considerando os incrementos na arquitetura de processamento e o *speedup* ótimo e o obtido para cada ponto.

2.5.3 Otimização de desempenho do OpenFOAM em *clusters* de processadores

O trabalho de Ojha *et al.* (2017) teve como objetivo otimizar a performance do OpenFOAM para processamento serial e paralelo, utilizando um processador específico. O sistema simulado foi um tutorial de um escoamento externo dos efeitos gerados por uma motocicleta em movimento, o qual demanda significativo trabalho computacional para resolução.

O número de células foi um dos fatores selecionados para aumentar a demanda de operações matemáticas durante a resolução do sistema. As diferentes estratégias resultaram em ganho no conhecimento sobre a influência de diferentes processadores em relação a otimização do processamento (OJHA *et al.*, 2017).

2.5.4 Análise numérico-experimental da agitação de calda em reservatórios de pulverizador agrícolas

Mitchell *et al.* (2015) desenvolveu um trabalho voltado para um pulverizador agrícolas e a resolução de um problema operacional do equipamento. O problema foi abordado com uso de ferramenta de simulação CFD comercial chamada ANSYS CFX e busca descrever o comportamento da calda de sulfato de cobre e cal para identificar possíveis locais de depósito destes componentes.

A simulação em três dimensões possibilitou a identificação dos campos vetoriais dentro do tanque. Ao confrontar os resultados da simulação com observações do implemento após as atividades, foi possível notar a correlação entre as regiões de menor velocidades da simulação e os referidos locais do reservatório com depósito do sal pulverizado. O agitador pode então ser dimensionado a partir de uma correlação entre a geometria e a velocidade crítica para não ocorrerem depósitos.

3 METODOLOGIA EXPLORATÓRIA

As publicações relacionadas ao aplicador de herbicida seletivo foram consideradas em toda a pesquisa, para basear as premissas nas análises e as soluções propostas. A construção do conhecimento relacionado a sua operação foi fundamental para dar forma ao problema e justificar o viés desta pesquisa.

A implementação da metodologia englobou grande parte do conhecimento discutido no capítulo de revisão da bibliografia. Além disso, a simulação demandou dados experimentais para definição de condições iniciais dos estudos. Cada um dos ambientes simulados no OpenFOAM foi construído baseado em uma geometria e as estratégias de concepção foram particulares. Contudo, existiu a possibilidade do reuso de informações em casos específicos. A metodologia exploratória teve por objetivo conduzir um ambiente de simulação amparado em condições semelhantes as de operação real da roçadeira Campo Limpo, considerando o uso de *software* CFD.

3.1 Materiais e métodos exploratórios

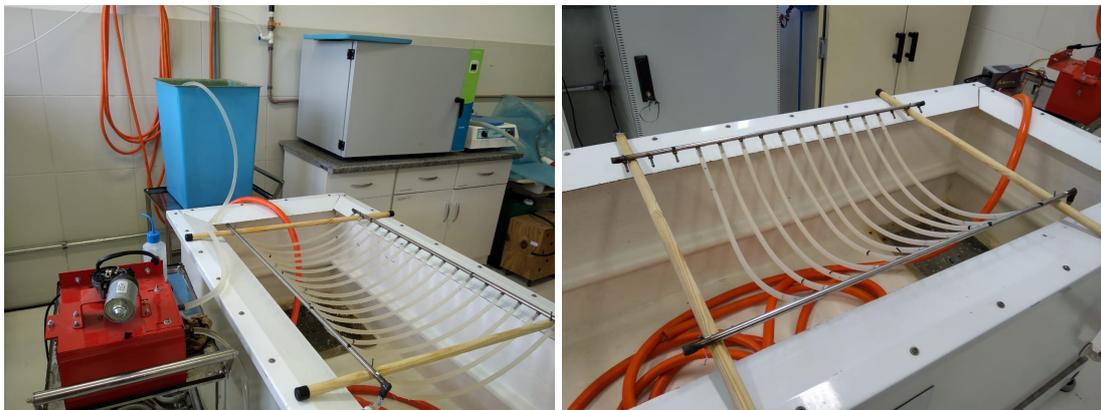
Os experimentos laboratoriais foram necessários para a obtenção das condições fluidodinâmicas iniciais e para viabilizar as experimentações com o simulador, uma vez que não existiam estudos de escoamento na própria Campo Limpo. Os experimentos computacionais para prever comportamento o escoamento foram conduzidos a partir da construção da malha de forma progressiva em função de sua complexidade.

Uma parte do implemento foi levada para o laboratório para realizar ensaios com cenários controlados. Essa secção do implemento conta com quinze mangueiras conectadas a duas hastes metálicas com espigões inseridos ao longo do seu comprimento, mostrados na figura 9. Cada mangueira possuía dois furos, 5 cm após das suas extremidades, para propiciar o escoamento da calda. O experimento foi conduzido para aferir a vazão nos furos das mangueiras, que são idênticas as utilizadas na Campo Limpo.

A bomba peristáltica utilizada no experimento foi a mesma bomba utilizada em um dos modelos do aplicador de herbicida. Um motor elétrico move dois rotores ao mesmo tempo e é alimentado com uma fonte de 12 V, um destes rotores contém três eixos móveis de rotação para realizar os deslocamentos a jusante.

A sucção da bomba foi conectada a um reservatório de água de aproximadamente 40 L de capacidade e a exaustão é conectada a um junção do tipo “T” com uma entrada e

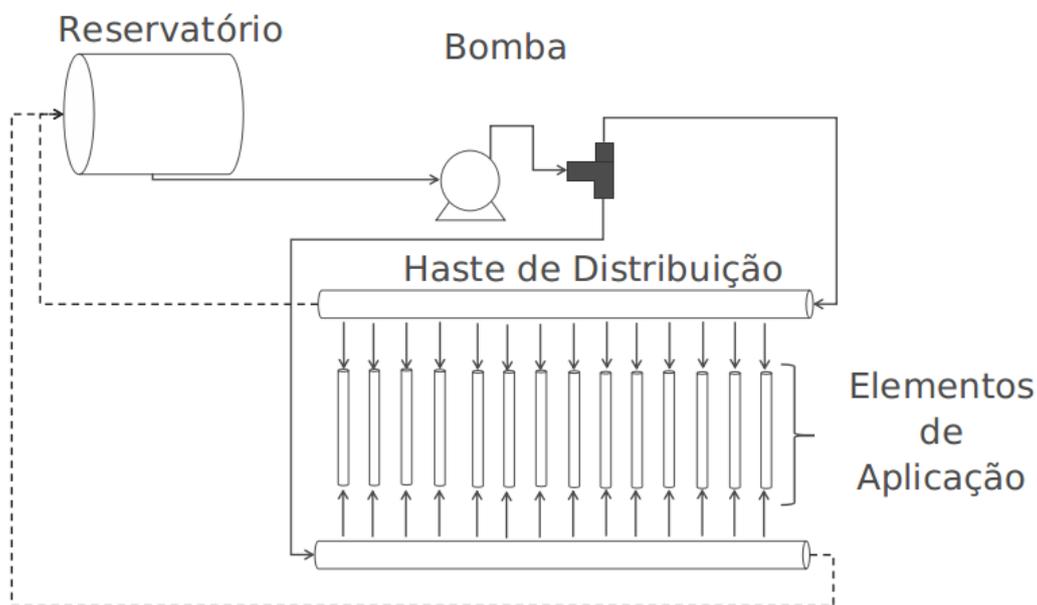
Figura 9 – Experimento laboratorial com parte do distribuidor sem as cordas dos elementos de aplicação e com a bomba peristáltica da Campo Limpo para teste de vazão.



Fonte: Autor (2019).

duas saídas e por fim as hastes metálicas. No implemento, a entrada nas hastes para cada módulo é realizada em lados opostos para cada haste, ou seja, as entradas de água se dão em pontos diagonalmente opostos das hastes, conforme as setas indicando o fluxo do “T” para as duas hastes na figura 10.

Figura 10 – Esquemático dos entes do escoamento do experimento laboratorial com parte do distribuidor da Campo Limpo.



Fonte: Autor (2019).

O implemento e o experimento de laboratório possuíam uma ligação de reciclo no lado oposto a entrada do fluxo nas hastes propiciando o retorno do fluido para o reservatório ao passo que o líquido não saia pelos furos da mangueira. Os caminhos

do reciclo de líquido foram demonstrado pelas setas pontilhadas.

3.1.1 Experimento laboratorial de vazão

Uma proveta de 50 mL foi utilizada para medir volumes e um cronômetro para medir o tempo necessário para se obter tal volume. As medidas foram repetidas em triplicatas para se obter um conjunto de dados mais significativo e todas as medidas foram feitas manualmente. Os pontos de vazão foram feitos nos dois furos das mangueiras, assim os dados representam a alimentação dada pelas duas hastes de distribuição

3.1.2 Experimento laboratorial do efeito do ângulo de aplicação

O experimento foi conduzido para verificação da hipótese do ângulo da aplicação do implemento são variáveis que afetam a vazão de maneira indireta. As medidas de vazão foram tomadas com a retirada da mangueira da haste e a coleta por uma proveta e as angulações testadas (0° , $2,5^\circ$ e 5°) foram dadas por calços de madeira com tamanho específico.

3.1.3 Construção das geometrias

As malhas e condições iniciais foram amparadas por dados obtidos em experimentações práticas que possibilitaram a realização da simulação. Por se tratar de um aplicador seletivo de herbicida, sem estudo científico abordando seus aspectos fluidodinâmicos, algumas informações importantes para o entendimento do escoamento foram obtidas ao longo dos experimentos, além das descritas no capítulo anterior, que foram utilizadas na etapa de implementação.

No intuito de modelar o comportamento do distribuidor de herbicida obtido em laboratório através do simulador, que é o conjunto da haste de distribuição e os elementos de aplicação representado pela figura 10, o volume simulado foi reduzido. Inicialmente a simulação englobou somente um elemento de aplicação, posteriormente, uma haste de distribuição e, por fim, todo o conjunto distribuidor. O processo de geração da malha foi repetido para as três representações.

3.1.4 Simulação da mangueira do elemento aplicador

O elemento aplicador possui em seu interior uma mangueira flexível para conduzir o escoamento da haste de distribuição para a corda, que toca as plantas alvo. O cenário estudado nesta etapa foi o volume de controle dedicado para a mangueira do elemento aplicador, representada na figura 11. O sistema da mangueira foi construído apresentando duas entradas, alimentadas pela haste de distribuição e duas saídas, para conduzir o herbicida para as mangueiras.

Figura 11 – Esquema de entradas e saídas da malha de simulação da mangueira do elemento de aplicação da Campo Limpo.



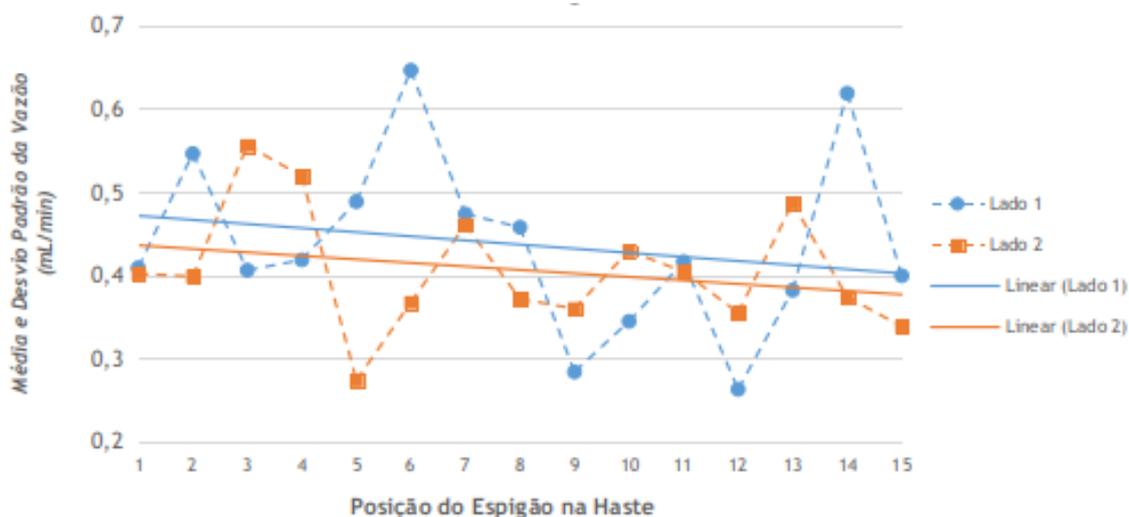
Fonte: Autor (2019).

3.2 Resultados e discussões do experimentos laboratoriais

A figura 12 mostra a dispersão dos dados da vazão coletada em cada furo (saída 1 e 2), para cada lado, e uma linha de tendência para ambos os lados foi proposta para analisar os dados. Uma leve angulação é notada na linha de tendência ao passo que a posição da mangueira se distancia da entrada. Contudo, o coeficiente de correlação dos modelos ficou abaixo de 0,07, o que demonstra uma baixa probabilidade do modelo representar o comportamento dos pontos. Essa baixa correlação pode ser explicada pela diferença na magnitude da vazão verificada entre as mangueiras ao longo da haste de distribuição, o que pode ser devido a algum tipo de anomalia. Embora os modelos não apresentem grande relevância, a média dos dados foi utilizada para determinar a vazão de entrada do sistema da mangueira do elemento aplicador com a bomba acoplada ao distribuidor.

O sistema laboratorial teve seus componentes testados separadamente. Inicialmente a bomba apresentou falha em um dos rotores, o qual estava com uma das mangueiras com sua estrutura colapsada. A estrutura da bomba possui uma posição

Figura 12 – Resultados das medidas das vazões dos espigões no experimento laboratorial, ao longo das hastes de distribuição, com parte do distribuidor da Campo Limpo.



Fonte: Autor (2019).

fixa para as mangueiras, sem batente móvel, o que acaba forçando as mangueiras a se manterem deformadas mesmo quando a bomba está fora de funcionamento, podendo levar ao colapso da mangueira quando submetida a um período prolongado sem uso.

O ar no interior do sistema é um agravante para a medição de vazão, pois as bolhas de ar ao saírem pelos furos durante a medição alteram o resultado da vazão. Conforme é mostrado na figura 10, cada haste é conectada a um entrada e a um saída, que é conduzida por tubulações de volta ao reservatório. Nos testes para a determinação média da vazão da bomba na sua máxima rotação foram encontrados, aproximadamente, 16,05 mL/s de calda, sendo que o escoamento se dava todo pelas mangueiras de distribuição e nada retornou ao reservatório. A tabela 2 mostra os valores das vazões da bomba entre as repetições.

Tabela 2 – Resultados das medidas de vazão da bomba do experimento laboratorial com parte do distribuidor da Campo Limpo.

Repetições	Vazão da bomba (mL/s)
1	15,72
2	15,59
3	15,82
4	16,18
5	16,25
6	16,77

Fonte: Autor (2019).

Os resultados do experimento laboratorial de vazão obtiveram uma média de 0,42 mL/s de calda herbicida por segundo, por furo, com desvio padrão de 0,092 mL/s, considerando os 30 furos das mangueiras com medidas realizadas em triplicatas. Havia uma entrada na mangueira para cada haste de distribuição de calda e dois furos em cada mangueira, e todo o herbicida que saia pelos furos da mangueira estava entrando na mesma vazão pelas entradas da mangueira.

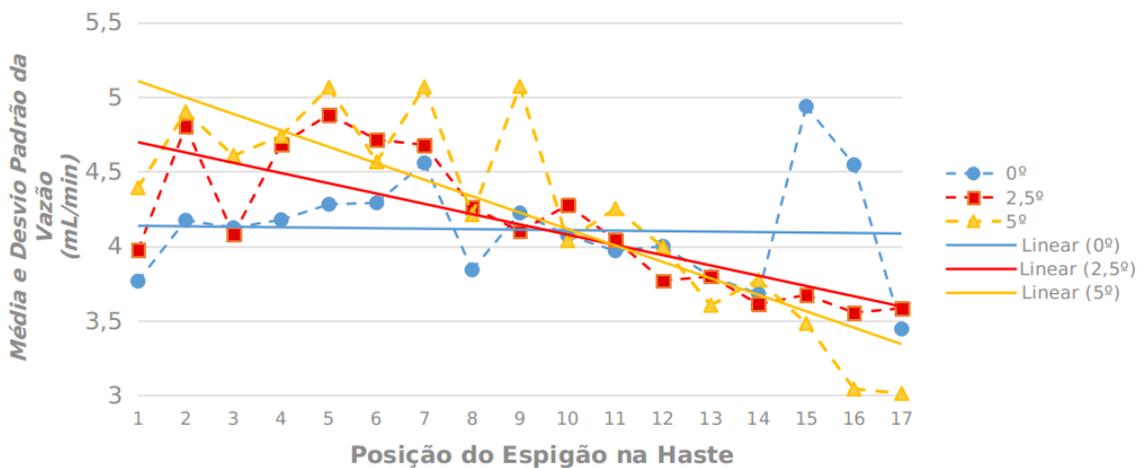
A média das vazões foi utilizada para basear os experimentos computacionais realizados com a mangueira do elemento de aplicação e o somatório das vazões foi utilizado para determinar a condição de entrada da haste de distribuição. O escoamento através dos furos, mensurado no experimento laboratorial, apresentou alguns pontos de irregularidade, ou seja, alguns dos furos das mangueiras apresentaram vazão fora do padrão de sua vizinhança. Um exemplo desta anomalia ocorreu nas mangueiras seis e quatorze, ambas no mesmo lado, as quais apresentaram um valor de vazão acima da média. Aparentemente as mangueiras, espigões e haste de distribuição não apresentam diferenças visíveis. Contudo, uma possível explicação seria a existência alguma anomalia construtiva interna à haste, o que não pôde ser verificado.

A vazão de entrada na haste foi estimada a partir dos dados obtidos nos experimentos laboratoriais sendo calculada através da média da vazão volumétrica para cada um dos furos. Assim, a soma das médias dos 34 furos representa a vazão disponibilizada pela bomba peristáltica para as duas hastes, considerando a inexistência de retorno.

O experimento do efeito do ângulo de aplicação buscou estudar a hipótese de como que o ângulo de inclinação da haste de distribuição pode afetar a vazão dos espigões e propiciar um maior escoamento pelos furos dos elementos de aplicação com menor altura. Considerando a existência desse efeito, a aplicação de herbicida ficaria comprometida pela perda do controle do volume de calda e da dose do composto ativo. A figura 13 mostra as variações das vazões ao longo da haste de distribuição para os diferentes ângulos aplicados ao experimento.

Neste experimento, os valores de vazão não representam a quantidade de saída do fluido no elemento de aplicação, pois foi medida sem a presença da mangueira revestida com tecido. Um caminho preferencial foi traçado pelo fluido, pois os orifícios dos espigões (2 mm de diâmetro) possuem menor resistência ao escoamento, quando comparado aos furos de 1 mm da mangueira do elemento aplicador. Assim, os resultados obtidos foram utilizados somente para a verificação da hipótese da influência em termos

Figura 13 – Vazões dos espigões dispostos ao longo da haste de distribuição de uma sessão da Campo Limpo submetida a diferentes ângulos de operação: 0° ; $2,5^\circ$; $5,0^\circ$, no experimento laboratorial.



Fonte: Autor (2019).

qualitativos.

As linhas de tendência inseridas sob a dispersão dos dados mostram um aumento da vazão dos espigões de posições 1 a 9 e uma redução nas vazões dos espigões de entre 11 a 17, conforme o ângulo de trabalho aumenta. A regressão dos dados indicou coeficientes de correlação de 0,571 e 0,685 nas curvas para os ângulos de $2,5^\circ$ e 5° respectivamente e praticamente nula (0,002) para o ângulo de operação de 0° . A partir deste experimento é possível afirmar de forma qualitativa que o ângulo de aplicação afeta diretamente as vazões ao longo das hastes nas condições testadas em laboratório.

3.3 Resultados e discussões da construção da geometria

As geometrias de fundo foram criadas com o BlockMesh e com dimensões de um paralelepípedo de secção transversal, variando conforme as características da geometria final. Estas medidas foram estipuladas para gerar um sólido que contém as dimensões da geometria descrita no arquivo STL. As malhas foram divididas em partes menores, de forma a criar uma quantidade de divisões capazes de gerar uma resolução satisfatória para o problema.

A tabela 3 correlaciona o número de divisões utilizado para cada geometria de fundo. A dimensão da menor fronteira da geometria possui divisões suficientes para

representar o escoamento nas regiões desejadas da malha. A divisão adotada gerou uma divisão de duas células para cada milímetro no eixo “x” para a geometria da mangueira, pois a menor dimensão desta é o furo na mangueira de 1 mm de diâmetro. A condição descrita pressupõe uma divisão de um espaço construído para representar 70 cm em 1400 partes. A haste de distribuição por sua vez possuía os orifícios dos espigões com 2 mm de diâmetro e a dimensão 90 cm da haste foi dividida em 1000 partes. A geometria do distribuidor foi extrapolada pois ambas as geometrias anteriores estavam contidas nessa geometria, com 17 mangueiras sendo representadas.

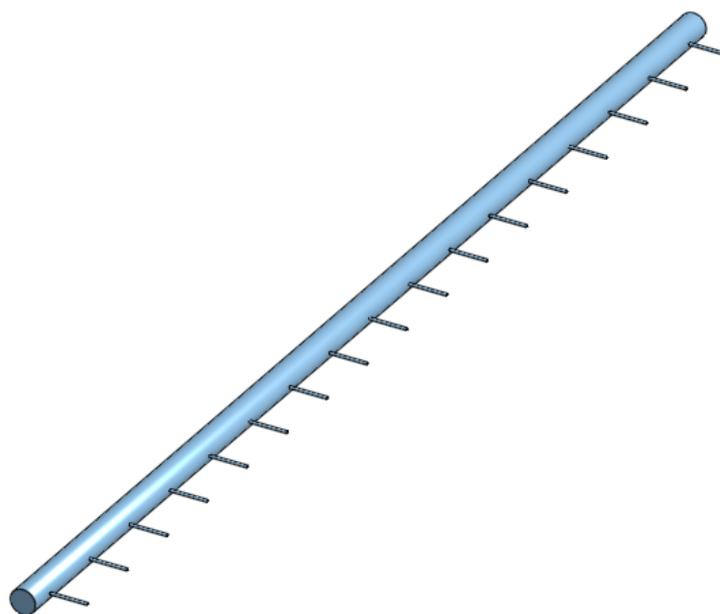
Tabela 3 – Proporções das divisões das malhas de fundo da simulação criadas com a ferramenta BlockMesh no *software* CFD OpenFOAM.

Geometrias	x	y	z
Mangueira de Elemento Aplicador	1400	20	20
Haste de Distribuição	1000	45	45
Distribuidor	1500	2500	45

Fonte: Autor (2019).

O arquivo STL, obtido através do Onshape, gerou um arquivo com sua superfície total declarada, ou seja, uma fronteira única, conforme figura 14.

Figura 14 – Representação modelo da geometria da haste de distribuição da Campo Limpo criado no Onshape no formato STL.



Fonte: Autor (2019).

Os arquivos CAD foram concebidos com as entradas e saídas de interesse em planos paralelos aos planos cartesianos. A simulação fluidodinâmica tem interesse de analisar a superfície separadamente, pois as condições das entradas e saídas foram opostas das paredes de uma tubulação. O arquivo de texto foi submetido a edição de uma ferramenta nativa do OpenFOAM chamada de SplitMeshRegions, que divide a superfície total anteriormente declarada em múltiplas regiões, conforme parametrização para um agrupamento por semelhança considerando o ângulo relativo entre duas faces adjacentes.

O resultado dessa divisão da superfície em regiões de estudo varia conforme a alteração do ângulo limite entre as faces. No caso da haste de distribuição, o número de regiões foi de 58, considerando o ângulo de parametrização de 130° , sendo que o número esperado seria 37. O número de fronteiras, diferentemente do esperado se deu em função do ângulo selecionado. Devido ao maior o ângulo e ao maior número do conjunto de faces arranjado, as fronteiras desejadas foram divididas em mais de uma e, por isso, o arquivo STL deve ser adequado. O parâmetro foi ajustado por tentativa e erro até chegar em um número próximo ao número de regiões esperadas para o sólido declarado e, por fim, todas as fronteiras foram confirmadas. Os números de fronteiras esperadas para cada geometria estão representados na tabela 4

Tabela 4 – Número de fronteiras para os modelos de geometria da Campo Limpo.

Geometrias	Número de Fronteiras
Mangueira de Elemento Aplicador	7
Haste de Distribuição	37
Distribuidor	318

Fonte: Autor (2019).

As informações foram registradas como um vetor normal e três pontos pertencentes a face, conforme Figura 15. O vetor normal foi representado em três dimensões e declarado junto a “*facet normal*” e esta característica auxiliou a identificação de qual era a superfície descrita por este grupo de faces. No caso representado na Figura 15 é uma face não ortogonal a algum plano cartesiano, pois tem componentes de “x” e “y” de aproximadamente 100 e 14 centímetros respectivamente. A componente de “z” é próxima de zero para o vetor normal. Desta forma, essa face descreve a superfície da interface entre a parede da mangueira furada e o escoamento. As coordenadas dos três pontos declarados junto a “*vertex*” auxiliaram a definir qual a posição da mangueira e do furo, considerando as duas hastes de discrição.

A ferramenta de refino de malha SnappyHexMesh utilizou a malha de fundo e o

Figura 15 – Representação do arquivo STL de uma face dos modelos das geometrias

```
facet normal -0.98969 -0.143227 -0.000197554
  outer loop
    vertex 0.567366 0.0198222 -0.004961
    vertex 0.567361 0.0198534 -0.00249787
    vertex 0.56736 0.0198638 -0.004961
  endloop
endfacet
```

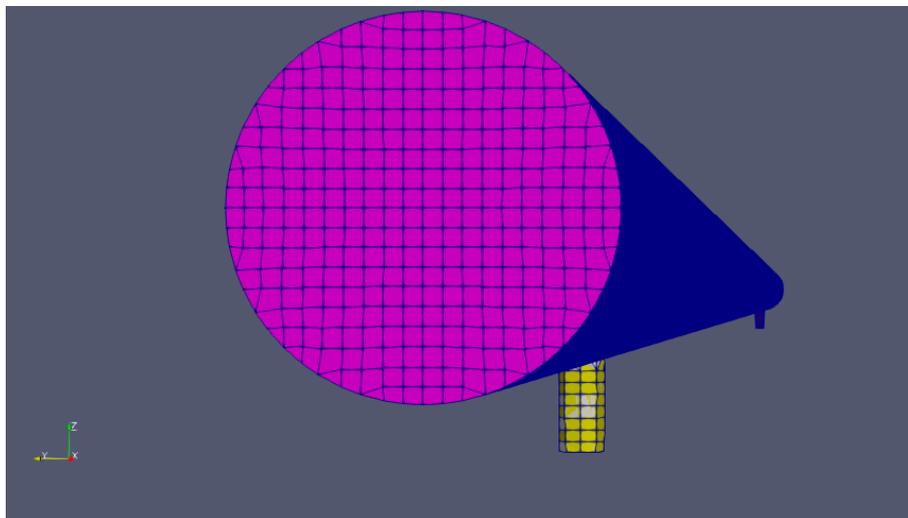
Fonte: Autor (2019).

arquivo STL da geometria desejada em sua execução e composição da geometria final no ambiente de simulação. A solução proposta pelo utilitário SplitMeshRegions apresentou os resultados das segmentações identificadas e adequadas para representar as fronteiras desejadas na simulação.

Os parâmetros gerais da SnappyHexMesh foram importados do tutorial *motorbike* disponibilizado por Foundation (2017), pois o estudo de caso abrange técnicas de refinamento em três dimensões com base em um arquivo STL com a diferença de abordar uma malha externa ao sólido. Dentro do arquivo SnappyHexMeshDict há um sub biblioteca chamada *geometry*, na qual as regiões identificadas anteriormente devem ser declaradas para a ferramenta identificar as faces que as compõem. Os critérios de divisão das células nas diferentes regiões são mantidos constantes dentro da sub biblioteca *castellatedMesh*. Neste contexto, a próxima informação é a indicação de um ponto com três dimensões dentro do malha e é nesta etapa que se define se a malha é externa ou interna em relação ao arquivo STL.

Para executar a ferramenta foi selecionada a opção de processamento paralelo disponível e os processos foram divididos com o utilitário DecomposePar, o qual possuía uma biblioteca definindo o número de processos a ser dividido o trabalho e qual a metodologia usada para conduzir a decomposição. No final da execução da reconstrução dos dados em arquivos com a função ReconstructParMesh com a opção de somente reconstruir o diretório *constant*. As saídas de herbicida do interior da mangueira para a corda possuíam comprimento de 5 mm, que era a espessura da parede da tubulação de plástico e diâmetro de 1 mm. Os furos foram definidos a uma distância de 50 mm da entrada do herbicida em direção ao centro da mangueira, conforme é possível visualizar na figura 16. A malha referente a mangueira possuía aproximadamente 417.000 células distribuídas praticamente de forma uniforme no volume total.

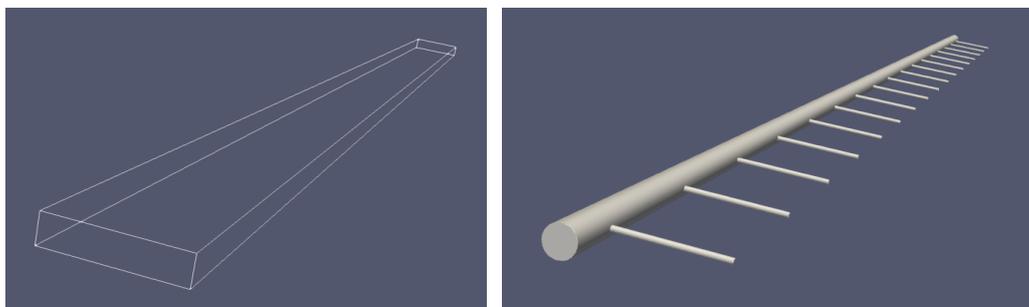
Figura 16 – Representação da malha de simulação da mangueira de um elemento de aplicação da Campo Limpo gerada a partir da ferramenta ParaView do *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

A malha da haste de distribuição foi construída com 17 espigões, que foram conectados às entradas da mangueira representada anteriormente. A figura 17 representa malha de fundo (a) e a malha da geometria final da haste (b). A malha foi composta por um conjunto de mais de 422.000 de células para a sua construção. A malha do distribuidor não foi gerada devido a elevada exigência computacional para sua geração, principalmente vinculada ao uso de memória RAM.

Figura 17 – Apresentação das malhas de fundo e da geometria final da haste de distribuição da Campo Limpo geradas pela ferramenta ParaView do *software* CFD OpenFOAM.



(a) Malha de fundo

(b) Malha da Geometria Final

Fonte: Autor (2019).

3.4 Resultados e discussões da simulação da mangueira do elemento aplicador

O experimento considerou a mangueira do elemento aplicador e, para os testes, foi utilizada a média da vazão das duas hastes obtida no experimento laboratorial. Os resultados da simulação indicaram que o fluxo era direcionado da entrada da mangueira preferencialmente para o furo mais próximo e a velocidade do fluido diminuía repentinamente após furo, conforme mostrado na figura 18 (a).

A escala de cores usada na representação gráfica considerou os valores obtidos nos cálculos e a cada corte houve um redimensionamento dessa escala. Dessa forma, o comportamento pôde ser evidenciando na comparação da figura 18(a), na qual, para o primeiro caso, a alta velocidade na saída do furo não foi visível no corte, já com a figura 18(b) a magnitude da velocidade refez a escala e mostrou um tom mais escuro de azul após o furo, um tom mais claro antes do furo e tons de vermelho representando o aumento repentino de velocidade no estrangulamento do escoamento, que ocorreu na região do furo.

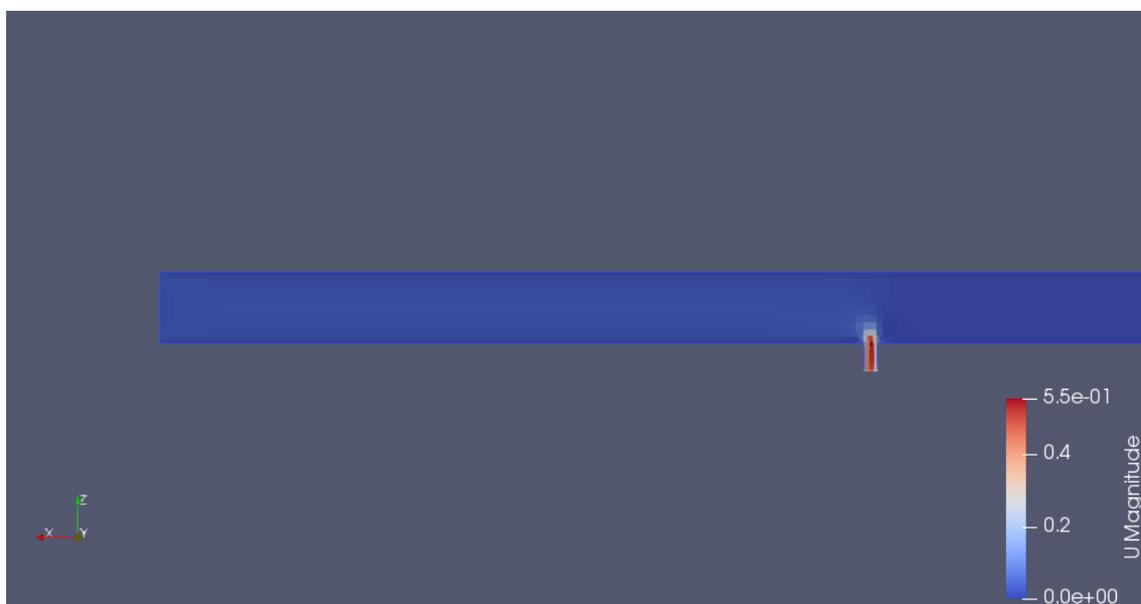
Essa comparação entre as visões dos dois cortes foi importante para confirmar que grande parte do escoamento das entradas se direcionou para a saída mais próxima. No estudo de caso as duas vazões de entrada na mangueira e, da mesma forma, as duas saídas possuíam mesmo valor, em módulo. O comportamento obtido para o sistema proposto representou o aumento da velocidade conforme se reduzia o diâmetro por onde escoava um fluido líquido, conforme comportamento previsto por Mitchell *et al.* (2015) para escoamento semelhante.

Um outro experimento foi conduzido com vazões diferentes em cada uma das duas entradas da mangueira. Nesse caso, a de menor vazão teve o sentido do escoamento invertido, ou seja ao invés de entrar a calda pelo furo mais próximo, o fluido sai por esta fronteira. Esse comportamento indica a ocorrência de fluxo de uma haste para a outra, quando as vazões não são iguais, o que pode acarretar num balanceamento de forças entre as hastes.

Figura 18 – Resultados da simulação da velocidade do escoamento dentro mangueira do elemento de aplicação da Campo Limpo em diferentes pontos de vista.



(a) Visão Superior



(b) Visão Lateral

Fonte: Autor (2019).

4 METODOLOGIA EXPLICATIVA

A metodologia explicativa do trabalho foi aplicada de forma cíclica para a execução do *solver*. Dessa forma, os experimentos foram reconduzidos e complementados com novas exigências. Ao longo da pesquisa o procedimento foi realizado diversas vezes para propiciar a comparação dos resultados de um cenário com o outro e explicar com mais clareza os fenômenos identificados experimentalmente.

A metodologia explicativa teve como objetivos, desenvolver ambientes de simulação sob condições específicas, utilizar informações dos experimentos de campo para validar essas condições e propor melhorias, sempre considerando os resultados obtidos nas etapas anteriores. A exploração de diferentes ambientes computacionais e o uso de ferramentas de paralelismo proporcionaram o aumento do volume simulado. Os experimentos executados com as malhas foram conduzidos em diferentes condições de processamento paralelo e com a manutenção da exigência computacional.

4.1 Materiais e métodos explicativos

A experimentação no ambiente de simulação foi conduzida para todos os cenários com o intuito de representar os dados obtidos em laboratório. Os experimentos de campo são conduzidos para validar o comportamento simulado e estratificado em um sistema com a escala real da Campo Limpo.

4.1.1 Experimento de campo

A pesquisa utilizou a roçadeira Campo Limpo em uso na Embrapa para avaliar o seu funcionamento considerando as premissas verificadas no experimento laboratorial. O experimento da medição da vazão foi realizado por meio de frascos para a coleta e recipiente graduado para a aferição de volume. O procedimento utilizado para a operação da máquina foi conduzido conforme manual do fabricante.

O implemento foi mantido conectado mecanicamente e eletricamente ao trator e o ângulo do implemento foi aplicado através de atuadores em suas rodas. As medidas foram realizadas ao longo do implemento para identificar o comportamento da vazão. As medidas foram realizadas com a coleta de um volume de calda correspondente a coleta por um tempo de cinco minutos e o volume coletado é aferido em uma proveta graduada.

A figura 19 apresenta uma imagem do implemento angulado para a realização de testes de vazão. A diferença de altura entre as extremidades foi dada pelos atuadores traseiros para aumentar ou reduzir a altura de aplicação. A condição de coleta da calda para computar a vazão foi realizada após as cordas estarem completamente embebidas de calda.

Figura 19 – Experimento com detalhe da Campo Limpo em condição de operação em desnível.



Fonte: Autor (2019).

O implemento possui duas entradas e tem um arranjo idêntico ao da figura 10, só com quatro vezes mais elementos de aplicação, ou seja 68 elementos. Uma das entradas do implemento foi estancada de modo a se assemelhar ao ambiente de estudo do escoamento da haste de distribuição realizado em laboratório anteriormente, a figura 20 demonstra a forma como foi estancada uma das entradas para uma das hastes, sendo assim uma das hastes era alimentada e as duas possuíam conexão com o reciclo.

A vazão de uma série de elementos de aplicação foi medida através da coleta das gotas desprendidas das cordas. Considerando que a Campo Limpo possui 68 elementos de aplicação, a cada três cordas, uma delas foi medida e as outras duas foram agrupadas por barbantes para o gotejamento dos elementos adjacentes não interferir na medição. A figura 21 representa o teste de medição do elemento 1, 4 e 7 e as cordas 2, 3, 5, 6, 8 e 9 agrupadas. Ao total foram 22 elementos de aplicação com vazão medida e as demais cordas ficaram agrupadas.

Figura 20 – Experimento com detalhe da Campo Limpo com obstrução do escoamento na entrada de uma das hastes de distribuição.



Fonte: Autor (2019).

Figura 21 – Representação do referencial numérico do experimento de vazão com a Campo Limpo.



Fonte: Autor (2019).

4.1.2 Simulação da haste de distribuição

A mangueira e a haste foram simuladas a partir de condições iniciais obtidas em laboratório e, posteriormente, experimentos de campo foram conduzidos para a validação dos modelos em ambientes reais. A simulação da haste contou com a entrada pelo primeiro espigão e as saídas pelos demais dezesseis. A velocidade de entrada na haste foi definida pelos resultados dos experimentos laboratoriais. As condições de pressão estabelecidas nas saídas remetem a um escoamento para o ambiente sem alguma resistência.

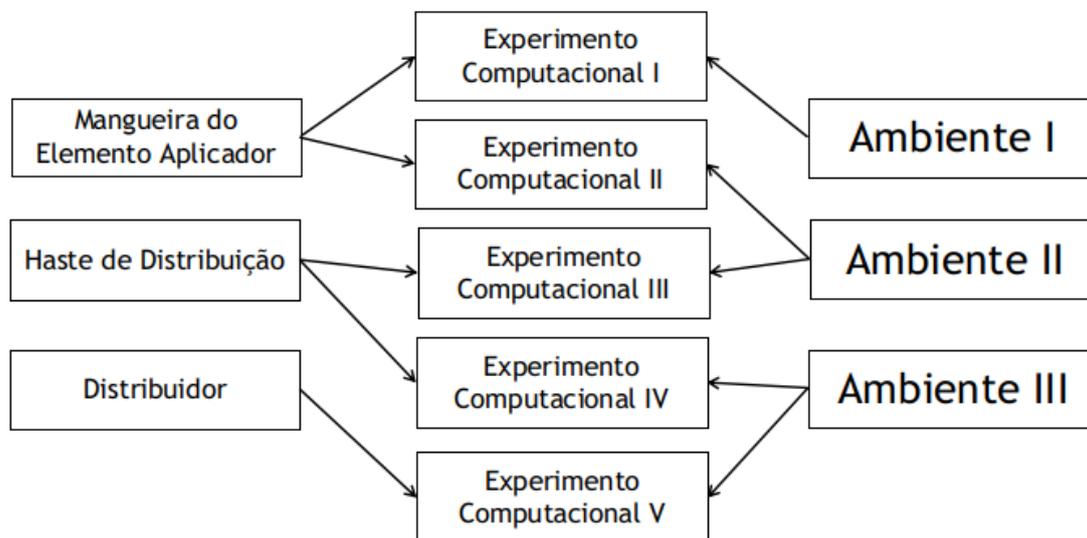
4.1.3 Experimentos computacionais

A exploração de novos ambientes foi necessária no decorrer da pesquisa para viabilizar o aumento de complexidade da simulação. Os experimentos iniciaram com a representação de uma das mangueiras do experimento laboratorial em um ambiente computacional I e utilizando a versão 6 do OpenFOAM. As demais representações subsequentes, da haste e do distribuidor, foram executadas em diferentes ambientes criados com computadores com as mesmas configurações entre si e utilizando a versão 7 do OpenFOAM.

Os cenários foram criados de forma complementar e sequencial em relação a sua complexidade e funcionamento do implemento agrícola. O experimento computacional I correlacionou o ambiente computacional I e a representação do elemento de distribuição, conforme mostra a figura 22. Em alguns casos as representações não foram testadas em todos os ambientes por restrições de *hardware*.

Um estudo de processamento foi criado para cada ambiente, explorando uma proposta de escalabilidade em relação a processadores para analisar o tempo necessário para executar os casos nos diferentes ambientes computacionais. O estudo foi separado para cada etapa, utilizando a ferramenta SnappyHexMesh e o *solver*, com o intuito de constatar nuances entre as diferentes etapas e o desempenho do processamento, considerando somente a diferença na distribuição do trabalho computacional.

Figura 22 – Esquemático das correlações entre os ambientes computacionais, as partes da Campo Limpo e os experimentos computacionais, simulados com o *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

4.1.3.1 Ambiente computacional I

O primeiro ambiente computacional foi conduzido utilizando a aplicação OpenFOAM na sua versão 6.0 com uso do OpenMPI versão 2.1.1, do ParaView 5.6.0 e executado em um servidor HP ProLiant ML350 G6 com um processador Intel Xeon CPU E5620 @ 2.40 GHz com 4 núcleos e 8 *threads*, 8 GB de memória ECC DDR3, placa de vídeo NVIDIA Tesla C2075 com 6 GB de memória GDDR5 e disco rígido de 500 GB configurados em RAID 1 com o sistema operacional Linux Ubuntu versão 18.04.2 LTS.

4.1.3.2 Ambiente computacional II

O segundo ambiente computacional foi estudado com o uso do *software* OpenFOAM na sua versão 7.0 com uso do OpenMPI versão 2.1.1, do ParaView 5.6.0 e executado em um servidor Dell OptiPlex 5060 com um processador Intel Core i5-8400 CPU @ 2.80 GHz com 6 núcleos e 6 threads, 8 GB de memória ram DDR4, placa de vídeo Intel UHD Graphics 630 com 1GB de memória DDR4 e disco rígido de 500 GB com o sistema operacional Linux Ubuntu versão 19.04.

4.1.3.3 Ambiente computacional III

A construção de cenários de simulação mais complexos demandaram um ambiente computacional capaz de executar tarefas com maior volume de processos e uma forma de se obter esse ganho foi com uso de paralelismo aplicado em sistemas de computação distribuída e híbrida. Os computadores utilizados para a construção deste cenário computacional possuíam a mesma configuração das máquinas referente ao ambiente anterior. Uma rede para testes foi construída com duas máquinas, uma delas centralizou o envio e o recebimento de processos da ferramenta e a outra foi um nó de processamento. A arquitetura final é norteada para realizar a comparação de diferentes formas de arranjar o uso de 17 máquinas. Dois ambientes paralelos foram comparados com uso de diferente número de núcleos internos em cada nó, o primeiro ambiente foi concebido com 16 nós com um deles centralizando a distribuição das tarefas e executando os processos ao mesmo tempo e um segundo cenário com 17 computadores e um deles utilizando 32 GB de RAM dedicado somente para gerenciar a distribuição das tarefas.

Os testes foram conduzidos com um *switch* D-Link DES-3526 de 24 portas 10/100 BASE-TX, auto-negociação de velocidades de rede nas portas RJ-45, com capacidade de desempenho para comutação em 8.8 Gbps, taxa máxima de envio de pacotes do sistema de 64 bytes em 6.6 Mbps, tabela de endereços MAC: 8.000 e tamanho do *buffer* do pacote em 16 MB. Classificação do tráfego: TOS, Diffserv (DSCP), *Port-based*, MAC, IP e TCP/UDP e a topologia de rede utilizada foi a estrela.

O ambiente completo utilizou um *switch* gerenciável CISCO Catalyst 2960S-48TS-L, 48 Portas Ethernet 10Base-T/100Base-TX/1000Base-T com tabela de endereços MAC de tamanho 8.000, auto-negociação de velocidades de rede nas portas RJ-45, *broadcast storm control*, suporte DiffServ, comutação de Layer 2, balanceamento de carga, Multicast Storm Control, qualidade de serviço QoS, com capacidade de comutação em 176 Gbps, taxa máxima de envio de pacotes em 9000 bytes, memória *flash* 64 MB, memória RAM 128 MB.

Os dois dispositivos foram conectados aos computadores com o uso de um cabeamento estruturado de modelo Cat.5e através de uma topologia estrela, compatível com os padrões de rede 100Base-TX/1000Base-T, suporte para frequências de até 100 MHz, atingindo até 1.000 Mbps, composto por 04 pares de condutores sólidos e trançados.

4.1.4 Propostas de melhorias no implemento

A partir do conhecimento obtido, outros ambientes de simulação foram desenvolvidos considerando novas hipóteses de aprimoramento a partir da avaliação dos resultados. A simulação da mangueira e da haste distribuidora do aplicador foi uma sequência de entes do sistema que foram simulados para analisar os efeitos da velocidade e da variação do diâmetro no fluxo na entrada da tubulação e ao longo da haste.

A hipótese de alterar a geometria do escoamento foi considerada para homogeneizar as vazões ao longo da haste. A alteração da relação entre o diâmetro dos furos da mangueira do aplicador e o diâmetro da haste de distribuição foi conduzida assim que o ambiente de simulação permitiu o ensaio. Os modelos usados para a construção deste estudo de caso foram validados por experimentos de campo.

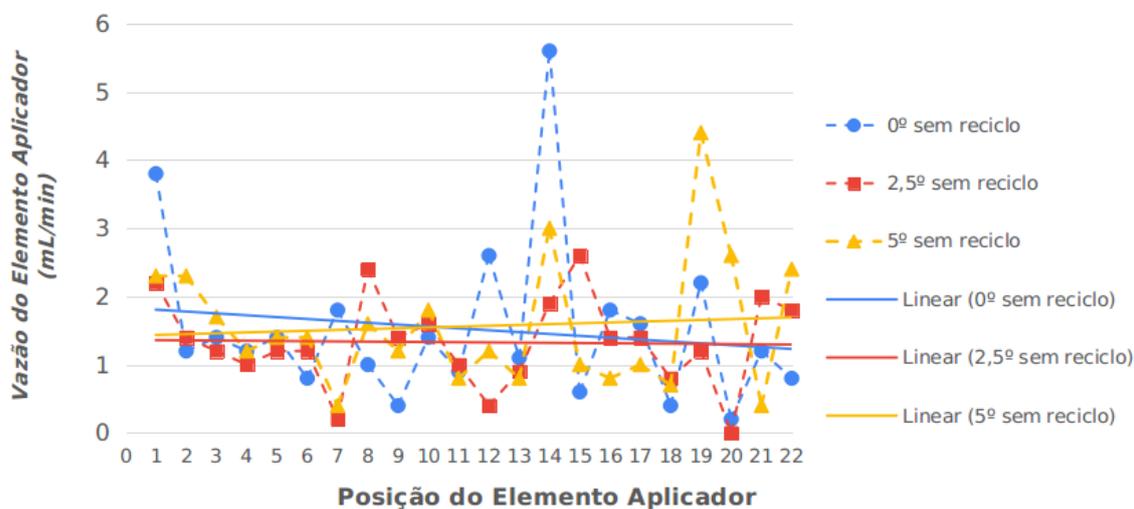
A haste de distribuição foi simulada em diferentes cenários para avaliar a influência da velocidade do escoamento considerando a razão diâmetro do espigão e da haste bem como do ângulo de entrada do fluido. A velocidade correspondente a condição normal de aplicação foi avaliada em quatro intensidades em uma sequência de frações desta velocidade. A razão do diâmetro da haste e do orifício do espigão foi testada na condição de aumento em duas vezes o valor, ou seja, a área correspondente ao diâmetro da haste foi dobrada. O fluido foi simulado entrando no orifício do primeiro espigão e em uma das faces circulares da haste.

4.2 Resultados e discussões do experimento de campo

A vazão da bomba foi aumentada além da vazão de operação, visando encher o sistema rapidamente. Nessa operação, foi constatada a presença de reciclo e quanto maior era a vazão da bomba, maior a era vazão do reciclo. A condição experimental foi definida sem reciclo, para garantir que toda a vazão da bomba fosse direcionada para os elementos de aplicação. Embora o implemento testado tenha sido reformado e todos os seus elementos de aplicação substituídos por um conjunto novo, os resultados obtidos indicam uma heterogeneidade entre a vazão dos furos da mesma haste. A figura 23 mostra a distribuição de dados para os ângulos de 0° , $2,5^\circ$ e 5° .

A regressão linear dos pontos gerou coeficiente de correlação com baixa significância para o conjunto de dados. O modelo linear gerado apontou para um comportamento não linear ao longo das posições das mangueiras nas hastes. As

Figura 23 – Vazões dos elementos aplicadores ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo submetida a diferentes ângulos de operação: 0°; 2,5°; 5,0°, no experimento de campo.



Fonte: Autor (2019).

regressões apresentaram um comportamento semelhante entre si e o sistema sem reciclo tendeu a ser bastante disperso mesmo considerando a exposição do implemento a diferentes ângulos de trabalho.

Um teste estatístico foi realizado para avaliar a diferença entre as médias das 3 séries de dados. A tabela 5 demonstra as possíveis comparações entre as médias dos diferentes cenários de ângulos de aplicação. A comparação indica ausência de diferença significativa entre as médias, considerando o $t_{student}$ tabelado de 2,08.

Tabela 5 – Comparação das médias das vazões em diferentes ângulos de operação dos experimentos sem reciclo na Campo Limpo.

Ângulo de operação	Ângulo de operação		
	0°	2,5°	5°
0°	-	0,62	0,53
2,5°	-	-	-0,84

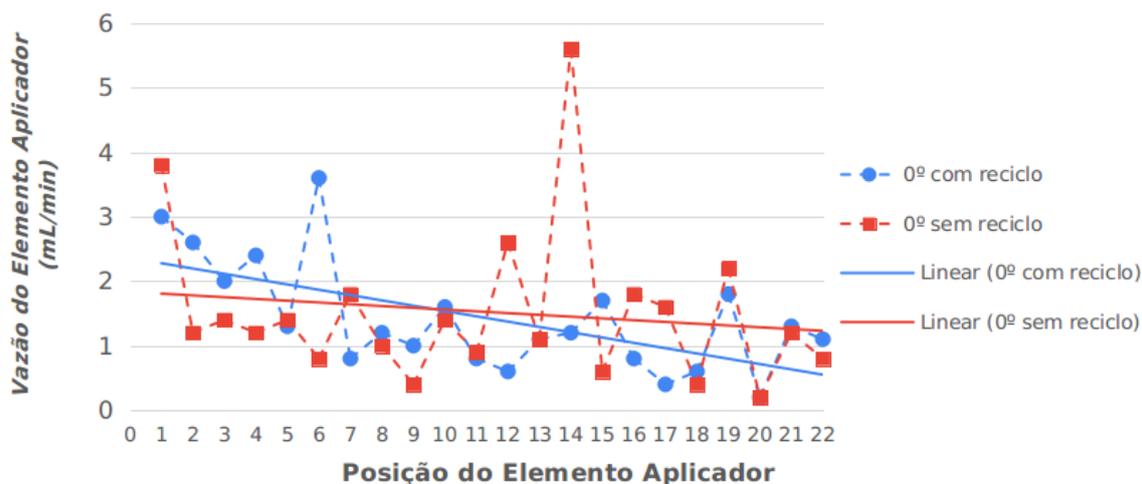
$t_{student}$ tabelado=2,08

Fonte: Autor (2019).

Um experimento comparativo nas condições de presença e ausência de reciclo foi conduzido, alterando-se a vazão da bomba, de forma a propiciar a menor vazão de reciclo possível e assim comparar com os cenários sem reciclo. Uma nova série de dados

foi comparada com as já existentes, oriundas das diferenças de angulação aplicada ao implemento. As médias das vazões foram comparadas ao desvio padrão com o intuito de verificar se alguns dos cenários propiciaria uma distribuição mais homogênea ao longo da haste. Os resultados são apresentados na figura 24.

Figura 24 – Vazões dos elementos aplicadores ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo, nas condições com e sem reciclo, quando submetida a um ângulo de operação de 0° , no experimento de campo.



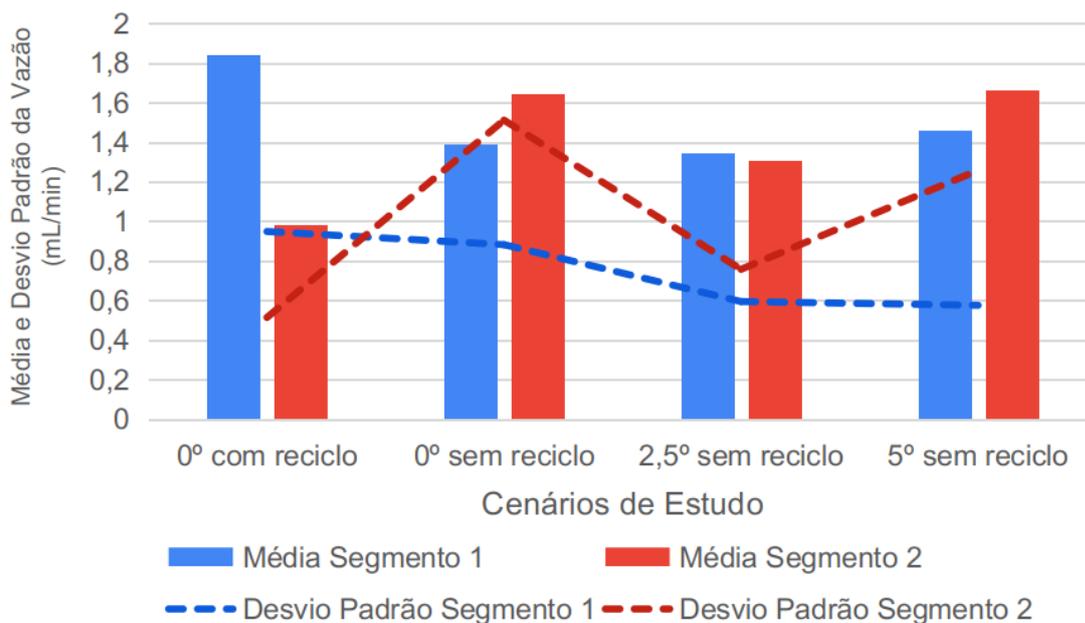
Fonte: Autor (2019).

Inicialmente os cenários com 0° de inclinação, aplicados com e sem reciclo, foram comparados entre si e a figura 24 representa a dispersão da vazão dos elementos aplicadores dos dois estudos de caso. O modelo linear gerado para a série de dados teve um coeficiente de correlação baixo para o cenário sem reciclo e 0,51 para o cenário com 0° de inclinação, com reciclo, cujo modelo mais ajustado foi o de regressão logarítmica. Aparentemente, o cenário sem reciclo não foi tão homogêneo quanto o cenário com reciclo. A análise da diferença das médias indicou uma diferença significativa entre as médias das séries de dados com ângulo de 0° nas condições de presença e ausência de reciclo.

Dividindo-se a haste de distribuição em duas partes, sendo o segmento um o conjunto das posições de 1 a 11 e o segmento dois o conjunto das posições de 12 a 22, o gráfico representado pela figura 25 evidencia as médias e o desvio padrão dos dados dos dois segmentos. O cenário sem reciclo com ângulo de 0° apresentou vazões médias semelhantes entre os dois segmentos. Contudo, o valor do desvio padrão do segmento dois situou-se próximo da média, o que indica alta variabilidade dos dados. Na inclinação

intermediária, com ângulo de 2,5°, pode-se observar uma vazão mais homogênea, para ambos os segmentos, o comportamento se replica para a média do cenário com inclinação de 5° sem reciclo.

Figura 25 – Vazão média dos elementos aplicadores da Campo Limpo e desvio padrão associado, quando submetida a diferentes ângulos de operação: 0°; 2,5°; 5,0°, com e sem reciclo, no experimento de campo.



Fonte: Autor (2019).

A análise das médias por segmento entre o segmento um e dois do cenário com reciclo gerou valores significativamente diferentes entre as séries de dados. Nos demais cenários o sistema com reciclo não teve uma diferença significativa entre os conjuntos de dados, considerando um $t_{student}$ tabelado de 2,23, conforme é mostrado na tabela 6. Os resultados da comparação das médias podem ser explicados pela alta variabilidade dos dados, que por sua vez apontam para a possibilidade de existirem deformações construtivas ao longo do implemento. O fato de não ser utilizado reciclo, aparentemente aumenta essa variabilidade de forma a ressaltar estes defeitos do implemento.

Um experimento adicional foi conduzido com a Campo Limpo avaliando a possibilidade de reciclo. A tabela 7 mostra os resultados dos experimentos com foco na variação das condições de reciclo. Nesse ensaio, três pontos de vazão foram medidos para explorar o comportamento do escoamento. A vazão de entrada se refere a vazão

Tabela 6 – Resultados da análise estatística das médias das vazões em diferentes ângulos de operação e nas condições com e sem reciclo dos experimentos na Campo Limpo.

Valor	Ângulo de operação e estado de reciclo			
	0° com reciclo	0° sem reciclo	2,5° sem reciclo	5° sem reciclo
$t_{student}$ calculado	2,65	0,49	0,14	-0,47

Legenda: $t_{student}$ Tabelado=2,23

Fonte: Autor (2019).

obtida na válvula de calibração, a coluna vazão de reciclo se refere ao fluxo de reciclo ao reservatório e a porcentagem do reciclo compreende na razão entre a diferença da bomba e do retorno e a entrada.

Tabela 7 – Resultados dos testes com a indicação do potenciômetro de controle da rotação da bomba peristáltica e as taxas de reciclo do experimento na Campo Limpo.

Indicação potenciômetro	Vazão de entrada (mL/s)	Vazão de reciclo (mL/s)	Reciclo (%)
6	6,13	5,89	96
5	4,00	3,49	87
4,5	3,23	2,45	76

Fonte: Autor (2019).

O cálculo para a porcentagem de reciclo é indicado na equação 7:

$$\%_{\text{Reciclo}} = \frac{\text{Vazão de reciclo}}{\text{Vazão de entrada}} \quad (7)$$

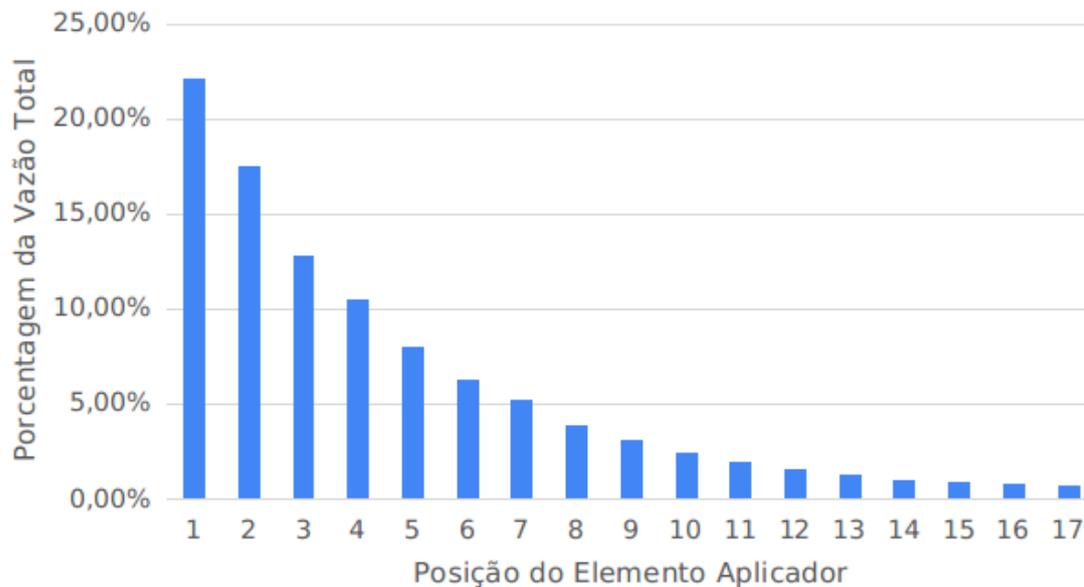
O gotejamento se torna mais intenso ao se fechar a válvula de reciclo, pois a restrição provoca o escoamento total pelos furos da mangueira. As vazões obtidas consideram um fluxo sem restrições e, a partir do momento que o fechamento da válvula se torna uma variável do processo, essa proporcionalidade entre vazão de entrada e vazão de reciclo pode ser alterada para os pontos analisados.

4.3 Resultados e discussões da simulação da haste de distribuição

O comportamento retratado pelos resultados indica uma grande parte da vazão saindo nos primeiros espigões. O gráfico representado na figura 26 mostra a porcentagem da vazão em cada espigão e aparentemente mais de 60% da vazão que entra no espigão 1 sai pelos primeiros 4 espigões. A numeração dos espigões de um a dezessete segue a

ordem de posição da haste.

Figura 26 – Simulação da distribuição das vazões dos elementos aplicadores, conforme sua posição na haste de distribuição da Campo Limpo.



Fonte: Autor (2019).

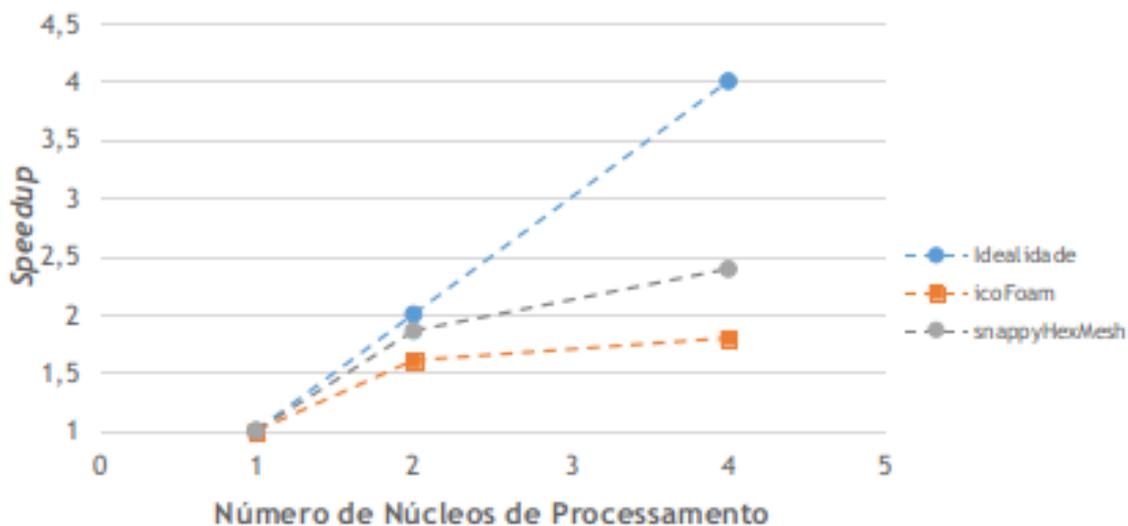
Um dos experimentos de campo teve uma das entradas interrompidas para buscar aproximação do comportamento real com o da simulação. Um comportamento análogo ao da simulação pôde ser notado no cenário de 0° de inclinação com reciclo, representado na figura 25, no qual a parcela mais próxima da entrada da calda apresentou uma maior vazão que o segmento mais distante da mesma entrada indicando uma redução da vazão dos espigões conforme aumenta a distância do ponto de injeção da calda.

4.3.1 Resultados e discussões dos experimentos computacionais

O processamento foi avaliado em função do *speedup* e os dados foram organizados em um gráfico para melhor visualização. Os resultados do experimento computacional I indicaram que o efeito do ganho de tempo em função do aumento de núcleos decaiu, conforme é mostrado na figura 27.

Teoricamente, a representação do *speedup* ideal assume valor um para um processamento com uso de um núcleo, valor dois com o uso de dois núcleos e valor quatro para com o uso de quatro núcleos. A figura 27 mostra que para dois núcleos o *solver*

Figura 27 – Desempenho do experimento computacional I para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do *software* CFD OpenFOAM em contraste com o aumento de desempenho ideal.



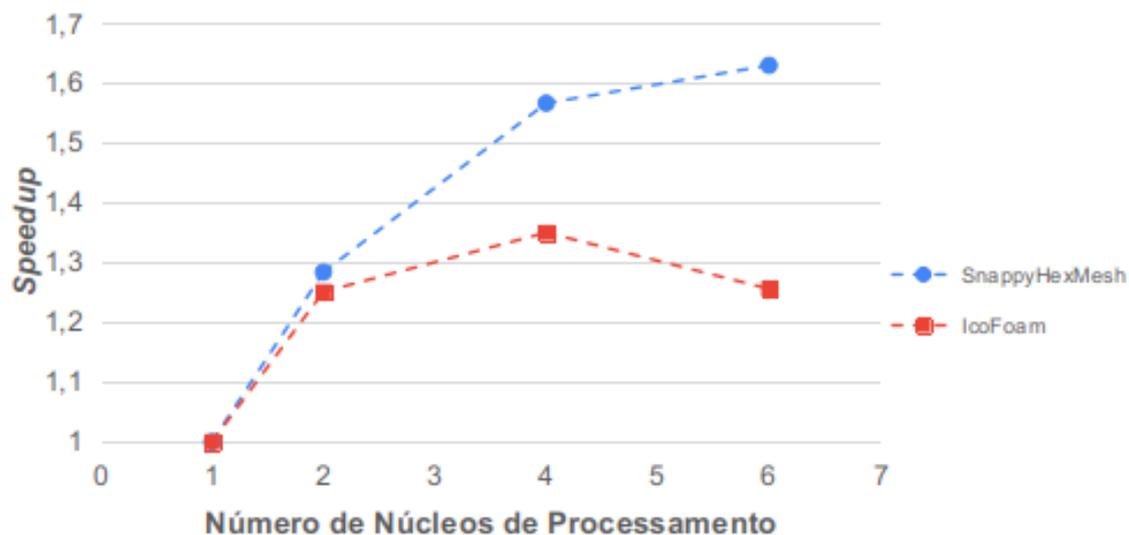
Fonte: Autor (2019).

(IcoFoam) está próximo dos cinquenta por cento de ganho previsto e para a ferramenta de geração de malha (SnappyHexMesh) está quase no dobro do tempo, quando comparados ao tempo necessário para a execução com um processador. Já para quatro núcleos a eficiência do processamento com o aumento de escala é menor, o *solver* se aproxima do dobro da velocidade e a ferramenta de geração de malha aumenta para aproximadamente duas vezes e meia, quando o esperado idealmente seria um *speedup* de quatro.

O experimento computacional II tem o mesmo cenário do anterior, contudo foi executado no ambiente computacional II. A figura 28 mostra os valores de *speedup* para a SnappyHexMesh e para *solver* (IcoFoam). Ambos estão abaixo da idealidade, inclusive para o *solver* há um decréscimo do desempenho comparando o escalonamento do processo de quatro para seis núcleos.

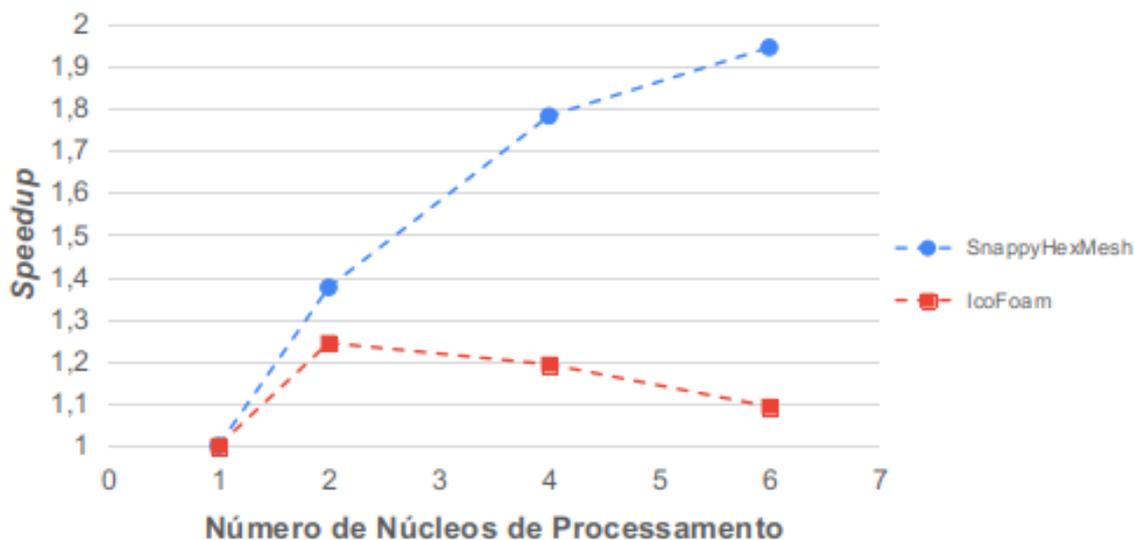
O experimento computacional III com o estudo da haste de distribuição destacou aumento de desempenho abaixo do esperado com o aumento de processadores e os tempos de execução aumentam significativamente, quando comparado aos estudos anteriores. A figura 29 mostra os valores *speedup* para diferentes condições de processamento.

Figura 28 – Desempenho do experimento computacional II para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

Figura 29 – Desempenho do experimento computacional III para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do *software* CFD OpenFOAM.

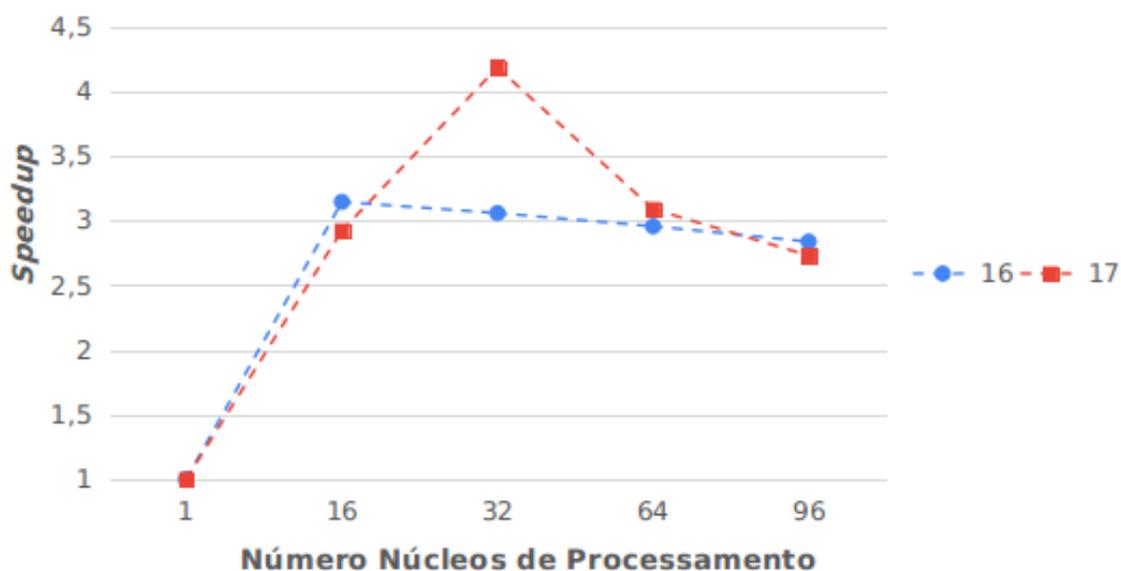


Fonte: Autor (2019).

O OpenFOAM durante sua execução reserva parte da memória RAM para a comunicação dos processos durante a simulação, quanto maior o número de processadores mais evidente fica a diferença da idealidade do *speedup*, considerando o algoritmo nativo da aplicação. Wang *et al.* (2016) estuda dois algoritmos diferentes do nativo para decomposição do problema e obtiveram resultados mais significantes de *speedup*.

O experimento computacional IV com memória distribuída e híbrida obteve um melhor desempenho em relação ao de memória puramente compartilhada. O teste preliminar utilizando duas CPU do ambiente computacional III e definido a divisão do trabalho em seis núcleos com a alocação de três deles em cada máquina gerou um *speedup* de 2,31 que é um valor acima do que qualquer outro obtido em qualquer cenário da simulação da haste de distribuição. O comportamento do *speedup* foi estudado somente para a ferramenta IcoFoam e os resultados dos experimentos foram expostos para os dois cenários com uso de 16 e 17 computadores. A figura 30 mostra no eixo horizontal o número de processadores utilizados em todos os 16 nós, o número 16 representa o experimento com um núcleo de processamento em cada computador com uma arquitetura puramente distribuída e os 32, 64 e 96 representam 2, 4 e 6 núcleos de processamento para cada computador.

Figura 30 – Desempenho do experimento computacional IV para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

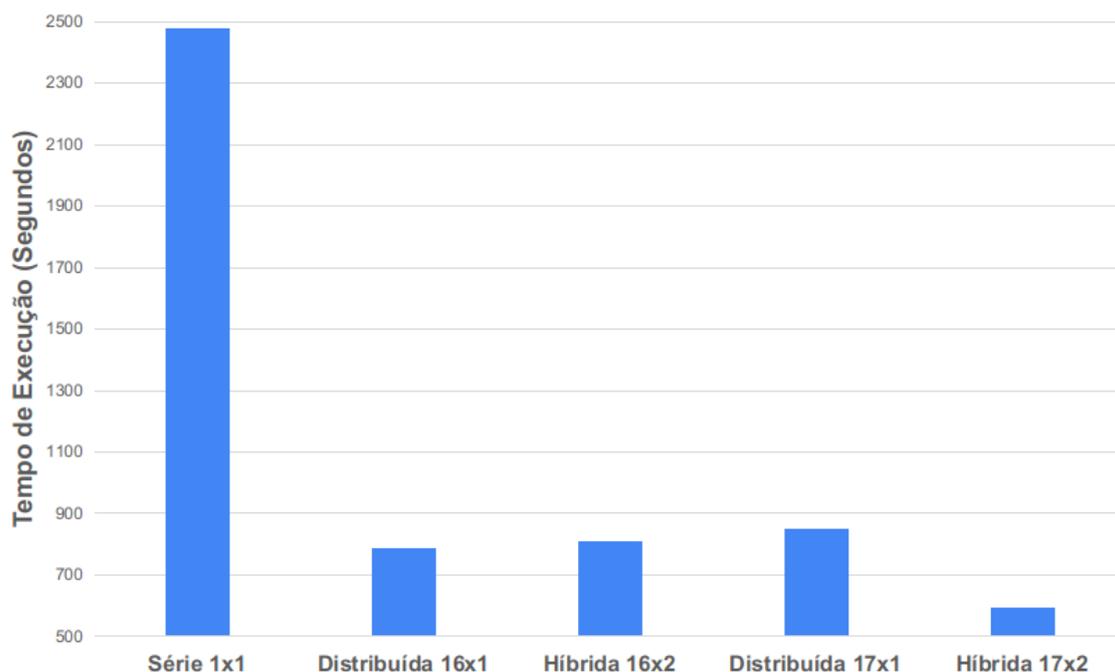
Os resultados para a escalabilidade do caso de 16 computadores indicaram

uma menor eficiência do que o caso de 17 computadores no contexto de melhora no desempenho com o aumento de capacidade computacional. O melhor desempenho obtido foi para o caso de 17 computadores com o uso de dois núcleos de processamento por nó no valor de aproximadamente 4,2 em um ambiente de memória híbrida. Novamente ao se aumentar a divisão do problema os núcleos possivelmente trocaram mais dados entre si e, por consequência, aumentaram o tempo para execução da mesma tarefa.

A simulação da haste foi repetida em diferentes condições de memória distribuída e híbrida e os resultados foram expostos em um gráfico comparativo representado na figura 30. Nos casos de 16 e 32 núcleos, o tempo de processamento foi utilizado para o ambiente computacional III com o intuito de comparar a magnitude do ganho em tempo de processamento nos diferentes cenários.

O tempo da execução em série está representado na Figura 31 por “Série” e a nomenclatura “1x1” faz alusão a um computador com um processador disponível por computador, assim como “16x2” indica o uso de 16 computadores e dois processadores disponíveis por computador. Os ambientes de processamento com memória distribuída estão representados como “Distribuída” e os com configuração híbrida como “Híbrida”.

Figura 31 – Desempenho do experimento computacional V em arquiteturas em série, distribuída e híbrida para as ferramentas IcoFoam e SnappyHexMesh do *software* CFD OpenFOAM.



Fonte: Autor (2019).

O menor tempo de execução foi identificado para o cenário “Híbrida 17x2” com uso 16 computadores com dois processadores disponíveis em cada nó e, posteriormente, o tempo para o cenário distribuído puramente com divisão em 16 computadores (“Distribuída 16x1”). A comparação entre os cenários “Distribuída 17x1” e o “Híbrida 17x2” indica um ganho da velocidade de execução, por outro lado os cenários “Distribuída 16x1” e “Híbrida 16x2” não mantiveram o mesmo comportamento de desempenho. Neste contexto existem indícios que o tempo de comunicação entre os diferentes nós pode limitar a eficiência do sistema, ao passo que um computador dedicado para gerenciar a execução da aplicação em paralelo pode melhorar o desempenho em arquiteturas híbridas (COUNCIL, 2010).

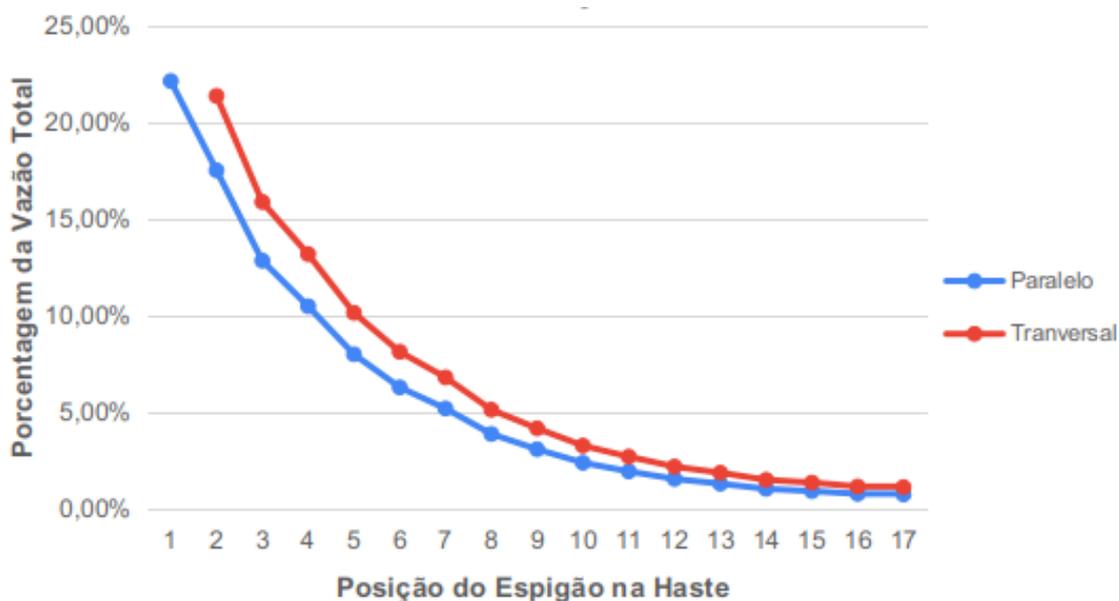
4.4 Resultados e discussões das propostas de melhorias

Com base nos resultados obtidos com a simulação, pode-se inferir que o comportamento do escoamento na Campo Limpo indicou a ausência de diferença na distribuição ao longo dos espigões para as velocidades testadas. A comparação das diferentes formas de injeção da calda apresentaram um escoamento semelhante, conforme a figura 32, com a diferença de que o primeiro espigão da injeção transversal teria vazão igual a zero pois é a entrada do sistema. Os resultados das diferentes formas de injeção não aparentaram obter uma diferença tão grande quanto a da relação anterior.

A comparação da distribuição dos resultados da geometria um, com o diâmetro original, e da geometria dois com diâmetro da haste duas vezes maior que o original. A figura 33 mostra a redução da vazão nos primeiros espigões e se distribuindo ao longo da haste, ou seja, um maior homogeneidade das vazões ao longo da haste.

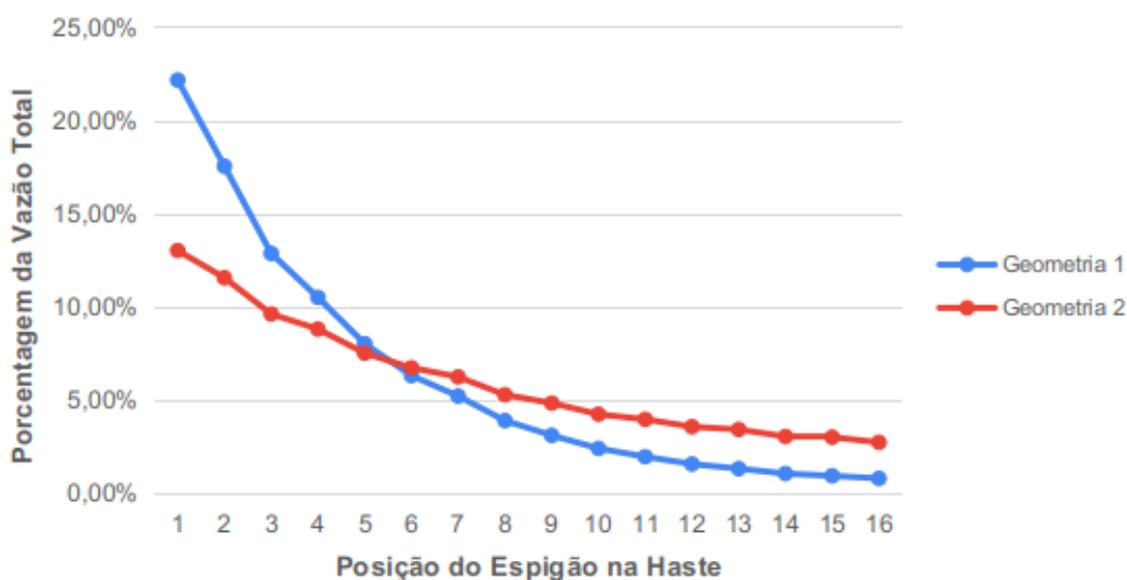
A capacidade de distribuir a calda de forma homogênea propicia uma condução da aplicação de forma a evitar a deriva e racionalizar o uso do herbicida, uma vez que os experimentos em geral indicaram uma divisão bem variável da vazão ao longo da haste. O ganho de eficiência gerado pela homogeneidade das saídas pode ser na precisão da aplicação da Campo Limpo, considerando um sistema de pastagens homogêneo. A heterogeneidade presente nos ambientes reais demanda aplicação de precisão do herbicida por corda ou setor entre outras formas de atuação sobre o escoamento.

Figura 32 – Simulação no *software* CFD OpenFOAM da distribuição da porcentagem da vazão total por espigão, conforme sua disposição ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo em condições de injeção paralela e transversal da calda herbicida.



Fonte: Autor (2019).

Figura 33 – Simulação no *software* CFD OpenFOAM da distribuição da porcentagem da vazão total por espigão, conforme sua disposição ao longo da haste de distribuição da Campo Limpo da calda herbicida na haste de distribuição sob condições estruturais distintas, configuração atual e configuração com diâmetro da sessão interna dobrado.



Fonte: Autor (2019).

5 CONCLUSÃO

Os resultados dos experimentos laboratoriais foram utilizados nas etapas subsequentes da metodologia e sugeriram uma vazão semelhante entre os espigões. A diferença obtida em relação aos diferentes ângulos da haste de distribuição indicou uma influência no escoamento de modo a aumentar a vazão das saídas localizadas dos espigões em menor altura.

As malhas de simulação criadas para os sistemas, considerando o elemento de aplicação, a haste de distribuição, satisfizeram a necessidade para uma primeira avaliação dos fenômenos fluidodinâmicos. A geometria do distribuidor não foi refinada por falta de capacidade computacional.

Os experimentos com a Campo Limpo mostraram uma distribuição da vazão irregular ao longo da haste, em alguns elementos de aplicação, o que pode estar associado a alguma deformação construtiva da mangueira ou da própria haste, em oposição aos resultados obtidos no experimento laboratorial. Os ângulos de trabalho de 0° , $2,5^\circ$ e 5° , testados sem reciclo e o conjunto de dados adquiridos, indicaram uma diferença não significativa entre os segmentos da haste, enquanto o ensaio com reciclo, evidenciou uma diferença significativamente entre os segmentos da haste.

Os testes no ambiente computacional com memória híbrida indicaram um melhor resultado na escalabilidade do que com memória puramente compartilhada ou distribuída, para o caso da haste de distribuição. O uso de computadores em ambientes paralelos possuiu a capacidade de reduzir o tempo execução de simulações fluidodinâmica computacional e viabilizar a construção de estudos de caso mais complexos.

Os experimentos apontam que há alta influência do escoamento com as dimensões das tubulações da Campo Limpo e, por isso, é indicado manter um nível de qualidade na construção para mitigar possíveis influências no fluxo por falhas construtivas. As condições de simulação apontaram como nulo o efeito de ângulo de injeção de calda na haste, seja ele paralelo ou transversal. A condição da geometria expressada pela razão dos diâmetros da haste com a saída da haste para a mangueira do elemento aplicador quando duplicada indicou uma capacidade de homogeneizar mais a distribuição de vazão da calda ao longo da haste. Por outro lado, houve influência do diâmetro interno da haste de distribuição. Assim, sugere-se que o diâmetro interno da mesma seja aumentado, a fim de homogeneizar a distribuição da calda herbicida para os espigões dispostos ao longo da haste de distribuição.

5.1 Considerações finais

Os experimentos laboratoriais foram realizados em condições semelhantes às de operação do implemento e auxiliaram no suporte às condições de entrada do simulador, bem como subsidiaram a escolha do *solver* e das condições iniciais do processo. Nas condições testadas em laboratório, o fluxo não foi capaz de retornar ao reservatório e escoando completamente pelos elementos de aplicação. Por sua vez, o reciclo da Campo Limpo foi obtido com a alteração das condições de entrada da máquina no experimento de campo. Entretanto, alterando-se a entrada da calda herbicida na Campo Limpo, direcionando-a para uma haste apenas, foi possível realizar o reciclo da calda para o tanque de armazenamento. Nessa condição, a vazão da calda herbicida direcionada aos elementos de aplicação tendeu a diminuir com o aumento da vazão da bomba, aumentando a vazão de reciclo. Assim, a operação com o uso de reciclo levantou hipóteses de possíveis melhorias para o implemento para reduzir desperdícios de herbicida durante a aplicação.

A modelagem do escoamento indica consistência com sistemas teóricos, nos quais a velocidade cresce de zero próximo da parede até o valor máximo no centro da tubulação. Além disso, houve diferença significativa dos dados de velocidade simulados para a mangueira do aplicador entre as entradas e as saídas dos diferentes cenários, que também é um comportamento compatível, quando considerada a diferença dos diâmetros entre as mesmas.

A simulação da haste indica que a maioria da vazão total de entrada se direciona para o espigão mais próximo da injeção da calda. Os experimentos foram conduzidos com as dimensões do próprio implemento, com o intuito de identificar o efeito de alterações nas suas características construtivas que permitam reduzir a deriva e racionalizar o uso de herbicidas em pastagens. A simulação de todo o distribuidor e em condições idênticas a Campo Limpo é imprescindível para futuros experimentos e indicação de melhorias.

Os ambientes foram explorados conforme a demanda das novas geometrias e os recursos disponíveis. As etapas de refinamento das malhas e de execuções do *solver* tiveram seu processamento comparado em diferentes ambientes computacionais e demonstraram um comportamento distante do ideal, principalmente para o uso de maior número de núcleos para a execução do trabalho. Por fim, a pesquisa usou um *software* livre e estudou casos para melhoramento da eficiência do processamento, ambas ações indicam uma redução no custos, contribuindo para aumentar o uso da simulação na concepção de implementos agrícolas.

As conclusões obtidas a partir da comparação dos diferentes cenários testados viabilizaram a discussão de diferentes formas de alterações possíveis para melhoria do controle do fluxo no equipamento comercial. A construção de ambientes capazes de conduzir experimentos com alta demanda de processamento e com o uso de computadores em rede pode ser explorada em problemas de fluidodinâmica.

REFERÊNCIAS

AYACHIT, U. **The ParaView Guide**. 2020. Disponível em: <<https://www.paraview.org/paraview-guide/>>. Acesso em: 15 fev. 2020.

BISTAFA, S. R. **Mecânica dos fluidos: noções e aplicações**. São Paulo: Editora Blucher, 2018.

CENTRO NACIONAL DE PROCESSAMENTO DE ALTO DESEMPENHO.

Introdução ao MPI - Message Passing Interface. 2012. Disponível em: <<https://www.cenapad.unicamp.br/servicos/treinamentos/mipi.shtml>> Acesso em: 15 fev. 2020.

COUNCIL, H. A. **Openfoam performance benchmark and profiling**. 2010. Disponível em: <http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/OpenFOAM_Analysis_and_> Acesso em: 15 fev. 2020.

DYNAMICS, W. **Introduction to solid modeling for general CFD and meshing using OpenFOAM R technology - Onshape and snappyHexMesh**. 2020. Disponível em: <<http://www.wolfdynamics.com/tutorials.html>> Acesso em: 15 fev. 2020.

FERZIGER, J. H.; PERIC, M. **Computational methods for fluid dynamics**. Berlim: Springer Science & Business Media, 2012.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas computacionais para dinâmica dos fluidos: conceitos básicos e aplicações**. São Paulo: Edusp, 2000.

FOUNDATION, T. O. **OpenFOAM v6 User Guide**. 2017. Disponível em: <http://www.hpcadvisorycouncil.com/pdf/OpenFOAM_Analysis_and_> Acesso em: 15 fev. 2020.

LUI, P. **Scalability performance analysis of openfoam on modern hpc clustering technologies**. OpenFOAM User Conference, 2015.

MARTINS, L.; SISTI, R.; PEREZ, N. **Controle de capim-annoni-2 com o aplicador seletivo de herbicida campo limpo**. JORNADA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA, 8^a MOSTRA DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, Embrapa, Bagé, 2010.

MITCHELL, J. W. *et al.* **Fox and McDonald's Introduction to Fluid Mechanics**. Estados Unidos: Wiley, 2015.

MOHIUDDIN, I.; MATHKOUR, H. **Computational fluid dynamics application tools**. IEEE. 2015 World Congress on Information Technology and Computer Applications (WCITCA). Hammamet, 2015. p. 1–5.

NI, M. *et al.* **Research of rice lodging in farmland wind field based on CFD**. IEEE. 2019 International Conference on Computer Network, Electronic and Automation (ICCNEA). Xi'an, 2019. p. 57–61.

OJHA, R. *et al.* **Performance optimization of openfoam on clusters of intel Xeon phi processors**. IEEE. 2017 IEEE 24th International Conference on High Performance Computing Workshops (HiPCW). Jaipur, 2017. p. 51–59.

OPENCFD. **User Guide**. 2019. Disponível em: <<https://openfoam.org>> Acesso em: 15 fev. 2020.

PATTERSON, D. A.; HENNESSY, J. L. **Organização e projeto de computadores**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005.

PEREZ, N. **Campo limpo: controle de plantas indesejáveis em pastagens**. Embrapa Pecuária Sul-Fôlder/Folheto/Cartilha, Embrapa Pecuária Sul, Bagé, 2010.

PEREZ, N. B. **Aplicador manual de herbicida por contato: enxada química**. Embrapa Pecuária Sul-Comunicado Técnico, Embrapa Pecuária Sul, Bagé, 2008.

PEREZ, N. B. **Controle de plantas indesejáveis em pastagens: uso da tecnologia campo limpo**. Embrapa Pecuária Sul. Comunicado técnico, Bagé: Embrapa Pecuária Sul, 2010.

PEREZ, N. B. **APERFEIÇOAMENTO EM DISPOSITIVO APLICADOR DE HERBICIDA**. 2011. Depositante: Embrapa. BR n. CI10803146-E2. Depósito: 30 ago. 2010. Concessão: 20 dez. 2011.

POTTER, M. C.; WIGGERT, D. C. **Mecânica dos fluidos**. São Paulo: Cengage Learning, 2004.

SEDANO, C. G.; AGUIRRE, C. A.; BRIZUELA, A. B. **Numerical simulation of spray ejection from a nozzle for herbicide application: Comparison of drag coefficient expressions**. Computers and electronics in agriculture, Elsevier, Entre Ríos, v. 157, p. 136–145, 2019.

SOUZA, C. *et al.* **Comparação entre o ganho médio diário de peso em bovinos em pastagem nativa infestada por capim-annoni e em pastagem em processo de recuperação**. SIMPÓSIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA EMBRAPA PECUÁRIA SUL, Bagé, 2014.

VASCONCELLOS, B. *et al.* **Análise de desempenho da execução remota de método aplicado ao monitoramento de animais com vant**. Anais da XIX Escola Regional de Alto Desempenho da Região Sul, Três de Maio, 2019.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. Londres: Pearson education, 2007.

WANG, M. *et al.* **Dmrrpar: A dynamic mesh repartitioning scheme for dam break simulations in openfoam**. IEEE. 2016 17th International Conference on Parallel and Distributed Computing, Applications and Technologies (PDCAT). Guangzhou, 2016. p. 210–215.

ZHENJUN, G. *et al.* **The study on internal flow characteristics of magnetic drive pumthe study**. IEEE, Yichang, v. 7, p. 100003–100013, 2019.