

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CARINE ROSA MALENA GARCIA AMOROSO

**SUSTENTABILIDADE NA RECICLAGEM E NO USO DA ÁGUA EM
INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PAPEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

**GOIÂNIA
2020**

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE GOIÁS
ESCOLA DE ENGENHARIA
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

CARINE ROSA MALENA GARCIA AMOROSO

**SUSTENTABILIDADE NA RECICLAGEM E NO USO DA ÁGUA EM
INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PAPEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Trabalho apresentado à Coordenação do Curso de Graduação em Engenharia de Produção, da Pontifícia Universidade Católica de Goiás, como requisito para aprovação na disciplina Projeto Final de Curso II.
Orientador: Prof. Dr. Ricardo Caetano Rezende

**GOIÂNIA
2020**

CARINE ROSA MALENA GARCIA AMOROSO

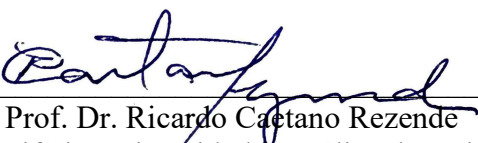
**SUSTENTABILIDADE NA RECICLAGEM E NO USO DA ÁGUA EM
INDÚSTRIA DE PRODUÇÃO DE PAPEL POR MEIO DA SIMULAÇÃO
COMPUTACIONAL**

Este trabalho foi julgado adequado e aprovado para a obtenção do título de graduação em Engenharia de Produção da Pontifícia Universidade Católica de Goiás

Goiânia, 04 de dezembro de 2020

Profª. Ma. Maria Ximena Vázquez Fernández
Coordenador do Curso de Engenharia de Produção

BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Ricardo Caetano Rezende
Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Orientador

Profª. Ma. Arinéia Nogueira de Assis
Centro Universitário Alves Faria
Banca

Prof. Dr. Marcos Antônio de Sousa
Pontifícia Universidade Católica de Goiás
Banca

OBS.: Em decorrência do Período Letivo Remoto Extraordinário este documento conta apenas com a assinatura do Orientador, visto à impossibilidade de colher as demais assinaturas de membros da banca. O trabalho foi avaliado em Banca de Defesa pública, que aconteceu de forma Remota e Síncrona, pela plataforma *Teams*, no dia 04 de Dezembro de 2020, conforme registrado em Ata.

RESUMO

AMOROSO, Carine Rosa Malena Garcia. **Sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em indústria de produção de papel por meio da simulação computacional**, 2020. Trabalho Final De Curso (Graduação em Engenharia de Produção). Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia.

Este estudo teve como objetivo o desenvolvimento de um modelo de simulação computacional para demonstrar e avaliar a sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em uma indústria de produção de papel, através do *Software* Arena. Para isso, algumas etapas foram seguidas: diagnóstico do sistema, definição das variáveis, coleta e análise de dados, modelagem e simulação, análise do cenário atual e propostas de melhoria. Essas propostas consistiram em substituir a utilização de água fresca (captada do rio) nos chuveiros da máquina de papel, por água clarificada (já utilizada) e em transformar os resíduos plásticos retirados no processo, descartados no aterro municipal, em combustível, através da pirólise. O primeiro cenário proposto teve como resultado a diminuição da captação da água fresca do rio em 70%, economizando-se, em um mês, um volume de 10.108,8 m³. No segundo cenário, houve uma diminuição de 87,5% dos resíduos que eram descartados no aterro e uma economia, em média, por mês, de aproximadamente 447 toneladas de madeira, com a utilização do plástico como fonte de energia na caldeira.

Palavras-chave: Produção de Papel. Simulação Computacional. Resíduos. Água Fresca.

ABSTRAT

Amoroso, Carine Rosa Malena Garcia. **Sustainability in Recycling and Water Use in the Papermaking Industry through Computer Simulation**, 2020. Final Course Work (Graduation in Production Engineering). Pontifical Catholic University of Goiás, Goiânia.

This study aimed to develop a computer simulation model to demonstrate and evaluate sustainability in recycling and in the use of water in a paper production industry, through the Software Arena. For this, some steps were followed: system diagnosis, definition of variables, data collection and analysis, modeling and simulation, analysis of the current scenario and proposals for improvement. These proposals consisted of replacing the use of fresh water (taken from the river) in the showers of the paper machine, with clarified water (already used) and transforming the plastic waste removed in the process, discarded at the municipal landfill, into fuel, through pyrolysis. . The first proposed scenario resulted in a 70% decrease in fresh water intake from the river, saving a volume of 10,108.8 m³ in one month. In the second scenario, there was a decrease of 87.5% of the waste that was discarded in the landfill and an average savings of approximately 447 tons of wood per month, with the use of plastic as an energy source in the boiler.

Keywords: Paper production. Computational Simulation. Waste. Fresh water.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Produção global de papel e celulose e participação brasileira, em 2010 (em milhões de toneladas).....	14
Figura 2 – Produção mundial de papel, por tipo de papel produzido (%), em 2015.....	15
Figura 3 – Produção Brasileira por tipo de papel - x 1000 t., entre 2000 a 2015.....	15
Figura 4 – Evolução da Produção Brasileira de Papel, entre 2008 a 2018 – x 1000 t.....	16
Figura 5 – Visão estrutural de uma folha de papel ondulado	17
Figura 6 – Matérias-Primas na Fabricação do Papel.....	19
Figura 7 – Ilustração do Pulper.....	20
Figura 8 – Representação da Depuração	20
Figura 9 – Mecanismo da Refinação	21
Figura 10 – Alterações Morfológicas na Fibra.....	22
Figura 11 – Sistema <i>Approach Flow</i>	22
Figura 12 – Esquema de uma Máquina de Papel.....	23
Figura 13 – Má e boa formação da folha de papel	24
Figura 14 – Princípio da Prensagem.....	24
Figura 15 – Secagem do Papel	25
Figura 16 – Colagem Superficial.....	26
Figura 17 – Fluxograma de Aparas	27
Figura 18 – Categorias dos papéis produzidos no Brasil e seu destino na reciclagem	28
Figura 19 – Estimativa do consumo total de aparas em 2017, 2018 e 2019.	29
Figura 20 – Água na Fabricação de Papel	30
Figura 21 – Consumo de água na fabricação de diferentes tipos de papéis, em m ³ /t.....	31
Figura 22 – Formas de Estudo de um Sistema	32
Figura 23 – Esquema de um Modelo de Simulação	33
Figura 24 – Passos para a Modelagem e Simulação.....	34
Figura 25 – Simulação determinística (a) x estocástica (b).....	35
Figura 26 – Simulação Discreta x Contínua.....	36
Figura 27 – Exemplo de resultado do <i>Input Analyzer</i>	37
Figura 28 – Exemplo do <i>Output Analyzer</i>	38
Figura 29 – Elementos da Modelagem no Arena	38
Figura 30 – Empresa em Estudo.....	42

Figura 31 – Certificações de qualidade e sustentabilidade.....	43
Figura 32 – Planta de Situação	48
Figura 33 – Planta Baixa	49
Figura 34 – Fluxograma do sistema	51
Figura 35 – Mapofluxograma do processo	52
Figura 36 – Análise de dados pelo <i>Input Analyzer</i> para a variável chegada de aparas	55
Figura 37 – Módulo <i>Create</i>	56
Figura 38 – Módulo <i>Record</i>	57
Figura 39 – Módulo <i>Station</i>	57
Figura 40 – Módulo <i>Leave</i>	58
Figura 41 – Módulo <i>Decide</i>	59
Figura 42 – Módulo <i>Assign</i>	59
Figura 43 – Módulo <i>Process</i>	60
Figura 44 – Módulo <i>Dispose</i>	60
Figura 45 – Chegada de Aparas e de água.....	61
Figura 46 – Porcentagens de divisão do consumo de água	62
Figura 47 – Preparo de Massa	63
Figura 48 – Máquina de Papel.....	64
Figura 49 – Fim do Processo	65
Figura 50 – Exemplos de <i>Variables</i> usados na animação	65
Figura 51 – Animação do Cenário Atual.....	67
Figura 52 – Animação do cenário atual em funcionamento.....	68
Figura 53 – Medida de desempenho x <i>Warm up</i>	70
Figura 54 – Porcentagens para água fresca e clarificada.....	78
Figura 55 – Consumo de água na animação do cenário atual, em m ³	79
Figura 56 – Consumo de água na animação do cenário proposto, em m ³	79
Figura 57 – Comparação consumo de água fresca no cenário proposto e no atual (m ³).....	80
Figura 58 – Representação, na modelagem, de que o plástico não é descartado no aterro	81
Figura 59 – Resíduos que vão para o aterro, na animação do cenário atual, em toneladas.....	82
Figura 60 – Resíduos que vão para o aterro, na animação do cenário proposto, em toneladas.....	82
Figura 61 – Comparação resíduos no cenário proposto e no atual (toneladas).....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tamanho das Amostras	54
Tabela 2 – Relação das Distribuições.....	56
Tabela 3 – Produção de papel (t), consumo de aparas (t) e resíduos gerados (kg), no cenário real	70
Tabela 4 - Número de replicações x Medida de desempenho	71
Tabela 5 - Consumo de aparas x Produção de papel	72
Tabela 6 - Consumo de aparas x Produção de papel	73
Tabela 7 - Comparação modelo atual com o real, em valores médios	73
Tabela 8 - Divisão do consumo de água.....	74
Tabela 9- Consumo de água fresca nos chuveiros, em m ³ , com 20 replicações.....	74
Tabela 10 - pontos de utilização de água clarificada, com as respectivas vazões (m ³ /h).....	75
Tabela 11 - Poder calorífico em base seca de materiais	77
Tabela 12 – Consumo de água fresca e clarificada no cenário atual em comparação com o proposto	78
Tabela 13 – Média da vazão da água fresca e clarificada no cenário proposto e no atual, em m ³ /h.....	79
Tabela 14 - Resíduos descartados no aterro, no cenário atual e no proposto, em toneladas	81
Tabela 15 - Tempo de decomposição de materiais.....	83
Tabela 16 - Cálculo de economia de madeira na empresa em estudo	83

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABPO	Associação Brasileira de Papelão Ondulado
ABTCP	Associação Brasileira Técnica de Celulose e Papel
ANAP	Associação Nacional dos Aparistas de Papel
BPBES	<i>Brazilian Platform on Biodiversity and Ecosystem Services</i> (Plataforma Brasileira de Biodiversidade e Serviços Ecossistêmicos)
DQO	Demanda Química de Oxigênio
FAOSTAT	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i> (Organização de Alimentação e Agricultura das Nações Unidas)
FIEP	Federação das Indústrias do Estado do Paraná
IBÁ	Indústria Brasileira de Árvores
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MMA	Ministério do Meio Ambiente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
TMP	<i>Thermo Mechanical Pulping</i> (Pasta Termomecânica)

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO	11
CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO	14
2.1 PRODUÇÃO DE PAPEL	14
2.1.1 Cenário da Indústria de Papel	14
2.1.2 Tipos de Papel	16
2.1.3 Matérias-Primas Fibrosas	17
2.1.4 Matérias-Primas Não Fibrosas	18
2.1.5 Processos na Produção de Papel	18
2.2 SUSTENTABILIDADE	26
2.2.1 Reciclagem na Produção de Papel	26
2.2.2 Uso da Água na Produção de Papel	29
2.3 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS	31
2.3.1 Definição	31
2.3.2 Sistemas e Modelos	32
2.3.3 Etapas da Simulação	33
2.3.4 Tipos de Simulação	35
2.3.5 <i>Software</i> ARENA	36
2.4 Trabalhos Publicados de Referência	39
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE PESQUISA	42
3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA	42
3.2 ETAPAS DO MÉTODO	43
3.2.1 Diagnóstico do Sistema	43
3.2.2 Coleta e Análise de Dados	43
3.2.3 Modelagem e Simulação	45
3.2.4 Propostas de Melhorias	47
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES	48
4.1 Diagnóstico do sistema	48
4.2 Definição das variáveis	53
4.3 Coleta de Dados	54
4.4 Modelagem e Simulação	56
4.4.1 Chegada de Entidades	60
4.4.2 Divisão da água	61
4.4.3 Preparo da massa	62
4.4.4 Máquina de Papel	63

4.4.5 Saída de papel	64
4.4.6 Animação	65
4.4.7 Programação.....	69
4.4.8 Validação do Modelo	69
4.5 Número de replicações e precisão.....	70
4.6 Análise do cenário atual	72
4.7 Propostas de Melhorias	75
4.7.1 Cenário I.....	75
4.7.2 Cenário II	76
4.7.3 Comparação dos Cenários.....	77
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	84
REFERÊNCIAS	86
APÊNDICES	93
APÊNDICE A	93
APÊNDICE B.....	94
APÊNDICE C.....	95

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

O crescimento e o desenvolvimento da população mundial acentuaram a industrialização e a evolução das tecnologias e, com isso, os temas vinculados à sustentabilidade têm obtido grande foco e importância (KOSAI; YAMASUE, 2019). Dessa forma, surge a necessidade de, cada vez mais, as empresas aumentarem iniciativas ambientais em todas suas operações.

Com o modelo capitalista de produção da atualidade, as tecnologias se desenvolvem vertiginosamente, ocasionando comportamentos de consumo com nítido desperdício de recursos naturais (SALLES *et al.*, 2013). Dentro desse contexto, manifesta-se uma grande preocupação com a utilização desses recursos, que se encontram cada vez mais escassos.

No setor de papel, a reciclagem simboliza um importante aspecto socioeconômico. Além de contribuir para preservação de recursos naturais, preservando o meio ambiente, também pode ser uma fonte de ganhos financeiros (SCOTT e VIGAR-ELLIS, 2014). Dentro desse contexto, a utilização de fibras secundárias (fibras recicladas reutilizadas na produção) como matéria-prima para a fabricação do papel, no lugar de fibras vegetais, reduz o consumo proveniente de recursos naturais, como a celulose.

Faz-se importante ressaltar, também, que apesar da grande importância econômica do setor de papel e celulose, perante o conceito de Gestão de Recursos Hídricos, esse setor é um grande consumidor de água bruta, exibindo altas quantidades de DQO (Demanda Química de Oxigênio) e sólidos suspensos em seus efluentes (LEHR *et al.*, 2005). Dessa forma, é primordial que exista um tratamento de efluentes e uma reutilização da água no processo produtivo do papel, de modo que sempre haja uma melhoria contínua na forma de utilização desse recurso natural.

Dispor-se de ferramentas, técnicas ou métodos para tomada de decisão é essencial para que se tenha uma perspectiva abrangente e integral a respeito da conjuntura atual da organização. Em meio aos recursos de apoio ao processo decisório, a simulação computacional vem constatando efetividade, pois viabiliza simular variados cenários presentes nos processos produtivos e suas conexões (LIMA; *et al.*, 2003).

Diante disso, esse estudo utilizará a simulação computacional, através do *software* Arena, para demonstrar ações sustentáveis realizadas dentro de uma empresa no ramo de papéis e embalagens, no que se diz respeito à reciclagem e ao uso de água no processo de produção do papel.

À vista disso, abrem-se portas para um questionamento, onde a questão da pesquisa é: “Como utilizar um modelo de simulação computacional para demonstrar a sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em uma indústria de produção de papel?”

Tem-se como objetivo geral, desenvolver um modelo de simulação computacional para demonstrar e avaliar a sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em uma indústria de produção de papel. E, como objetivos específicos:

- Levantar o sistema de produção de papel, como foco na reciclagem e no uso da água;
- Construir um modelo de simulação demonstrando o processo de produção de papel de forma geral;
- Propor melhorias relacionadas à sustentabilidade ambiental.

Ainda, segundo *Global Footprint Network*, em 2019 o Planeta Terra atingiu o limite de uso de recursos naturais que poderiam ser renovados sem encargo ao meio ambiente. Desde 1970, o ser humano consome uma quantidade maior do que o planeta é capaz de se recuperar (G1, 2019).

Vale ressaltar que a reciclagem é um dos métodos mais comuns usados dentro da sustentabilidade, levando em conta suas consequências econômicas e efeitos ambientais (YILDIZ- GEYHAN; ALTUNCIFTCIOGLU; KADIRGAN, 2017). Porém, somente 13% dos resíduos sólidos urbanos são usados para reciclagem no Brasil (IPEA, 2017).

O esgotamento dos aterros sanitários, a falta de locais disponíveis para outros, a poluição crescente e o desperdício de materiais, mostram a existência de uma extrema necessidade de reavaliação de como o material restante após a utilização de bens ou serviços é tratado e descartado (RIBEIRO; FREITAS; CARVALHO *et al.*, 2015). Ainda, dentro desse contexto, o diretor técnico de P&D da Ibema, fabricante de papel cartão, afirma que quanto mais projetos de reciclagem houver, mais se consegue utilizar o material reciclado em seus produtos (MARTIN, 2019).

É importante salientar que a chamada “TI Verde” surge como uma opção sustentável, fornecendo políticas, pesquisas, produtos e práticas com o objetivo de reduzir os efeitos negativos que os avanços da tecnologia trazem para o meio ambiente (SALLES; DOLCI; LUNARDI, 2013). Dentro desse contexto, nota-se que a simulação computacional é primordial, pois possíveis mudanças podem ser simuladas previamente, com o intuito de prever o impacto no comportamento do sistema (BANKS *et al.*, 2005).

Dessa forma, ao observar como o planeta se encontra atualmente, com o consumo cada vez mais exacerbado, com o desenvolvimento da tecnologia e com a escassez dos recursos

naturais, é primordial que ações voltadas para o desenvolvimento sustentável se implantem cada vez mais nas organizações. Não só as empresas devem ficar atentas a isso, mas também a sociedade como um todo, pois a saúde e a evolução da humanidade dependem de como se encontra o meio ambiente.

CAPÍTULO 2 - REFERENCIAL TEÓRICO

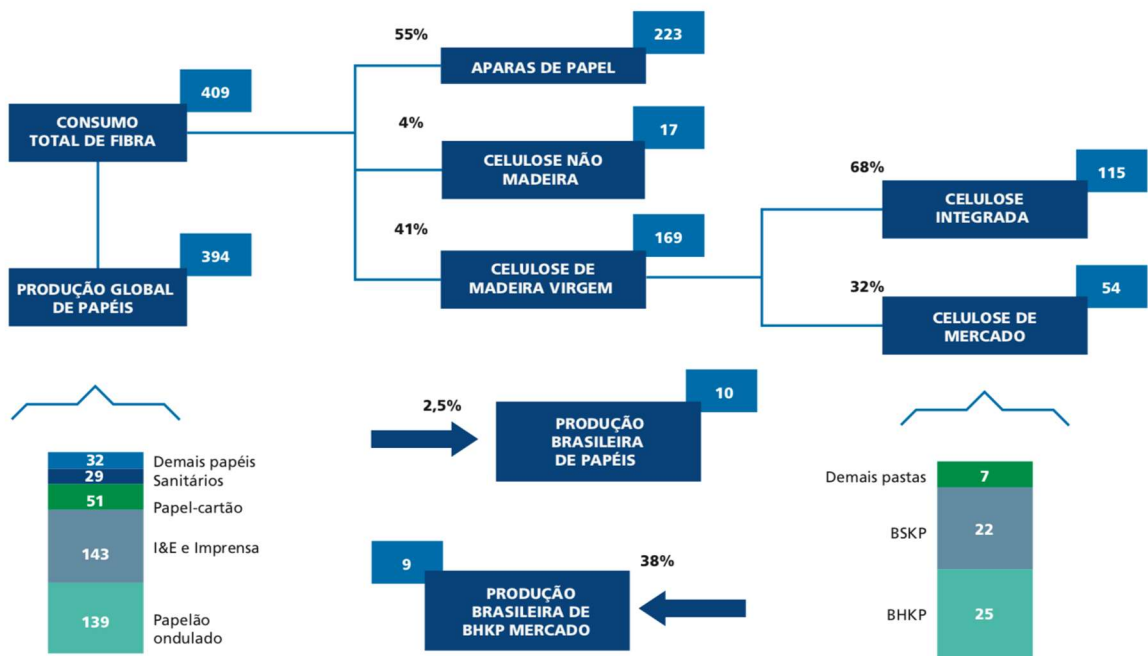
2.1 PRODUÇÃO DE PAPEL

2.1.1 Cenário da Indústria de Papel

A produção mundial de papel teve um crescimento de aproximadamente 50 milhões de toneladas em 1950 para 398 milhões em 2013. Até o ano de 2030, esse valor deverá alcançar 482 milhões de toneladas, implicando em uma taxa de crescimento de 1,1% ao ano (PÖYRY, 2016).

Além disso, na Figura 1, pode ser visto a produção global de celulose em contraste com a produção de papel, assim como a participação brasileira, em 2010. Nela, nota-se que o papelão ondulado foi o segundo tipo de papel que mais se produziu (139 milhões de toneladas) e, também, que dentro do consumo total de fibra, a utilização de aparas de papel, que é a opção reciclada, possui a maior porcentagem, totalizando 55%.

**Figura 1 - Produção global de papel e celulose e participação brasileira, em 2010
(em milhões de toneladas)**



*I&E: imprimir e escrever

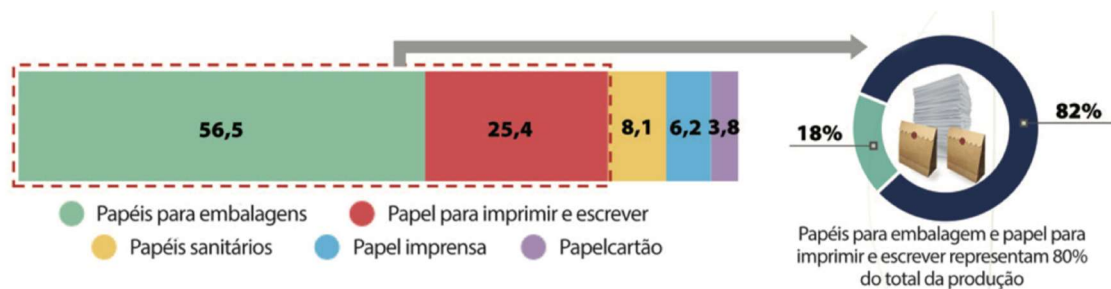
*BSKP: celulose de mercado branqueada *kraft* de fibra longa

*BHKP: celulose de mercado branqueada *kraft* de fibra curta

Fonte: adaptado de BNDES (2010)

Dividindo o mercado de papel de acordo com suas categorias, nota-se que os papéis para embalagem representam 56% do total da produção e 25% do total corresponde a papel para imprimir e escrever, como pode ser visto na Figura 2 (FIEP, 2016).

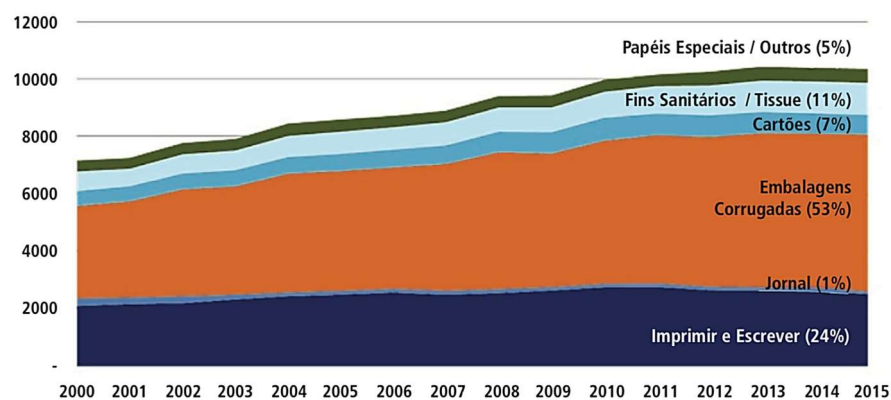
Figura 2 – Produção mundial de papel, por tipo de papel produzido (%), em 2015



Fonte: FIEP (2016)

É previsto que o mercado de papel na América do Sul cresça a uma taxa 2% ao ano entre 2015 e 2030. O Brasil enquadra-se como maior produtor de papel nessa região, onde a maior quantidade produzida refere-se à papéis *containerboard* (para embalagens) (PÖYRY, 2016). A produção brasileira de papel por tipo pode ser vista na Figura 3, onde papel para embalagens corrugadas (papelão ondulado) é o tipo mais produzido.

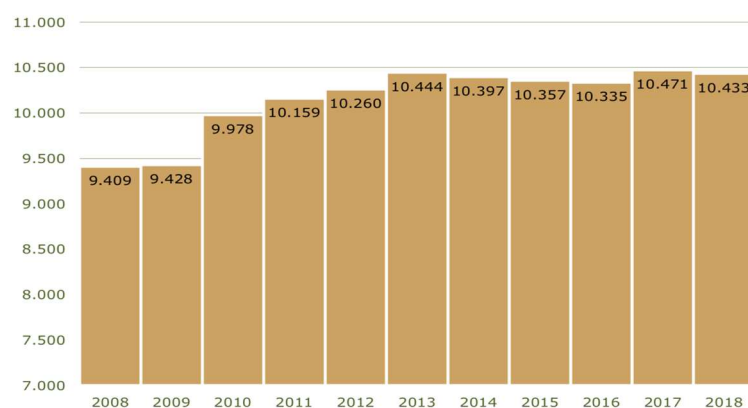
Figura 3 – Produção Brasileira por tipo de papel - x 1000 t., entre 2000 a 2015



Fonte: IBÁ (2016)

No ano de 2018, o Brasil posicionava-se em oitavo lugar no ranking mundial dos produtores de papel, com 10,4 milhões de toneladas, tendo uma pequena retração de 0,4% em relação à 2017. O principal motivo desse resultado foi a diminuição das exportações, que ficaram 4,6% abaixo do volume apontado em 2017 (IBÁ, 2019). A evolução da produção brasileira de papel é mostrada na Figura 4, mostrando que é um mercado que se mantém constante.

Figura 4 - Evolução da Produção Brasileira de Papel, entre 2008 a 2018 – x 1000 t.



Fonte: IBÁ, 2019

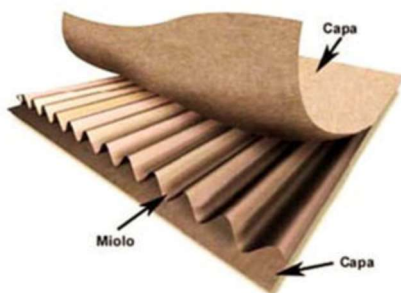
2.1.2 Tipos de Papel

Existem inúmeros tipos de papel, porém, os mais relevantes para esse estudo serão explicados a seguir, segundo Bachmann (2013).

- **Papelão Ondulado (Corrugado):** Papel grosso, composto de folhas alternadas de papel plano (capa) e corrugado (miolo). Utilizado na fabricação de caixas e chapas.
- **Miolo para Papelão Ondulado (“Fluting”):** Papel fixado a um ou mais elementos planos (entre as capas). Passa por um processo de ondulação para a fabricação de papelão ondulado.
- **Capa de 1ª para Papelão Ondulado (“Kraftliner”):** Feito com grande quantidade de fibras virgens. Atende os parâmetros de resistência mecânica necessárias para uma capa ou forro de embalagens de papelão ondulado.
- **Capa de 2ª para Papelão Ondulado (“Testliner”):** semelhante ao *kraftliner*, entretanto, com propriedades mecânicas inferiores, consequência da utilização de matérias-primas recicladas em grande proporção.
- **White Top Liner:** Produzido com grande presença de fibras virgens. Atende os parâmetros de resistência mecânica necessárias para uma capa ou forro de embalagens de papelão ondulado.
- **Papel Kraft:** Papel utilizado em embalagem, em que a principal característica é a sua resistência mecânica, podendo ser fabricado com pasta *Kraft* branqueada ou não branqueada.

Na Figura 5, pode ser vista a estrutura básica de uma folha de papel ondulado, onde têm-se a primeira e a segunda capa e o miolo, utilizada na fabricação de caixas e chapas.

Figura 5 - Visão estrutural de uma folha de papel ondulado



Fonte: Cartonagem Vision (2016)

2.1.3 Matérias-Primas Fibrosas

Segundo Campos (2011), Araújo (2010) e Jaeger (2001), as matérias-primas fibrosas utilizadas para a produção de papel são obtidas da madeira e de outros vegetais (“*non wood vegetable fibers*”). A maior parte das fibras utilizadas na fabricação de papel são originadas da madeira, responsáveis por mais de 90% do volume produzido.

- Fibras Vegetais do Tipo Madeira

São classificadas em “*softwoods*” (coníferas), como o pinho e a araucária, sendo fonte de fibras longas, utilizadas em papéis que necessitam de alta resistência física e mecânica (papéis de embalagens) e em “*hardwoods*” (folhosas), como o eucalipto, sendo fonte de fibras curtas, utilizadas em papéis que não exigem altos valores de resistência física e mecânica. As fibras virgens são aquelas que são utilizadas pela primeira vez na fabricação de papel, a contar de sua obtenção.

- Fibras Recicladas

Também chamadas de fibras secundárias, são fibras obtidas de papéis e cartões já processados ou descartados, ou seja, é a fibra reutilizada na produção. São divididas em duas categorias: aparas e papéis já utilizados. As aparas, junto a materiais refugados e não usados, têm como resultado um processo industrial que transformam esses papéis em variados artefatos. Estão no grupo de pré-consumo. Já os papéis usados são os papéis e artigos de papel descartados após a utilização, pelo usuário final. Estão no grupo de pós-consumo.

2.1.4 Matérias-Primas Não Fibrosas

De acordo com os mesmos autores, matérias-primas não fibrosas são aquelas usadas para melhorar determinadas propriedades do papel, atuando no desempenho do processo. As principais são cargas minerais, amidos, agentes de colagem interna e agentes de retenção e drenagem e microbiocidas.

- **Cargas Minerais:** Substâncias inorgânicas de origem natural ou sintética, aplicadas na massa ou superfície do papel para impressão. Têm como objetivo uniformizar a superfície do papel, melhorando a receptividade da tinta de impressão. São eles: carbonato de cálcio, caulim e dióxido de titânio.
- **Amido:** Polissacarídeos existente em sementes, principalmente em leguminosas. São utilizados na massa e na superfície do papel, para aumentar a resistência mecânica, melhorar as propriedades superficiais e impedir a entrada de líquidos.
- **Agentes de Colagem Interna:** utilizados para impermeabilizar as fibras de forma parcial, tornando o papel mais adequado à impressão, protegendo-o de variações da umidade relativa. Podem ser ácidos ou alcalinos.
- **Agentes de Retenção:** polieletrólitos capazes de aglomerar micro partículas, finas cargas e colóides em dimensões suficientes para ficarem retidas durante a formação do papel, exercendo grande influência nas propriedades do papel. Podem ser inorgânicos e orgânicos naturais ou sintéticos. Os principais são os coagulantes e os floculantes.
- **Microbiocidas:** controla os microrganismos existentes no processo, deixando a máquina com baixo nível de fungos e bactérias, ampliando o intervalo entre as limpezas químicas.

2.1.5 Processos na Produção de Papel

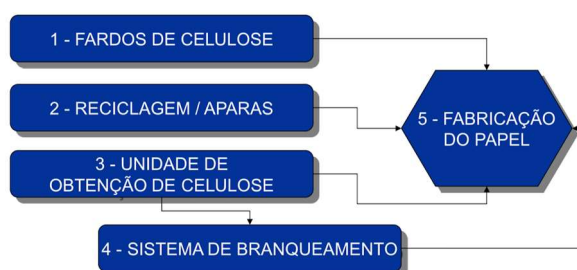
A produção de papel pode ser feita por meio de fibras virgens ou de recicladas. A virgem é aquela usada pela primeira vez. A reciclada é qualquer matéria fibrosa que já passou pelo processo produtivo e está sendo reutilizada como matéria-prima para a fabricação de um novo papel. Com um tratamento correto, o papel feito através de fibras recicladas pode se comparar ao de fibras virgens (SMOOK, 2002).

Nesse estudo, utilizou-se a apra (origem reciclada) como matéria-prima e o papel

produzido para embalagens, podendo ser *Kraftliner*, *TestLiner*, *White Top Liner* ou Miolo.

A Figura 6 mostra o esquema das matérias-primas utilizadas para a fabricação de papel, podendo ser celulose, aparas e unidade de obtenção de celulose.

Figura 6 – Matérias-Primas na Fabricação do Papel



Fonte: KLOCK, ANDRADE (2020)

Depois da matéria prima, tem-se os principais processos para a produção de papel para embalagens, explicados a seguir.

2.1.5.1 Desagregação

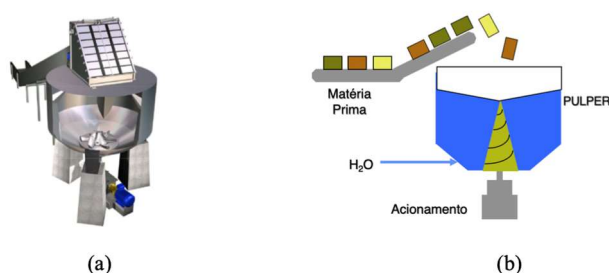
O desagregador é um grande batedor com um rotor no seu centro, que é responsável pela movimentação da massa, fragmentando as fibras até que sejam individualizadas.

Fibras primárias (virgens), fibras recicladas ou refugos da máquina de papel são adicionados à água para formar uma massa em suspensão. A desagregação ideal é selecionada de acordo com a matéria-prima utilizada, com o tamanho da produção e com o volume de contaminantes. Para as fibras recicladas, além de ocorrer o desfibramento, há a remoção de rejeitos. É importante que haja um equilíbrio entre a consistência, trabalho mecânico, tempo de permanência e temperatura para que as impurezas não sejam destruídas desnecessariamente (VOITH, 2020).

Em relação ao processo, podem ser contínuos ou por batelada. Já em relação a forma, podem ser horizontais, verticais ou por tambor. No sistema contínuo, os fardos alimentam o *pulper* de forma contínua, com a velocidade proporcional à entrada de água. O por batelada normalmente é usado quando se necessita de uma maior limpeza e isenção de impurezas (OLIVEIRA, 2016).

A ilustração do *Pulper* pode ser observada na Figura 7.

Figura 7 – Ilustração do Pulper



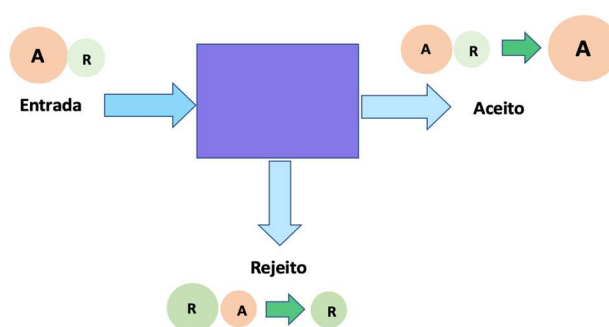
Fonte: (a): OLIVEIRA (2016); (b) Adaptado Araújo (2020)

2.1.5.2 Depuração da massa

É o tratamento mecânico que visa retirar matérias estranhas e impurezas da massa fibrosa. A qualidade do papel está completamente ligada ao nível de limpeza desse processo. Um rejeito é capaz de trazer problema à qualidade da folha de papel e para seu processo produtivo (SUNDHOLM, 1999).

Segundo Campos (2011), o maior desafio desse processo é fazer com que o “aceito” tenha menos “rejeito”, da mesma forma que o “rejeito” tenha menos “aceito”. Isso pode ser demonstrado na Figura 8, sendo “A” uma indicação para “Aceito” e “R” para “Rejeito”.

Figura 8 - Representação da Depuração



Adaptado de Campos (2009)

Essas impurezas podem ainda ser classificadas em três tipos: pesadas e volumosas, pesadas e finas e, por fim, leves. Os tipos de depuração mais conhecidos são: peneiramento ou *screen*, em que a depuração é plana, rotativa e pressurizada (depurador vertical) e centrifugação ou *cleaner* (depurador centrífugo).

A depuração por peneiramento é feita por meio de uma relação entre os componentes da massa, principalmente em função do formato e tamanho. São classificadas em peneiras planas ou vibratórias, peneiras rotativas e peneiras pressurizadas (de baixa pressão). Na centrifugação, o fracionamento é feito conforme a densidade. Pode-se classificar em separadores de massa grossa e *centricleaners* ou hidrociclones.

2.1.5.3 Refinação

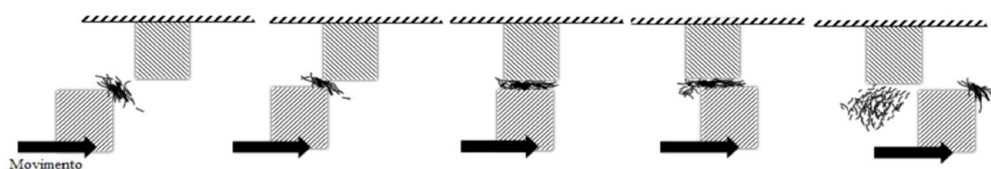
A refinação é um tratamento mecânico realizado nas fibras, com o objetivo de alterar sua estrutura, melhorando a homogeneidade e as propriedades de resistência mecânica do papel (GHAREHKHANI *et al.*, 2015; STOERE; NAZHAD; KEREKES, 2001).

Outro objetivo da refinação é alterar propriedades das fibras para obter certas características do papel. Esse processo aprimora a capacidade das fibras de se unirem devido às mudanças nas paredes celulares. Isso aumenta a conformabilidade, resultando na homogeneidade da folha. Esse processo, normalmente, aumenta a resistência física e diminui as características ópticas da folha (LUNDIN *et al.*, 2009).

Quando as fibras entram em contato com a água, sua superfície e seus poros a absorvem, ocasionando um inchaço na parte interna. No refinador, as ligações da fibra vão se quebrando, gerando a separação de suas paredes. As fibrilas saem da estrutura principal da fibra e novas superfícies são expostas à água, tendo como consequência o aumento da flexibilidade das fibras (GIERTZ, 1993).

O mecanismo de refino pode ser visto na Figura 9, onde é possível visualizar o tratamento mecânico das fibras.

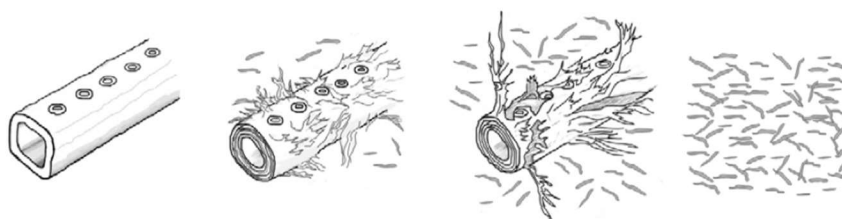
Figura 9 – Mecanismo da Refinação



Fonte: FAVARO (2015)

Os processos descritos têm como consequência o colapso das fibras, causados por suas alterações morfológicas, ilustrado na Figura 10.

Figura 10 – Alterações Morfológicas na Fibra

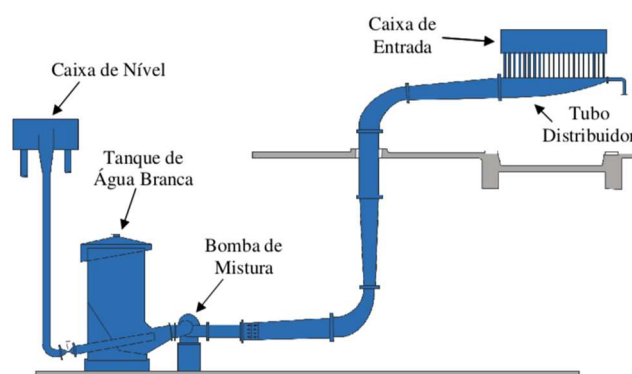


Fonte: FAVARO (2015)

2.1.5.4 Circuito de Aproximação (“*Approach Flow*”)

O sistema *approach-flow* é uma divisão da região de preparação da massa, que faz conexão com a seção de formação da máquina de papel. Sua finalidade é medir, diluir e transportar a massa, abrangendo químicos e aditivos, onde a mesma é bombeada para a caixa de entrada por meio da bomba de mistura, sendo despejada na tela formadora da máquina (MORAES; PESCIO, 2020). Esse sistema pode ser visto na Figura 11.

Figura 11 – Sistema *Approach Flow*

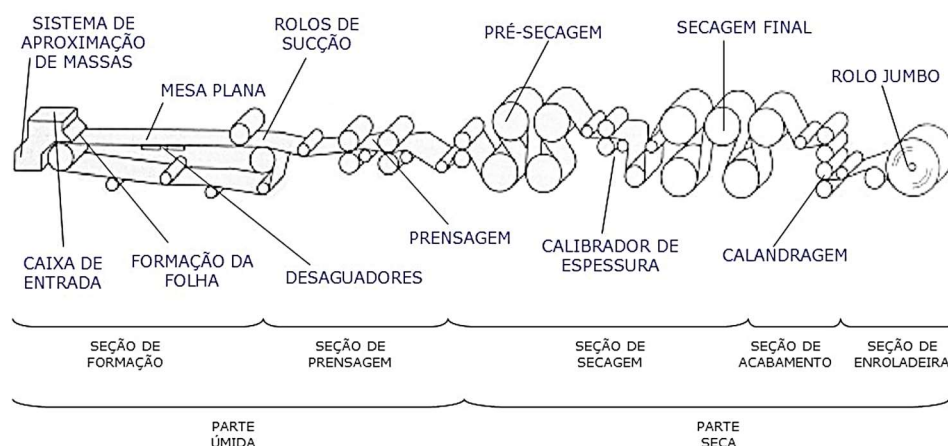


Fonte: MORAES; PESCIO (2020)

2.1.5.5 Máquina de Papel

A esquematização da máquina de papel pode ser vista na Figura 12, onde cada etapa será explicada a seguir.

Figura 12 – Esquema de uma Máquina de Papel



Fonte: KLOCK, ANDRADE (2020)

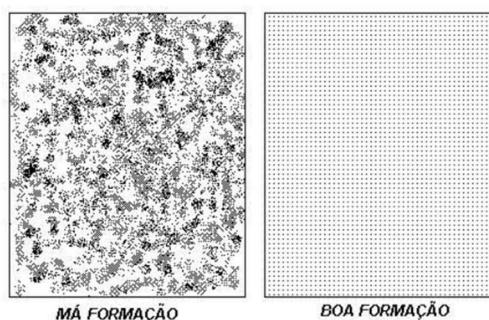
I. Caixa de Entrada

Com isso, a massa fica uniforme, com uma distribuição de fibras de forma definida e com velocidade constante e harmônica em relação à tela. Embora a caixa de entrada não seja responsável pela formação propriamente dita da folha, a boa qualidade da formação do papel está ligada à distribuição de massa e ao nível de floculação (NISKANEN, 2000). Elas podem ser pressurizadas, hidráulicas ou de várias camadas.

II. Seção de Formação da Folha de Papel

É a região onde cerca de 95% da água é removida. Esse processo deve ser realizado de forma gradativa, para reduzir a perda de sólidos, conservar a eficiência de operação e drenagem, alcançar uma folha com propriedades de qualidade dentro dos padrões requisitados e entregá-la para a área de prensagem com a maior taxa de sólidos possível (FILHO; LEITIS, 2013). A Figura 13 demonstra a diferença entre uma boa e uma má formação da folha.

Figura 13 – Má e boa formação da folha de papel



Fonte: CAMPOS (2011)

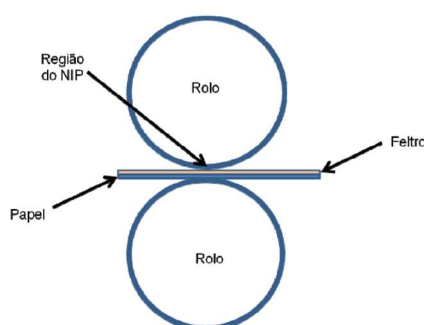
III. Prensagem

A área da prensagem é um prolongamento da seção de formação do papel. Seu principal objetivo é extrair a água, estabelecer e aprimorar as propriedades físicas da folha e proporcionar uma boa resistência à umidade para que haja um bom desempenho na próxima etapa, a secagem. Originalmente, a prensagem úmida é fundamentada na compressão mecânica da folha, entre dois rolos em conexão com um feltro. Esse processo afeta a qualidade da folha e a economia do processo (PAULAPURO, 2000).

Atualmente, em máquinas de alta velocidade, esse processo é realizado com rolos de sucção ou rolos ventilados, que possuem uma eficácia de extração de água maior que as prensas de rolos lisos. Essa remoção é realizada pela combinação da compressão mecânica e da absorção, empregada por meio da porosidade do rolo inferior (CAMPOS, 2011)

O princípio básico da prensagem está ilustrado na Figura 14, ilustrada por dois rolos cilíndricos entre um feltro, pressionando a folha de papel.

Figura 14 – Princípio da Prensagem



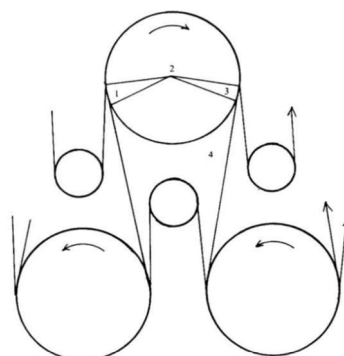
*NIP: zona de contato entre os rolos

Fonte: DRUMMOND (2008)

IV. Secagem

Na máquina de papel convencional, a secagem da folha é feita por meio de seu contato com cilindros secadores que usam vapor saturado como fonte de energia. A partir do vapor, o calor é transferido, proveniente da vaporização e do calor condensado formado dentro dos cilindros. Através do condensado e dos cilindros, esse calor é transportado para a sua superfície exterior, que estão em contato com a folha do papel (POCOVI, 1988). Ou seja, retira-se a água restante da folha de papel por meio do calor do vapor. Na Figura 15, a secagem do papel é ilustrada, representando os cilindros secadores e a folha de papel passando entre eles.

Figura 15 – Secagem do Papel

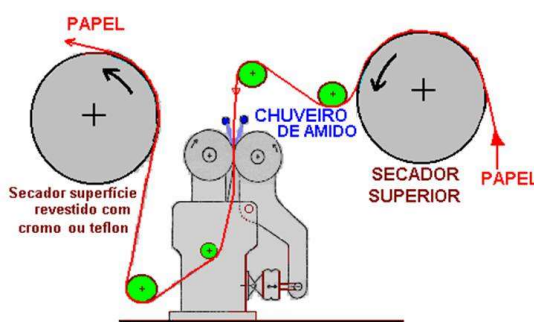


Fonte: CAMPOS (2011)

V. Colagem superficial

Esse processo baseia-se na aplicação de componentes na folha de papel. São colocados produtos químicos como amido, cola, álcool polivinílico etc. Esse processo aperfeiçoa as ligações entre as fibras, ocupando os espaços vazios e os poros da folha, aumentando sua resistência mecânica e impermeabilidade da água (FARDIM, 2002). A ilustração desse processo pode ser vista na Figura 16, mostrando a aplicação do químico amido na folha, garantindo sua impermeabilidade.

Figura 16 – Colagem Superficial



Fonte: ARAÚJO (2010)

VI. Calandragem

Consiste no papel seco, passando-o por um processo mecânico de fricção entre dois rolos sob pressão. Isso faz com que haja uma compressão e uma plastificação da folha, corrigindo irregularidades, aumentando a maciez e a densidade das fibras (ALLEM, 1998; STRÖM *et al.*, 1995).

VII. Enroladeira

É a última etapa da fabricação de papel, onde a folha de papel é enrolada em tubos de ferros (estangas), formando rolos. A tensão deve ser uniforme em toda a largura da folha, existindo um sistema de trocas de rolos (ARAÚJO, 2010).

2.2 SUSTENTABILIDADE

2.2.1 Reciclagem na Produção de Papel

No setor do papel, a reciclagem simboliza um importante aspecto socioeconômico. Além de contribuir para preservação de recursos naturais, protegendo o meio ambiente, também pode gerar ganhos financeiros (SCOTT e VIGAR-ELLIS, 2014).

Esses ganhos ocorrerão no aproveitamento das fibras de celulose do papel usado e sua reutilização na produção de novos papéis, por meio de processos industriais submetidos à aparas e a papéis velhos (SILVA; SANTOS; CLETO, 2019).

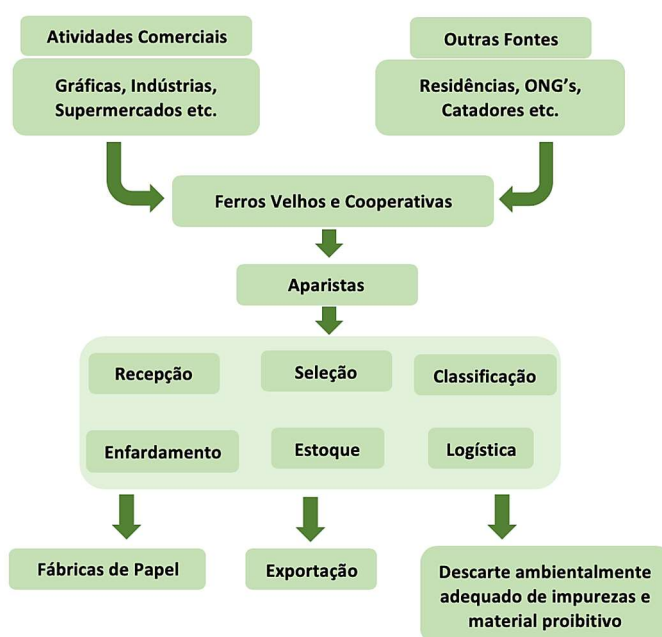
A coleta dos materiais que irão se transformar em aparas de papel é realizada, majoritariamente, por catadores. Os catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis exercem

um papel essencial na execução da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com foco na gestão integrada desses resíduos. Atuam na coleta seletiva, triagem, classificação, organização e comercialização desses materiais, colaborando de forma primordial para o ciclo da reciclagem. Podem trabalhar de forma autônoma ou por meio de cooperativas e organizações (MMA, 2020).

Ainda, essa coleta, assim como seu processamento, aumenta a vida útil dos aterros e reduz a utilização de recursos naturais, pois, abastece indústrias que são adeptas à reciclagem e que reutilizam esses materiais em sua produção, principalmente em substituição às matérias-primas virgens. A PNRS reconhece o resíduo sólido reciclável e reutilizável como tendo valor social e econômico, gerando trabalho e renda e promovendo a cidadania.

A transformação do papel velho em aparas de papel é realizado por aparistas, sendo esse um comércio que produz e comercializa matérias-primas para as indústrias de papel. Na Figura 17, pode ser visto como funciona o fluxo das aparas (ANAP, 2019).

Figura 17 – Fluxograma de Aparas

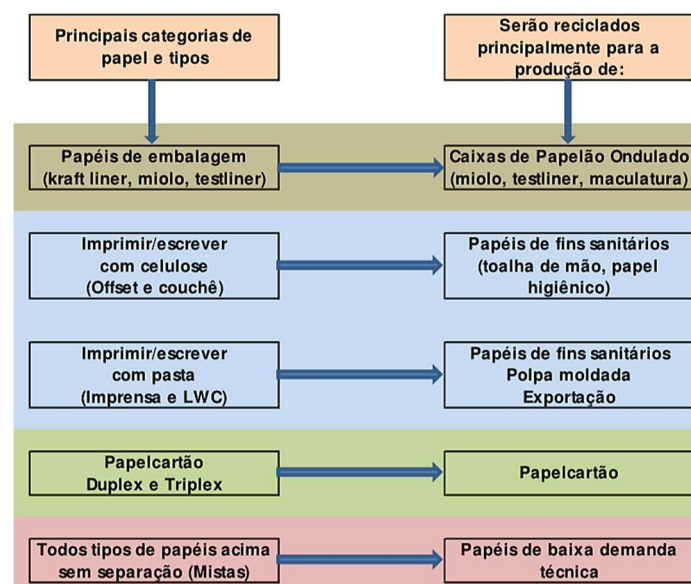


Fonte: Adaptado do Relatório Anual ANAP (2019)

Ainda segundo a ANAP (2019), a destinação das aparas compõe diferentes tipos de mercado. Por exemplo, as aparas brancas, em sua maioria, destinam-se para a fabricação de papéis para fins sanitários (papel *tissue*), não sendo suscetíveis à reciclagem, tendo apenas um ciclo. Já as aparas para embalagem, são recicladas no próprio processo produtivo, podendo

passar pela reciclagem várias vezes. A Figura 18 mostra as categorias dos papéis produzidos no Brasil e seu destino na reciclagem.

Figura 18 - Categorias dos papéis produzidos no Brasil e seu destino na reciclagem



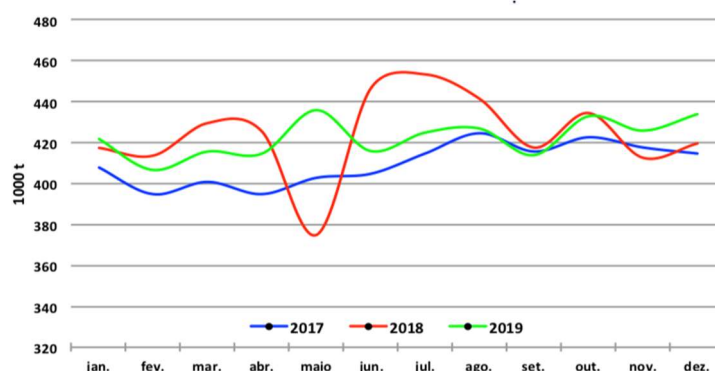
Fonte: ANAP (2019)

O consumo de aparas de papel em dezembro de 2019 foi de 434 mil toneladas, resultando em um aumento de 3,4% em relação a dezembro de 2018. Esse consumo fechou o ano de 2019 em 5,07 milhões de toneladas, com uma pequena queda de 0,4% em relação a 2018. Isso se deu devido ao ótimo desempenho da expedição de caixas e chapas de papelão ondulado, segundo Associação Brasileira do Papelão Ondulado (ABPO) (O Papel, 2020).

Ainda, a boa atividade da indústria recicladora de papel não bastou para diminuir os estoques de aparas, mas o fato de terem se mantido com os mesmos volumes nos últimos três meses de 2019 é sinal de grande consumo, pois, normalmente, nos dois primeiros e dois últimos meses do ano há uma tendência de restarem materiais, ocasionando um aumento de estoque, o que não ocorreu nesse ano.

A estimativa do consumo total de aparas nos anos de 2017, 2018 e 2019 pode ser visto na Figura 19, onde é possível notar-se uma queda em maio de 2018.

Figura 19 – Estimativa do consumo total de aparas em 2017, 2018 e 2019.



Fonte: O Papel (2020)

2.2.2 Uso da Água na Produção de Papel

Na fabricação de papel, a água é o elemento mais usado, responsável pelo transporte e distribuição das fibras de celulose, também sendo usada em diluições, estando no produto final, em massa, em 5% a 10% (ALEXANDERSSON, 2003; PENG, 2001).

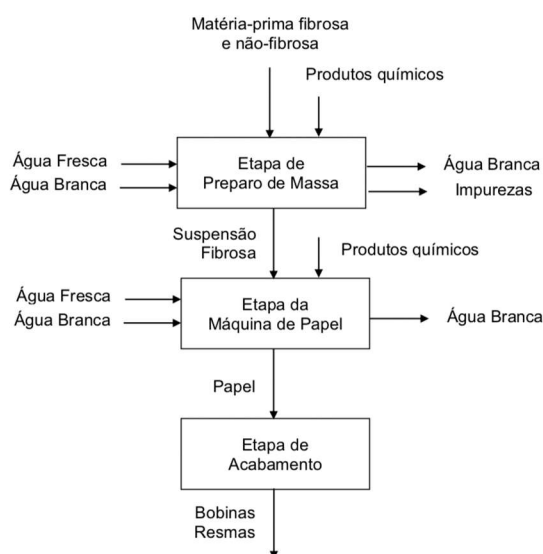
Esse insumo também é usado na geração de vapor, sendo fonte de calor e, também, podendo ser gerador de energia elétrica (ARANTES *et al.*, 2000).

Segundo Dolny (2011), as principais denominações para a água usada na fabricação de papel são: água fresca, morna, branca e clarificada. A fresca é a proveniente da estação de tratamento ou a reutilizada que não teve relação com as fibras; a morna, possui as mesmas características da fresca, porém, com temperatura de pelo menos 30°C; e a branca, é proveniente da área de formação da máquina de papel, contendo fibras e aditivos. A clarificada, segundo Gess (1998), é o resultado da água branca tratada, para diminuição de sólidos suspensos.

A água branca se dá devido ao fato que, no transporte, partes das fibras se perdem na água. Com isso, também se perdem materiais de carga, caolim, cola e outros componentes do papel. Isso não só é um desperdício de material, como também é um fator de poluição da água, transportando, para ela, cor e turbidez, aumentando a Demanda Química de Oxigênio (DBO). A recuperação dessas fibras é uma ação padrão, sendo feita usualmente através do processo de sedimentação ou flotação onde, também, a água é reaproveitada e recirculada (NUNES, 2007).

A Figura 20 mostra as correntes de água na fabricação de papel.

Figura 20 – Água na Fabricação de Papel



Fonte: DOLNY (2009)

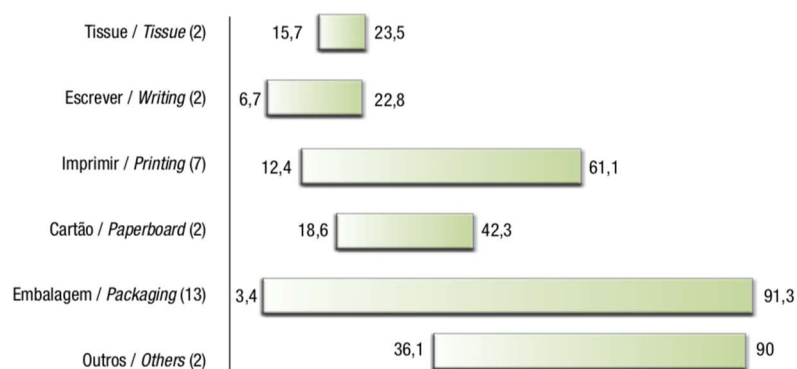
A máquina de papel é, basicamente, um equipamento desaguador, pois, o processo de fabricação de papel requer alta diluição da suspensão fibrosa para que haja homogeneidade na folha de papel. Assim, a drenagem ou desaguamento durante o processo requer grande atenção (BARBOSA, 2015).

Segundo SMOOK (1990), a quantidade de água determina a concentração de fibras na suspensão. Na etapa de desagregação, em muitas situações, recebe água de retorno do processo, com o intuito de recircular a água branca restante dos processos.

A maior quantidade de água da máquina de papel circula mediante do circuito de aproximação (“*approach flow*”). A água branca drenada da seção de formação da folha de papel equivale a, aproximadamente, 98% em massa da água retirada na máquina de papel, sendo introduzida novamente no processo, por meio do *Approach Flow* (DOLNY, 2011).

Um estudo feito por Bachmann (2009), com dados de 2006 e com 28 fábricas, demonstrou o consumo de água na fabricação de papel, o que variou de 3,4 a 91,3 m³ de água por tonelada de papel. Os resultados podem ser vistos na Figura 21.

Figura 21 - Consumo de água na fabricação de diferentes tipos de papéis, em m³/t



Fonte: Bachmann & Associados; ABTCP (2006).

*Os números entre parênteses representam a quantidade de fábricas.

De acordo com Thompson *et al.* (2001), no que se diz respeito ao tratamento de água, a maioria dos setores de tratamento de efluentes líquidos em indústrias de papel e celulose é constituída da seguinte forma: sedimentação ou flotação, sendo o tratamento primário; processos biológicos (aeróbio ou anaeróbio), sendo o tratamento secundário; e, tratamento terciário, se os processos anteriores não conseguirem eliminar todas as impurezas e contaminantes.

2.3 SIMULAÇÃO DE SISTEMAS

2.3.1 Definição

A simulação computacional de sistemas baseia-se no emprego de determinadas técnicas matemáticas, usadas em computadores, que reproduzem qualquer situação ou processo do mundo real, ou seja, estuda o comportamento de sistemas reais por meio do desempenho de modelos (PARAGON, 2019).

Vale ressaltar que a simulação apresenta uma nova forma de analisar processos sociais e econômicos, onde o surgimento de comportamentos complexos acontece a partir de atividades simples. Esse método de modelagem pode explicar, realizar e legitimar uma teoria (SIEBERS *et al.*, 2007).

Segundo Chwif e Medina (2010), a simulação prevê, com certa confiabilidade, o comportamento de um sistema por meio de determinadas entradas, de acordo com as condições do ambiente, sendo um método de análise de cenários.

Um modelo de simulação é uma opção ao experimento direto com o sistema real (atual

ou proposto), pois, essa experimentação, normalmente, interrompe o desempenho do sistema, acarretando custos ou sendo, até mesmo, impossível (LAW 2009).

Segundo Banks *et al.* (2005), possíveis mudanças no sistema real podem ser simuladas antecipadamente, para antever impactos no comportamento do sistema, sendo útil para examinar questões como “o que ocorre se...” em relação ao sistema real.

De acordo com Freitas Filho (2008), existem três motivos mais comuns para a utilização de modelos simulados, sendo eles: planejamento de um futuro sistema, pois, o real ainda não é existente; a experimentação com o sistema real não é custo efetivo e, no modelo simulado, é possível fazer testes com custo reduzido; para certos sistemas, não há a possibilidade de testes, sendo necessária a simulação.

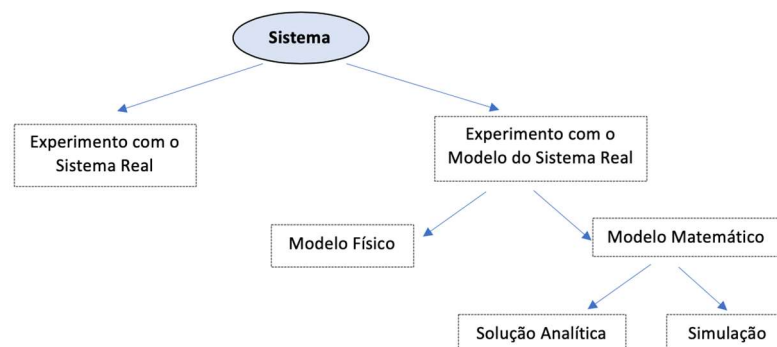
2.3.2 Sistemas e Modelos

Para Freitas Filho (2008), os termos “sistemas” e “modelos” são de extrema importância para a compreensão da simulação.

Um sistema pode ser definido como um conjunto de elementos que agem e se relacionam entre si, com o intuito de atingir um objetivo ou uma finalidade lógica. Esse conjunto pode ser composto, por exemplo, de pessoas ou máquinas (TAYLOR, 1970).

Existem vários sistemas que estão aptos à simulação, podendo citar: sistemas de produção, administrativos, computacionais e de prestação de serviços diretos ao público (REZENDE, 2020). As formas de estudo de um sistema podem ser vistas na Figura 22.

Figura 22 – Formas de Estudo de um Sistema

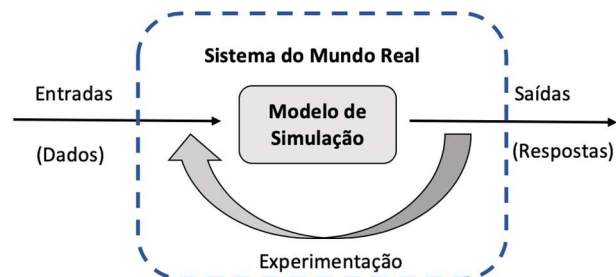


Fonte: Adaptado de Law e Kelton (2000)

Já um modelo é a representação de um sistema, objeto ou ideia, de uma forma diferente do que a própria entidade (SHANNON, 1975). O modelo computacional proporciona que variados cenários sejam avaliados, através da modificação de parâmetros, onde os resultados

servirão de base para o reconhecimento de soluções para o problema real (LAW e KELTON, 1991). O esquema de um modelo de simulação pode ser visto na Figura 23.

Figura 23 – Esquema de um Modelo de Simulação



Fonte: Adaptado Freitas Filho (2008)

2.3.3 Etapas da Simulação

A passos para a formulação da simulação são explicados a seguir, com base em Freitas Filho (2008) e Chwif e Medina (2010), sendo ilustrados de forma resumida na Figura 24.

a. Etapa do Planejamento:

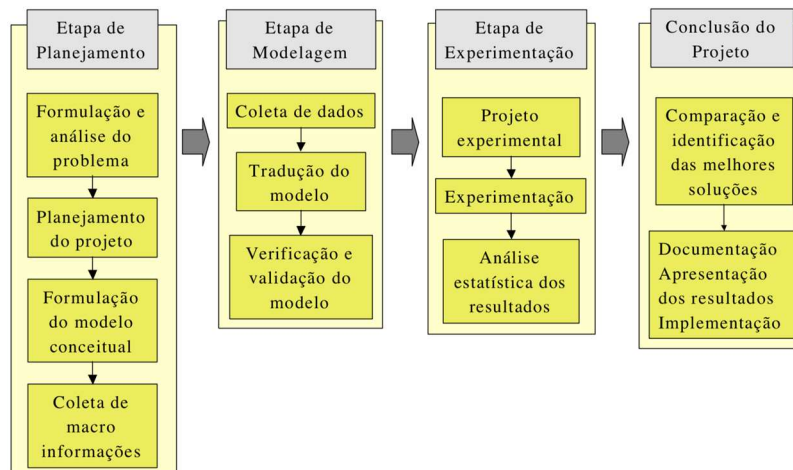
- **Formulação e Análise do Problema:** define o motivo do problema estar sendo estudado, o que se espera alcançar com o estudo, quais os parâmetros para a análise do desempenho do sistema;
- **Planejamento do Projeto:** etapa onde a intenção é verificar a disponibilidade dos recursos, suporte, hardware, software e pessoal. Também descreve o cronograma das ações e os custos;
- **Formulação do Modelo Conceitual:** define-se a estratégia da modelagem, o nível de detalhamento, o escopo do modelo, os fluxos e cenários, a reportagem dos resultados e as entradas dos dados;
- **Coleta de Macro Informações:** são fatos e estatísticas primordiais, consequência de análises, experiências pessoais ou dados históricos, que terão importância na futura coleta de dados.

b. Etapa da Modelagem

- **Tradução do Modelo:** codificação do modelo em devida linguagem de simulação, determinando quem fará essa tradução e a forma da comunicação entre programadores e gerentes;

- Verificação e Validação: verificar e confirmar se o modelo gera informações confiáveis e aceitáveis, se a operação do modelo está de acordo com os parâmetros do analista e se possui erros.
- c. Etapa de Experimentação
- Projeto Experimental Final: idealizar os experimentos que produzam as informações desejadas;
 - Experimentação: execução da simulação, com o objetivo de gerar os dados almeçados e realizar análises de sensibilidade;
 - Interpretação e Análise Estatística: delinear as conclusões sobre os resultados da simulação, assim como as estimativas para as medidas de desempenho.
- d. Etapa de Tomada de Decisão e Conclusão
- Comparação e Identificação de Soluções: identificação de diferenças e comparação dos sistemas e suas propostas, buscando escolher a melhor alternativa;
 - Documentação: serve para ser um guia para interessados e para a necessidade de alterações futuras no modelo;
 - Apresentação de Resultados e Implementação: espelha o empenho do grupo e do indivíduo, sendo realizada por toda a equipe, com comunicação compreensível e total.

Figura 24 – Passos para a Modelagem e Simulação



Fonte: Freitas Filho (2001)

2.3.4 Tipos de Simulação

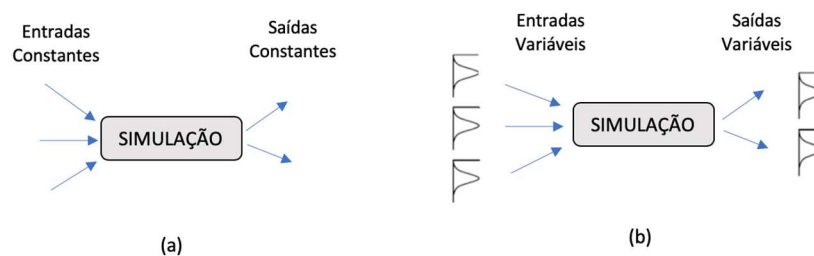
2.3.4.1 Estáticos ou Dinâmicos

Para Harrell *et al.* (2000), o modelo de simulação estático é aquele que não tem variação ao longo do tempo, representando o sistema em um momento determinado. Tem-se como exemplo o cálculo integral pelo método Monte Carlo. Já o dinâmico, retrata as mudanças do sistema do decorrer do tempo como, por exemplo, a simulação de uma linha de montagem de veículos (BRESSAN, 2002).

2.3.4.2 Determinísticos ou Estocásticos

Em modelos determinísticos, os dados de entrada são conhecidos, sendo constantes, gerando únicas saídas. Nos estocásticos, os dados de entrada são representados por distribuições de probabilidade, tendo pelo menos uma entrada retratada por variáveis aleatórias, produzindo também saídas variáveis (PRADO, 2004). A representação desses modelos pode ser vista na Figura 25.

Figura 25 - Simulação determinística (a) x estocástica (b)

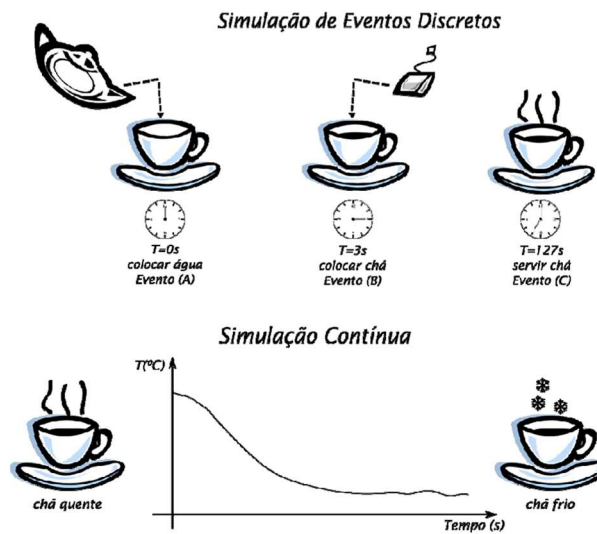


Fonte: Adaptado de Harrel *et al.* (2000)

2.3.4.3 Contínuos ou Discretos

Em modelos de simulação discretos, as variáveis mudam de estados em pontos não contínuos no tempo, devido a ocorrência de eventos. Uma unidade de manufatura é um exemplo desse modelo. Já um modelo contínuo, o estado das variáveis muda continuamente ao longo do tempo (HARREL, GHOSH e BOWDEN, 2004). A diferença da simulação discreta e contínua pode ser visto na Figura 26, com a ilustração de uma xícara de chá.

Figura 26 – Simulação Discreta x Contínua



Fonte: Chwif e Medina (2007)

2.3.4.4 Terminal e Não Terminal

Para Chung (2004), o parâmetro de classificação de um sistema terminante ou não terminante está na existência de eventos de início e término naturais.

Segundo Freitas Filho (2008), a simulação terminal é realizada em certo intervalo de tempo como, por exemplo, em sistemas onde existem momentos de fila e de caixas vazios: em restaurantes, bancos e supermercados, onde o interesse é o comportamento do sistema ao longo de determinado intervalo, não tendo interesse no estudo através de médias.

Em contraste, na simulação não terminal a análise é feita a partir de uma estabilização do comportamento do sistema. Uma célula de manufatura é um exemplo disso, onde existe a necessidade de aguardar pela estabilização das variáveis para fazer a coleta de dados, chamada de período de aquecimento (“*Warm Up*”) (PRADO, 2004).

2.3.5 Software ARENA

O software Arena pode ser muito utilizado para a modelagem e simulação discreta de sistemas. A área de trabalho do software localiza-se na tela inicial. É nesse local onde poderão ser adicionados os módulos e suas conexões, indispensáveis para a elaboração do modelo. Tem-se, também, as barras de ferramentas e a área de anexo dos *Templates*, que permitem ao usuário representar o comportamento do sistema (FREITAS FILHO, 2008).

De acordo com Prado (2010), o Arena dispõe de um conjunto de blocos ou módulos

que servem para retratar o sistema real. Eles operam como comandos de uma linguagem de programação e possuem uma Interface Gráfica para o Usuário, facilitando a criação de modelos.

É um ambiente gráfico integrado, possuindo todos os recursos para análise estatística, modelagem de processos, animação e análise de resultados. Além disso, possui duas ferramentas importantes, o *Input Analyzer* (analisa dados de entrada) e o *Output Analyzer* (analisa os resultados) (PARAGON, 2020).

2.3.5.1 *Input Analyzer*

Faz o estudo estatístico dos dados de entrada do sistema, determinando a distribuição mais aplicável a esses dados (PRADO, 2004). Assim, essa ferramenta exibe qual curva de probabilidade caracteriza melhor a distribuição e quais são os seus parâmetros. A Figura 27 mostra um exemplo de um ajuste feito no *Input Analyzer*.

Figura 27 – Exemplo de resultado do *Input Analyzer*

Distribution Summary	
Distribution:	Lognormal
Expression:	14 + LOGN(6.01, 2.29)
Square Error:	0.001818
Chi Square Test	
Number of intervals	= 30
Degrees of freedom	= 27
Test Statistic	= 322
Corresponding p-value	< 0.005
Kolmogorov-Smirnov Test	
Test Statistic	= 0.0478
Corresponding p-value	< 0.01

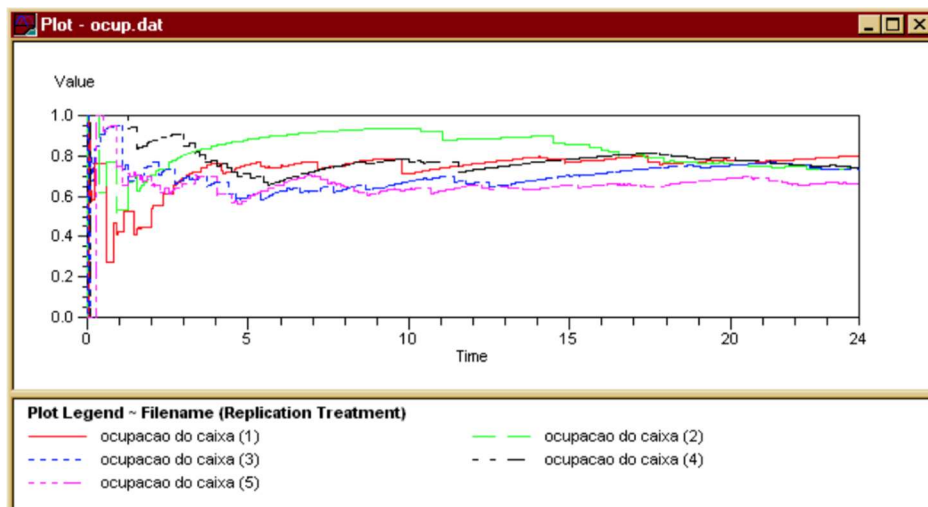
Fonte: Rabelo (2020)

Na figura, é possível perceber que o *Input Analyzer* indica qual é a melhor distribuição, assim como seus testes de aderência, chamados de *Square Error* (Erro Quadrado), *Chi Square Test* (Qui-Quadrado), *p-value* (valor de p) e *Kolmogorov-Smirnov Test* (KS).

2.3.5.2 *Output Analyzer*

Realiza o estudo estatístico dos resultados da simulação (PRADO, 2004). Um exemplo pode ser visto na Figura 28, que mostra um gráfico com valores de determinada taxa de ocupação no decorrer do tempo.

Figura 28 - Exemplo do *Output Analyzer*



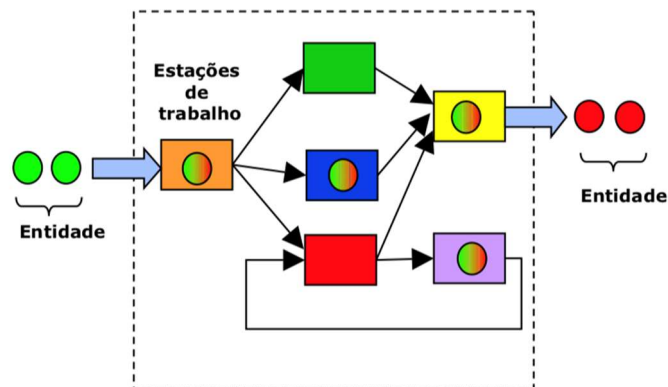
Fonte: Chwif e Medina (2010)

2.3.5.3 Elementos da Modelagem em Arena

Segundo Bressan (2002), pode-se resumir os elementos da modelagem do Arena da seguinte forma, visualizada na Figura 29.

- Entidades: objetos que se movem dentro do sistema, interagindo entre si, como pessoas, tarefas ou transações;
- Estações de Trabalho: local de realização de algum serviço;
- Fluxo: percursos que a entidade irá fazer ao longo de estações.

Figura 29 – Elementos da Modelagem no Arena



Fonte: Bressan (2002)

2.4 Trabalhos Publicados de Referência

1) Conservação de Água em Máquina de Fabricação de Papel (NUNES, 2007)

As indústrias hidro intensivas, como as da área de papel e celulose, apesar de serem grandes consumidoras de água, possuem um alto potencial para sua conservação e para redução de efluentes. Dessa forma, teve-se como objetivo a realização de um estudo da conservação de água em uma indústria de papel, com o intuito de desenvolver uma metodologia, aplicada na Suzano Bahia Sul, para a diminuição do uso de água na máquina de produção de papel. A metodologia utilizada foi composta por três fases: definição do processo, diagnóstico hídrico e determinação do potencial de conservação de água. O consumo de água industrial antes da reutilização era de $388 \text{ m}^3/\text{h}$ e, após, foi para $130,53 \text{ m}^3/\text{h}$; a geração de efluente industrial foi de $475,97 \text{ m}^3/\text{h}$ antes e, depois, foi para $218,5 \text{ m}^3/\text{h}$. Dessa forma, como principais resultados, teve-se a redução de 66% do consumo de água fresca e de 54% do efluente total gerado.

2) Análise do Circuito de Água em Processo de Fabricação de Papel Imprensa Integrada com Produção de Pastas Termomecânicas (HAMAGUCHI, 2007).

Pelo fato de a indústria de papel e celulose dispor de um consumo específico de água relativamente alto, faz-se importante a busca de novas tecnologias e de métodos que possibilitem redução na captação de água nessas indústrias. Então, o objetivo do estudo foi estudar o circuito de água do processo produtivo de TMP (*Thermo Mechanical Pulping*) integrada a máquina de papel imprensa. Com os resultados da simulação, ferramentas de melhoria poderão ser implantadas para encontrar alternativa afim de reduzir o consumo de água fresca e a geração de efluente. Teve-se como metodologia a descrição do processo industrial e sua simulação com o CadSim e, com isso, a análise do circuito da água e a análise das alternativas para esse circuito, utilizando o método Pinch e a Programação Linear. Através dos resultados, demonstrou-se que há possibilidade de reduções de 38%, considerando os valores da melhoria pelo método Pinch apenas para a máquina de papel. Para o mesmo caso, usando programação linear, a redução foi de 40%. Levando em consideração o processo integrado da máquina de papel com a produção de TMP, ou seja, um caso mais pertinente para a planta industrial, a redução pelo método Pinch e pela Programação Linear atingiu 23%.

- 3) Redução do Material Orgânico do Lodo Final na Fabricação de Papel Tissue através de Otimização do Processo (ALEXANDRE, 2012).

A produção de papel gera lodo com alta concentração de orgânicos, gerando grande quantidade de resíduos. O objetivo do estudo foi diminuir o rejeito sólido orgânico de uma máquina que produz papel *tissue*, reduzindo o impacto ambiental direto e em potencial. A metodologia baseou-se na coleta de amostras em várias correntes da fábrica em estudo para analisar o impacto destas correntes na constituição de lodo no efluente e proporcionar a melhoria do processo com utilização de elementos químicos e modificações de variáveis com o objetivo de reduzir a quantidade de lodo, especialmente em relação ao teor de orgânicos. Como principais resultados, o balanço de massa mostrou que a perda de fibras no lodo é de aproximadamente 3,7 toneladas/dia, levando em consideração todos os tipos de papéis (branco, semi-branco e natural) produzidos pela empresa. Demonstrou-se ainda que alterações no processo produtivo são necessárias, visando a diminuição e uma melhor destinação para o lodo. Há possibilidades de redução de fibras que vão para lagoas, o que varia de 1 a 10 toneladas/dia, diminuindo a carga de DBO no efluente e aumentando a produção. Pode-se modificar os processos nas cargas, minimizando a perda de fibras nobres. A aplicação de polímeros na máquina de papel diminui a perda de matéria orgânica e o uso de uma tela mais fechada aumenta a retenção.

- 4) A importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental dos resíduos sólidos urbanos: breves reflexões na cidade de Campina Grande/PB (PEREIRA, 2013).

Com o crescimento da população e consequente aumento da geração de alimentos e bens de consumo, o ser humano gera, cada vez mais, maiores quantidades de resíduos, tanto nos processos industriais quanto no consumo. A reciclagem reduz o uso de recursos naturais e gasta menos energia para retornar os materiais para o consumidor. Assim, o trabalho objetiva salienta a função do catador na administração de resíduos sólidos e, também, refletir a realidade desses catadores na cidade de Campina Grande/PB. Teve-se como método, primeiramente, um levantamento bibliográfico a respeito do tema em estudo e, depois, foi realizada observações *in loco* da situação do lixão de Campina Grande e das condições de vida dos catadores, com o intuito de relacionar a má disposição de resíduos com a atividade dos catadores. Teve-se como resultado que a função dos catadores surge como consequência da economia existente, marcada

pelo alto consumo e exclusão social. Além disso, é uma fonte de renda e subsistência para milhares de famílias. Os programas de gestão compartilhada trazem vários benefícios, como a valorização do catador, sua inclusão social e maior quantidade e qualidade do material reciclado. Apesar de serem de extrema importância, muitos catadores ainda são marginalizados e, no caso da cidade de Campina Grande, muitos trabalhadores ficaram desprovidos de sua fonte de renda devido a falta de auxílio do poder público.

5) Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento (GAVIRA, 2003).

Para superar as dificuldades da forte competitividade entre as empresas, elas precisam de profissionais capacitados capazes de entender a atividade dos sistemas nos quais as organizações fazem parte. É um desafio saber se a simulação é um método eficiente, se é adequada para as conexões entre os elementos do sistema e se é capaz de analisar cenários e políticas operacionais diferentes. Teve-se como objetivo aplicar a simulação com base no método de Dinâmica de Sistemas, como meio de aquisição de conhecimento, através do dimensionamento de fila em uma fábrica de componentes plásticos. A metodologia baseou-se na revisão bibliográfica no que se refere aos principais conceitos estudados e no desenvolvimento de uma metodologia de simulação com detalhes dos passos realizados no estudo. Teve-se como resultados que o critério para aceitar novas encomendas, com base no tamanho das filas, teve como consequência que a quantidade de elementos aguardando em alguma das três filas nunca alcancem valores muito altos. Isto apontou que o método usado e foi eficiente no intuito de manter as filas sob controle. Os atos que irão gerar a ampliação da capacidade do sistema deverão ser aplicados aos pontos de restrição e o modelo deve ser repetido até alcançar a capacidade e tempo de processo esperados, ou até alcançar os limites de meios financeiros e espaciais. Em relação ao tempo médio de processamento, confirmou-se que será menor na proporção que for o melhor equilíbrio entre as variadas fases do processo.

CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA DE PESQUISA

3.1 DESCRIÇÃO DA EMPRESA

A empresa em estudo atua na área de produção de papel reciclável, papelão ondulado e embalagens. É de grande porte e possui indústrias integradas, sendo elas de produção de papel e de produção de embalagem. Localizada no estado de Goiás, desenvolve e produz embalagens de papelão ondulado usando linhas de papéis *Kraft Liner*, *White Top Liner*, *Test Liner* e Miolo. A empresa pode ser vista na Figura 30.

Figura 30 - Empresa em Estudo



Fonte: Empresa em estudo (2020)

Formou-se em 2006, possuindo mais de 550 colaboradores diretos e, aproximadamente, 1.000 indiretos. Dispõe de cerca de 300 clientes, em várias regiões do Brasil.

Na área industrial, a empresa produz papéis de diferentes gramaturas e chapas de papel ondulado, podendo ser de ondas simples e duplas. Seus produtos são utilizados em diferentes áreas da economia, acatando aos regulamentos nacionais e internacionais.

Em sua estrutura, existem duas fábricas integradas, uma de papel e outra de embalagens. A primeira fábrica produz bobinas de papéis com especificações e linhas específicas para cada cliente; a outra produz chapas de papelão ondulado e embalagens (corte, vinco e impressão), tendo como matéria prima o papel produzido na própria fábrica.

Focada na sustentabilidade, seu ciclo de produção dispõe da certificação de Cadeia de Custódia e o selo *Forest Stewardship Council* (FSC). Isso garante que o produto foi feito com matéria-prima de florestas com certificação ou de origem controlada de acordo com as regulamentações do FSC. Além disso, possui outras certificações, como a ISO 9001: 2015 e RoHS (restrição de certas substâncias perigosas), podendo ser vistas na Figura 31.

Figura 31 – Certificações de qualidade e sustentabilidade



Fonte: Autor (2020)

3.2 ETAPAS DO MÉTODO

3.2.1 Diagnóstico do Sistema

O diagnóstico do sistema foi realizado por meio de um estudo prévio da empresa, através de estudos do local, da análise dos processos e da coleta de informações. Foi feita a formulação e a análise do problema, definindo-se a melhor estratégia para o modelo a ser formulado. Para isso, utilizou-se a planta de situação da empresa, a planta baixa da fábrica de papel e a planta do sistema.

Assim, foi possível a delimitação dos fluxogramas de interesse ao estudo, os possíveis cenários a serem simulados e os dados a serem coletados. O fluxograma é necessário para detalhar o processo e descrever suas interações lógicas, assim como para a construção do diagrama de blocos de simulação.

O sistema baseia-se nas etapas de produção de papel, desde a chegada de matéria-prima até a formação de papel. O objetivo foi simular o processo produtivo do tipo do papel de forma geral, com foco na reciclagem (utilização de aparas) e no consumo de água. Com essas informações, foi possível modelar o sistema para linguagem do *software* Arena, criar o cenário atual na animação e propor melhorias.

3.2.2 Coleta e Análise de Dados

Para realizar o levantamento do sistema da produção de papel, definiu-se as variáveis a serem coletadas, que são:

- Intervalo entre chegadas das entidades;
- Tempos de deslocamento;
- Tempo de processamento de uma bobina;
- Porcentagens de decisão.

Essa coleta foi realizada através da análise de planilhas de produção da fábrica de papel, observações *in loco* e troca de informações com o gerente da fábrica. Os dados foram passados para uma planilha no Excel. Inicialmente, foram coletados 50 valores, sendo avaliados através da Equação 1 (FREITAS FILHO, 2008).

$$N = \frac{(Z^2 \sigma^2)}{\epsilon^2} \quad (1)$$

Sendo:

N = tamanho da amostra;

Z = abscissa da curva normal padrão, fixado um nível de confiança. Para um nível de 95%, Z= 1,96;

σ = desvio padrão amostral em torno da média;

ϵ = erro amostral tolerado arbitrado, associado à média (5%).

Se o valor de N for abaixo de 50, não será necessário coletar mais dados; caso contrário, volta-se a campo para a coleta.

Os dados coletados foram subjugados ao *Input Analyzer*, do *software* Arena, para identificar a distribuição teórica de probabilidades que melhor representa a amostra de dados, por meio de testes de aderência.

Esses testes são feitos através dos testes *Square Error* (Erro Quadrado), *p-value* (valor de p), Qui-quadrado e *Kolmogorov-Smirnov* (KS).

O *Square Error* mostra as diferenças entre os valores teóricos desejados e os da amostra. Em relação ao valor de p (*p-value*), se for “grande”, a possibilidade dos dados atuais serem adequados ao ajuste que se está realizando é alta. No entanto, se for “pequeno”, é provável a possibilidade de se obter melhores resultados para o processo de aderência (FREITAS FILHO, 2008).

O teste do Qui-Quadrado é um teste que mostra matematicamente se a diferença entre os dados observados e esperados é considerável (VIALI, 2008). É usado para distribuições contínuas e discretas e, se seu valor for igual a zero, as distribuições estão perfeitamente harmônicas. Quanto maior seu valor, maior a divergência entre as duas distribuições.

O teste KS é utilizado com a mesma intenção do Qui-Quadrado, entretanto, pode ser empregado para conjuntos de dados de qualquer tamanho e para distribuições contínuas.

3.2.3 Modelagem e Simulação

Para a modelagem e simulação, foi utilizado o *software* Arena, versão *Full* 16.00.00003, no laboratório da Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Primeiramente, foi feita a pré-modelagem, através do diagrama de blocos, tendo como base o fluxograma, demonstrando as entradas e saídas, as entidades, as estações de trabalho e as decisões do sistema. Dentro desse processo, estão inclusas todas as etapas da produção de papel, com foco, porém, nas etapas relacionadas à reciclagem e ao maior consumo de água.

Foi realizada a animação do modelo, através da colocação de símbolos e elaboração de desenhos, com o intuito de mostrar o processo de forma que haja fácil entendimento. Na animação, o *layout* foi criado, assim como a animação dos recursos, das estações e das entidades. Além disso, foi adicionado um relógio, a data, um indicador de entrada e saída das entidades, assim como indicadores com as informações mais importantes, sendo elas a quantidade de aparas que entra no sistema, de papel que sai, de resíduos gerados e de água consumida. A animação servirá como ferramenta para verificar se o modelo está correto.

Por se tratar de um grande processo produtivo, com inúmeros equipamentos, para que haja um fácil entendimento, as etapas da produção de papel foram representadas de forma geral, mostrando os principais processos e as entradas e saídas mais relevantes para o estudo.

Além da animação, para a validação do modelo, foi utilizada a comparação dos valores presentes nos contadores (*records*) inseridos no modelo, com os valores de produção da fábrica de papel.

Por se tratar de um sistema não terminal, pois, não se sabe, a princípio, quanto tempo a simulação deve durar, a simulação depende das seguintes etapas: determinar a medida de desempenho, determinar a confiança estatística e a precisão, identificar o *warm up* e determinar o tempo de simulação, construir a amostra piloto, determinar o número de replicações e o intervalo de confiança.

A medida de desempenho é o foco da questão que está sendo estudada, definida a partir dos objetivos da simulação e sendo, nesse estudo, a quantidade de resíduos plásticos gerada. Em relação à confiança estatística, é de 95% ($\alpha = 0,05$) e a precisão desejada (tamanho do intervalo) é 3% da média da amostra.

O período de *warm up* é o período em que o modelo roda, mas as estatísticas não são coletadas. Para determinar esse período, o modelo foi rodado por um longo período de tempo, atentando-se para a medida de desempenho. Com isso, conseguiu-se um gráfico de dispersão

para saber o comportamento dos dados. Por fim, esse tempo foi definido visualmente, quando o modelo simulado atinge o estado de regime permanente, ou seja, o momento em que o parâmetro não mais sofre interferência das circunstâncias iniciais do sistema. Como regra prática, o estudo desse tempo é feito a partir de um número mínimo de replicações, geralmente com a identificação do momento em que se entra em regime permanente, pode-se saber o tempo de simulação.

Para a amostra piloto, são necessárias 20 replicações, como sugere Chwif e Medina (2007) para sistemas não terminais e, com isso, obtêm-se a média e o desvio padrão para a medida de desempenho escolhida. Com isso, consegue-se o percentil *t Student* e o tamanho da metade do intervalo “h”, através da Equação 2 (CHWIF e MEDINA, 2007).

$$h = t_{n-1;\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Sendo:

h = metade do tamanho da amostra ou precisão;

$t_{n-1;\alpha/2}$ = percentil da distribuição t student com n-1 graus de liberdade;

s = desvio padrão da amostra;

n = número de dados da amostra.

Em relação ao número de replicações, se a precisão calculada for maior que a desejada ($h > h^*$), é necessário calcular um novo número de replicações. Para o cálculo, retira-se o *warm up* (período de aquecimento) e aplica-se a Equação 3 (CHWIF e MEDINA, 2007).

$$n^* = n \cdot \left(\frac{h}{h^*}\right)^2 \quad (3)$$

Sendo:

n^* = estimativa do número de replicações

n = número de replicações já realizado

h = precisão (metade do tamanho do intervalo) encontrada

h^* = precisão (metade do tamanho do intervalo) desejada

Por fim, o intervalo de confiança pode ser determinado de acordo com a Equação 4 (CHWIF e MEDINA, 2007).

$$\bar{x} - h \leq \mu \leq \bar{x} + h \quad (4)$$

Sendo:

\bar{x} = média da amostra

h = precisão calculada

μ = intervalo de confiança

Após efetuar o modelo, os resultados no relatório SIMAN foram analisados, onde os principais itens observados foram os *records* das entradas das entidades, da saída de papel, da geração de resíduos e do consumo de água. Com isso, esses valores foram comparados com os valores presentes nas planilhas de produção da fábrica, do mês de agosto, setembro e outubro de 2020.

3.2.4 Propostas de Melhorias

Após analisar o relatório do *software* Arena, foram propostas melhorias para a conjuntura atual de produção. Essas recomendações foram realizadas através de construção de novos cenários, comparando-os com o atual, com o intuito de analisar os resultados da nova proposta. O principal foco foi em trazer melhorias relacionadas à sustentabilidade.

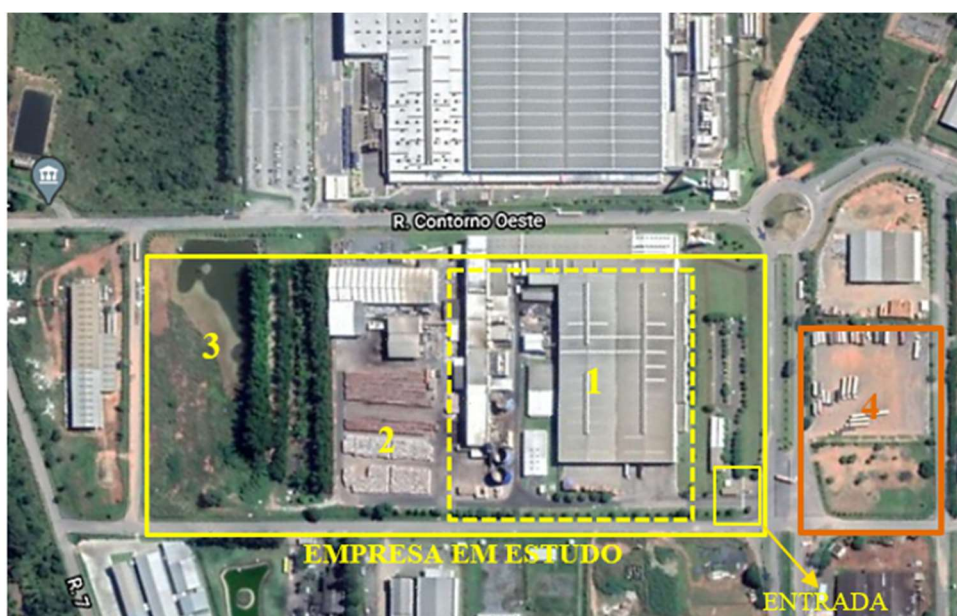
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Diagnóstico do sistema

A empresa em estudo possui duas fábricas integradas, sendo uma de papel e outra de embalagens, responsável pela produção de caixas de papelão ondulado. A matéria prima dessas embalagens é o papel, produzido na primeira fábrica, que é o local de interesse deste estudo.

A planta de situação e a planta baixa podem ser vistas nas Figuras 32 e 33, respectivamente.

Figura 32 - Planta de Situação

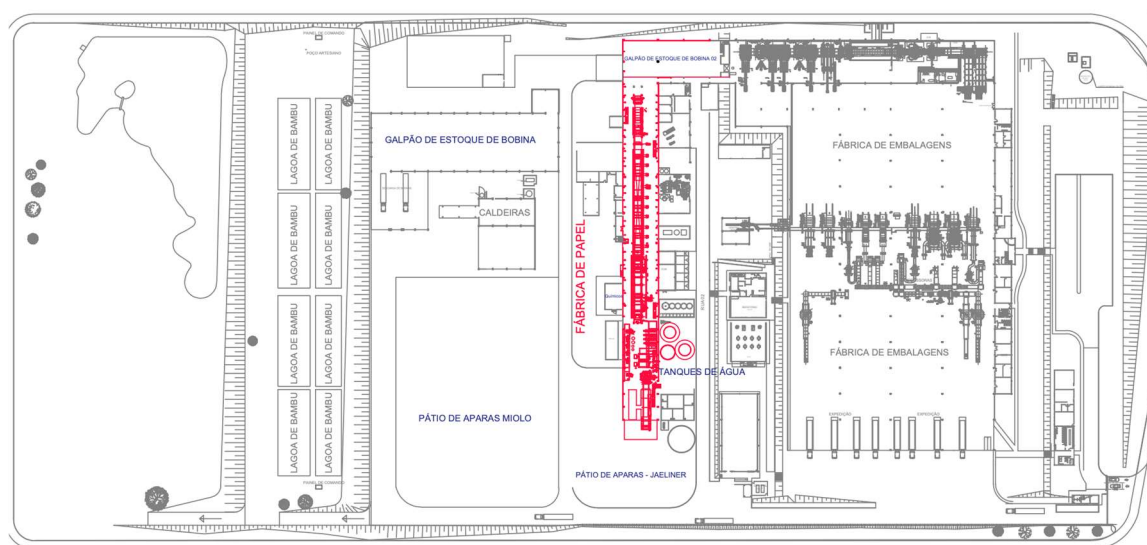


Fonte: Adaptado de Google Maps (2020)

Legenda:

- 1 – Fábrica de Papel e de Embalagens
- 2 – Pátio de Lenha e Aparas
- 3 – Lagoa
- 4 – Estacionamento de Caminhões (propriedade da empresa)

Figura 33 - Planta Baixa



Fonte: Fornecido pela empresa (2020)

*A área em destaque é o local de interesse do estudo.

A produção de papel inicia-se no setor de PCP (Planejamento e Controle de Produção). Cerca de noventa por cento (90%) da produção de papel é feita de acordo com a necessidade da fábrica de embalagens, baseada nos pedidos de cada cliente. Apenas cerca de dez por cento (10%) das bobinas de papel produzidas são vendidas diretamente para clientes, através de pedidos específicos.

Existe um estoque dessas bobinas, onde há um planejamento da necessidade de estoque de acordo com os pedidos e seus prazos de entrega.

Com a programação pronta, a produção pode ser iniciada. No pátio de aparas, a matéria prima do papel é separada de acordo com a qualidade necessária para o papel a ser produzido e, também, são realizados alguns testes, como o teste de umidade. Através de uma esteira, os fardos de aparas são deslocados para o *pulper*, onde será realizado a desagregação. Nesta primeira etapa, ocorre o desfibramento (devido a mistura de água com as aparas) e a remoção de rejeitos pesados.

Depois, a massa segue para a etapa de depuração, onde ela passa por vários equipamentos que irão realizar a retirada das impurezas cada vez mais difíceis de serem separadas. Os equipamentos tiram o máximo de impurezas possível, onde essas equivalem a uma média de 4% do volume total das aparas, sendo descartadas corretamente em um aterro.

Em seguida, tem-se a refinação, onde há a modificação das propriedades das fibras para garantir uma maior capacidade de união entre elas e, conseqüentemente, maior

homogeneidade na folha. A área do *approach flow* faz a conexão com a área de preparo de massa e a de formação da máquina de papel.

Por fim, a massa entra na etapa da máquina de papel. A caixa de entrada preenche a largura da máquina com uma fina camada de massa em suspensão. Ao entrar na mesa de formação da folha, a massa encontra-se com cerca de 99% de água e 1% de fibras.

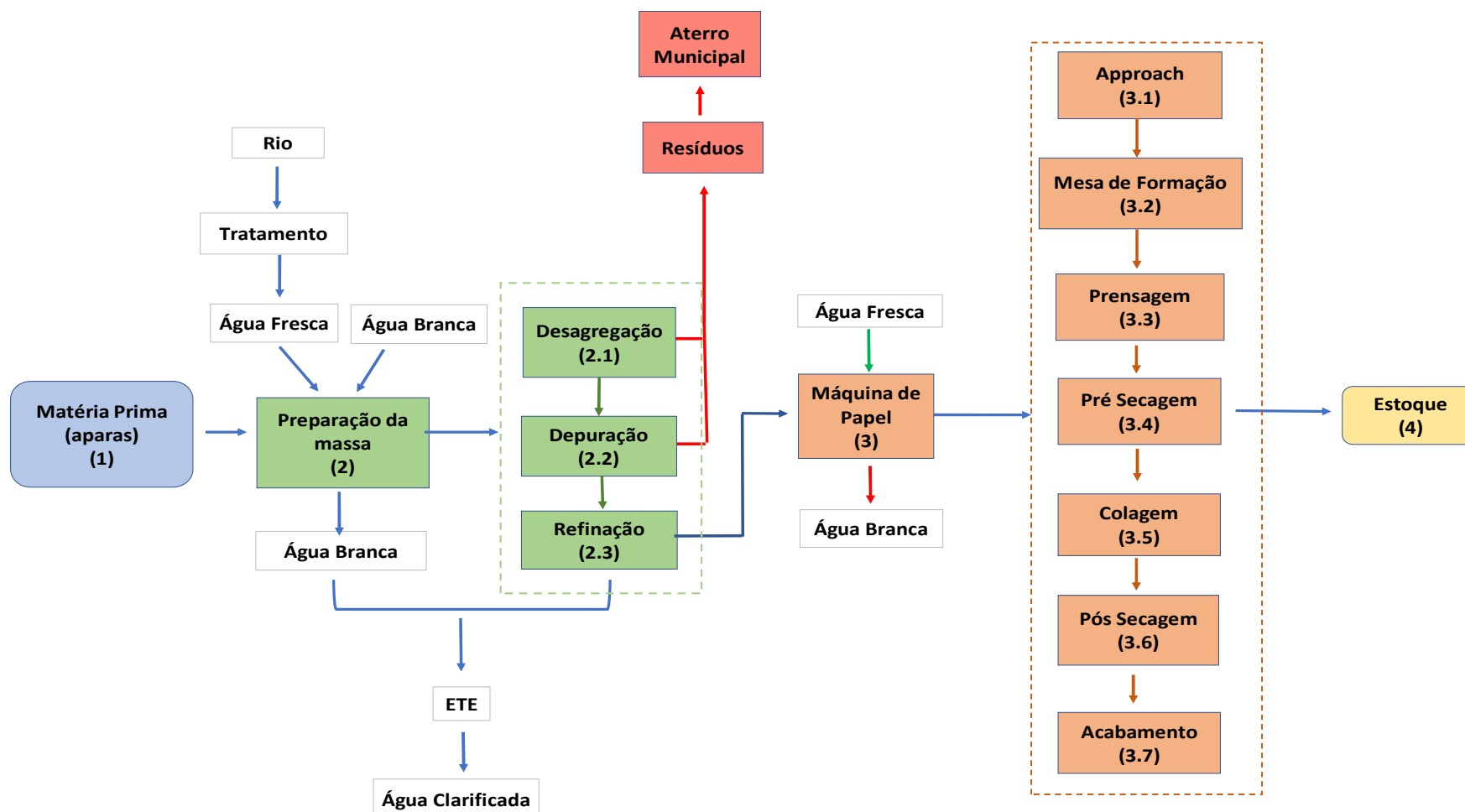
É nessa seção onde se concentram a maioria dos chamados chuveiros que, em uma máquina de papel, são responsáveis por lavarem as telas e feltros que guiam o papel ao longo de seu processo produtivo e pelo condicionamento destas vestimentas. Essa lavagem é importante para garantir a qualidade no momento de formação da folha de papel. Os chuveiros de condicionamento e lubrificação são responsáveis por melhorar o condicionamento de trabalho das vestimentas, aumentando a sua vida útil, reduzindo o atrito através da lubrificação das áreas de contato das telas com as cerâmicas dos revestimentos da máquina. A lubrificação é realizada com água devido o material de revestimento serem de cerâmica.

Seguindo para área da prensagem, há mais extração de água, aprimorando as propriedades da folha e proporcionando boa resistência à umidade. Na secagem a folha recebe vapor saturado através de cilindros secadores, retirando o restante da água, tendo a área de pré e pós secagem.

Em seguida, a folha segue para a colagem superficial, onde aplicam-se componentes químicos, como o amido, que garante uma impermeabilidade à água. Por fim, na enroladeira, a folha de papel é enrolada em tubos de ferro, formando as bobinas de papel, ou seja, é a área de acabamento do papel. Essas bobinas são direcionadas para o estoque, para serem utilizadas de acordo com a programação de produção da fábrica de embalagens.

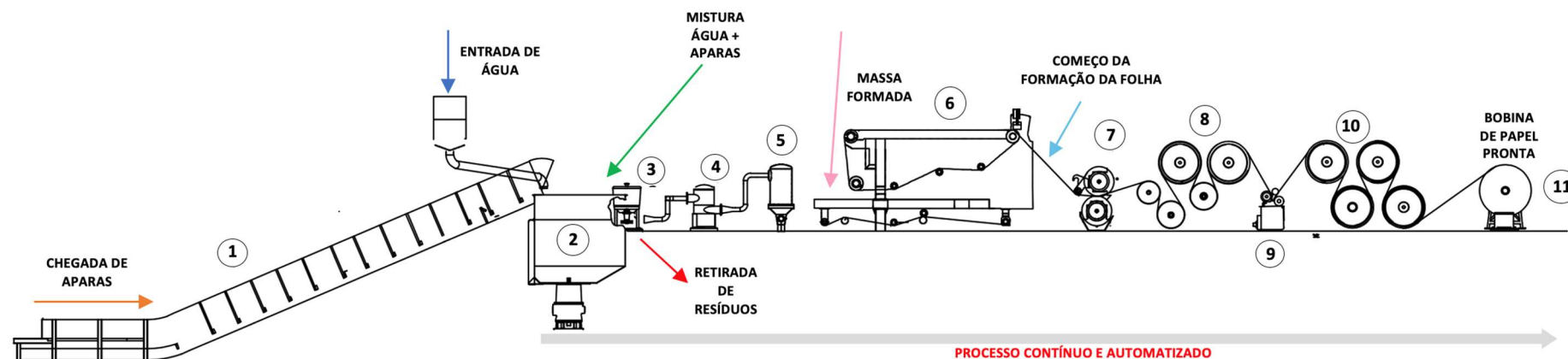
O fluxograma do processo produtivo com as principais entradas e saídas pode ser visto na Figura 34 e, com isso, fez-se o mapofluxograma do sistema (fora de escala), em formato de corte, que pode ser visto na Figura 35.

Figura 34 - Fluxograma do sistema



Fonte: Autor (2020)

Figura 35 - Mapofluxograma do processo



Fonte: Autor (2020)

*Legenda:

1 – Entrada de aparas pela esteira

2 – Desagregação

3 – Depuração

4 – Refinação

5 – Caixa de entrada

6 – Mesa de Formação

7 – Prensagem

8 – Pré Secagem

9 - Colagem

10 – Pós Secagem

11 - Enroladeira

4.2 Definição das variáveis

As variáveis deste estudo dividiram-se em:

- Intervalo entre chegadas das entidades (apara e água), com as quantidades de aparas e de água consumida;
- Porcentagens de decisão
 - Divisão das entidades por tipo;
 - Percentual de divisão do consumo de água entre chuveiros, secaria e processos restantes;
 - Percentual da quantidade de resíduos gerados, sendo divididos em plásticos e outros tipos de resíduos;
 - Percentual de geração de fibras;
- Tempo de deslocamento na esteira;
- Tempo de processamento de uma bobina.

Por se tratar de um processo contínuo, automatizado e sem pausas, sendo interligado por máquinas e tubulações, não é possível medir os tempos dos processos separadamente. Dessa forma, os tempos dos processos isolados foram feitos por meio de estimativas com base na entrada de matéria prima e na produção, em toneladas por hora.

Em relação as porcentagens de decisão, os resíduos equivalem a cerca de 4% do volume total consumido de aparas, onde aproximadamente 87,5% dos resíduos totais equivalem à plásticos e 12,5% a outros tipos de resíduos. Em relação à água, cerca de 20% do total que entra no sistema é consumido na seção de secaria, 25% nos chuveiros e 55% nos processos restantes, onde o foco será na quantidade de água fresca consumida pelos chuveiros na máquina de papel. Esses valores foram determinados através de planilhas de produção dos meses de agosto, setembro e outubro de 2020, que podem ser vistas no Apêndice C e, também, através de discussões com o gerente da fábrica de papel.

A geração de fibras é considerada para efeito de modelagem em relação a quantidade de papel produzido. Atualmente, existe a recuperação dessas fibras e sua reinserção no processo. Elas foram consideradas na modelagem pois atuam na porcentagem de papel produzido em relação ao consumo de aparas. Seu percentual é cerca de 2,8% do volume de

aparas.

É importante salientar que a unidade utilizada na entrada das entidades é de toneladas por hora, assim como essa unidade foi a base de todo o modelo. E, além disso, pelo tipo de processo, apenas um tempo de deslocamento é considerado entre uma estação e outra, que é o tempo da apara na esteira até chegar na etapa de desagregação.

4.3 Coleta de Dados

A coleta de dados consistiu-se em um conjunto de análises: dados pré existentes de produção dos meses de agosto, setembro e outubro de 2020, troca de informações com o gerente da fábrica, vídeos dos processos e observações *in loco* em relação ao funcionamento da fábrica de papel.

O processo é contínuo e automatizado, não possuindo nenhum intervalo de produção e funcionando durante 24h. Por isso, o modelo de simulação baseia-se nos dados diários e mensais de produção.

Foram coletados, inicialmente, 50 valores para cada variável e, como se trata de um processo automatizado com pouca intervenção humana, esses valores não apresentaram grande variação, podendo-se considerar valores médios como boas estimativas.

Esses valores foram contabilizados em uma planilha do Excel e submetidos a Equação 1. A Tabela 1 mostra os valores de média, desvio padrão, erro amostral e o tamanho da amostra para o intervalo entre chegadas de aparas e de água, para o tempo de processamento de uma bobina e para o tempo de deslocamento na esteira. Foi considerado um erro de 5% e uma confiança de 95%, de acordo com Chwif e Medina (2010). O restante dos dados pode ser visto na Apêndice A.

Tabela 1 - Tamanho das Amostras

	Chegada de Aparas (toneladas/hora)	Chegada de água (toneladas/hora)	Processo bobina (minutos)	Deslocamento na Esteira (minutos)
Média	14,42	80,02	23,68	5,81
Desvio Padrão	0,86	0,77	2,00	1,49
E (5%)	0,72	4,00	1,18	0,29
Z (95%)	1,96	1,96	1,96	1,96
Tamanho da amostra (N)	5	0	11	101

Fonte: Autor (2020)

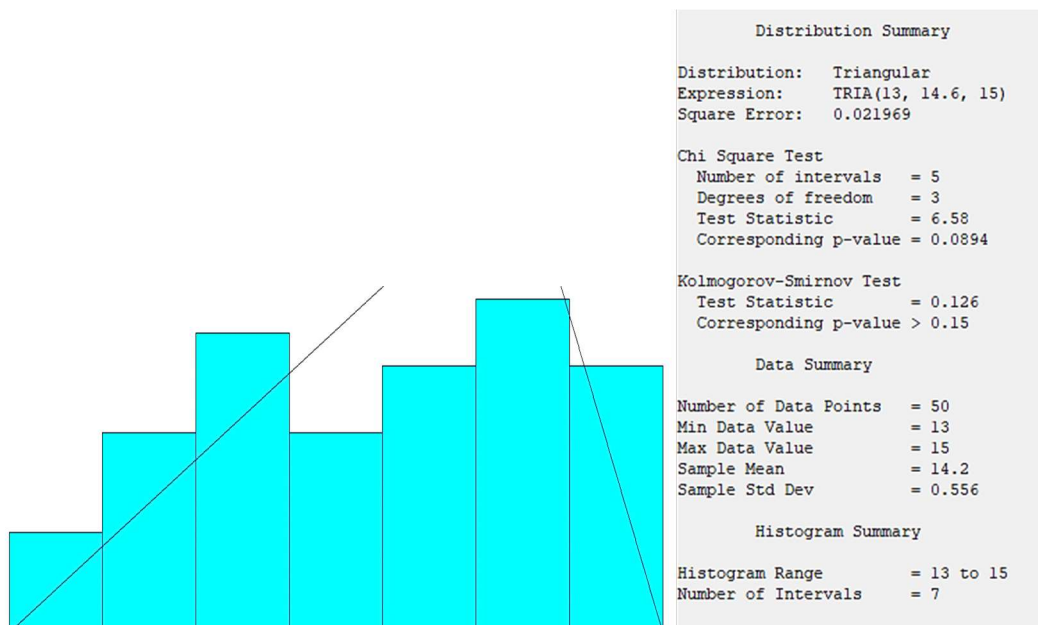
Apenas para a variável deslocamento na esteira será necessário coletar mais dados. Em relação ao restante, é possível perceber que, por ser um processo contínuo e automatizado, não

existe grande variação nos tempos dos processos, não sendo necessário realizar uma nova coleta de dados onde os tamanhos das amostras recomendadas foram menores que 50.

Dessa forma, os dados foram submetidos ao *Input Analyzer* do *Software Arena*, para identificar a distribuição teórica de probabilidades que melhor representa a amostra de dados, por meio de testes de aderência. Isso foi feito através dos testes *Square Error* (Erro Quadrado), *p-value* (valor de p), Qui-quadrado e *Kolmogorov-Smirnov* (KS).

Na Figura 36 pode ser visto o resultado do *Input Analyzer* para a quantidade de aparas que chega por hora (em toneladas); os demais dados podem ser encontrados no Apêndice B.

Figura 36 - Análise de dados pelo *Input Analyzer* para a variável chegada de aparas



Fonte: Autor (2020)

O *Square Error* deve ser um valor muito pequeno, por representar os desvios das distribuições em relação aos dados coletados, sendo que a literatura não recomenda valores exatos. O valor resultante no *Input Analyzer* é 0,021969, o que pode ser considerado um valor pequeno.

Para o Qui-Quadrado, o valor de teste estatístico é 6,58 com grau de liberdade 1 e o valor tabelado, considerando uma confiança estatística de 95%, é de 7,81. Como $6,58 < 7,81$, a distribuição TRIA (13, 14.6, 15) se aplica.

O valor de p deve ser maior que o nível de significância, que neste caso foi 0,05; como o valor de p desta amostra é 0,0894, a distribuição se aplica.

Em relação ao KS, seu valor também se aplica, pois segundo Cwif e Medina (2010),

se o valor for maior ou igual a 0,10, indica evidência fraca ou inexistente contra a hipótese de aderência.

Para as demais variáveis, utilizou-se o mesmo critério. A relação das distribuições e dos testes de aderência podem ser vistos na Tabela 2.

Tabela 2 – Relação das Distribuições

Variável	Amostra Recomendada	Amostra Utilizada	Square Error	KS	X^2		Valor de p	Distribuição
					Tabelado	Calculado		
Chegada de Aparas	5	50	0,021969	> 0,15	7,81	6,58	0,0894	TRIA(13, 14.6, 15)
Chegada de Água	*	50	0,015802	*	3,84	3,56	0,0626	TRIA (78.5, 81, 81.5)
Tempo de processo bobina	11	50	0,008676	> 0,15	5,99	2,21	0,352	20 + 8 * BETA (1.18, 1.55)
Deslocamento na esteira	101	101	0,004566	> 0,15	3,84	0,584	0,463	NORM (5.7, 1.67)

Fonte: Autor (2020)

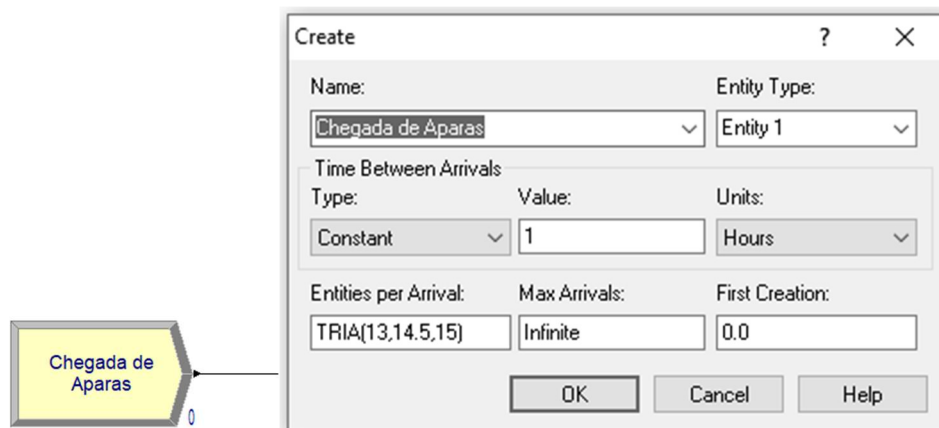
Dessa forma, para efeito de modelagem, utilizou-se valores médios para os principais processos no sistema. Como não é possível medir o tempo de cada processo de forma isolada, pois ocorrem de forma contínua, entre tubulações e máquinas, tomou-se como base taxa de chegada das aparas (toneladas/hora) e a taxa de saída de produção (toneladas/hora) para adequar a lógica do processamento de cada entidade.

4.4 Modelagem e Simulação

A modelagem do sistema foi feita através do *software* Arena. Os módulos de fluxograma usados foram os blocos *Create*, *Record*, *Process*, *Decide*, *Station*, *Leave* e *Dispose*.

A Figura 37 mostra o módulo *Create*, responsável pela entrada de entidades no sistema, onde existe a entrada de uma distribuição triangular de 13, 14.5 e 15 toneladas por hora.

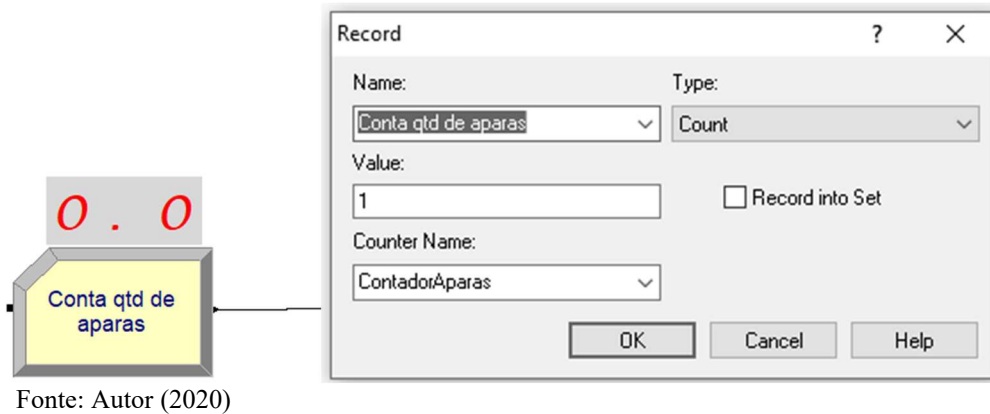
Figura 37 - Módulo *Create*



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 38, tem-se o *Record*, que tem a finalidade de conseguir informações estatísticas, servindo nesse caso como um contador, mostrando a quantidade de entidades que passam onde ele se localiza.

Figura 38 - Módulo Record



O módulo *Station* funciona em conjunto com o módulo *Leave*, utilizados para permitir o deslocamento das entidades entre um processo e outro. Também tem efeito na animação, sendo possível visualizar as entidades se movimentando entre os processos e, no módulo *Leave*, insere-se o tempo de deslocamento. Exemplos desses módulos podem ser vistos nas Figuras 39 e 40, respectivamente.

Figura 39 - Módulo Station

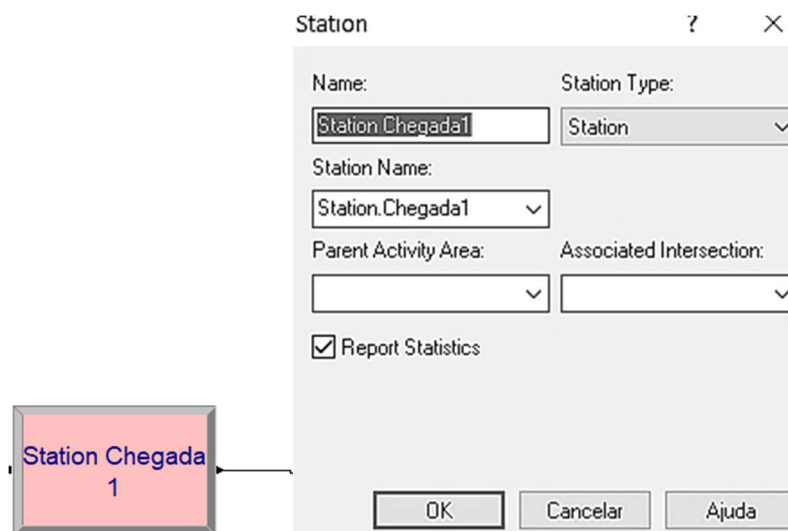
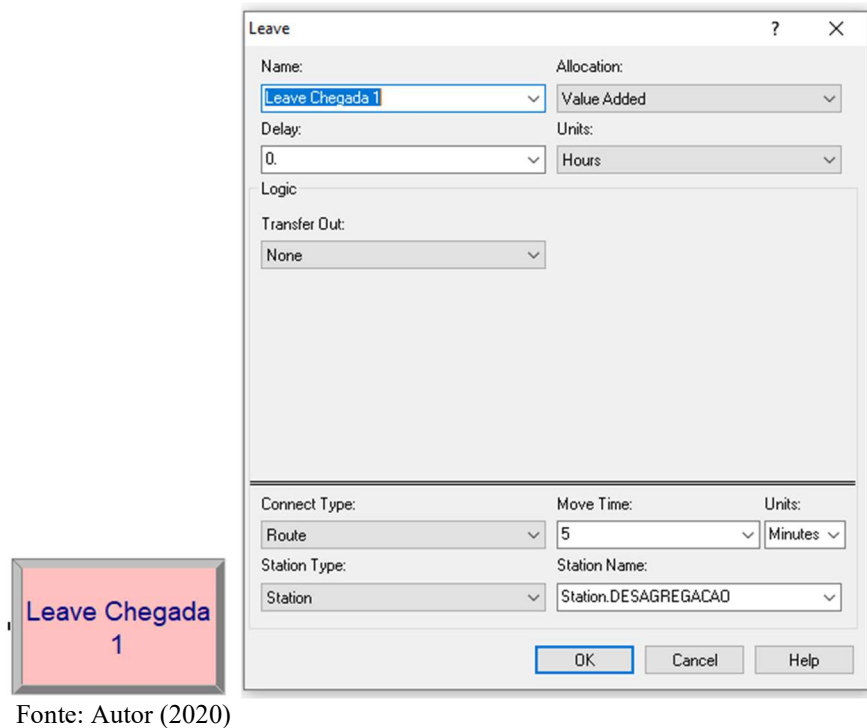


Figura 40 - Módulo *Leave*

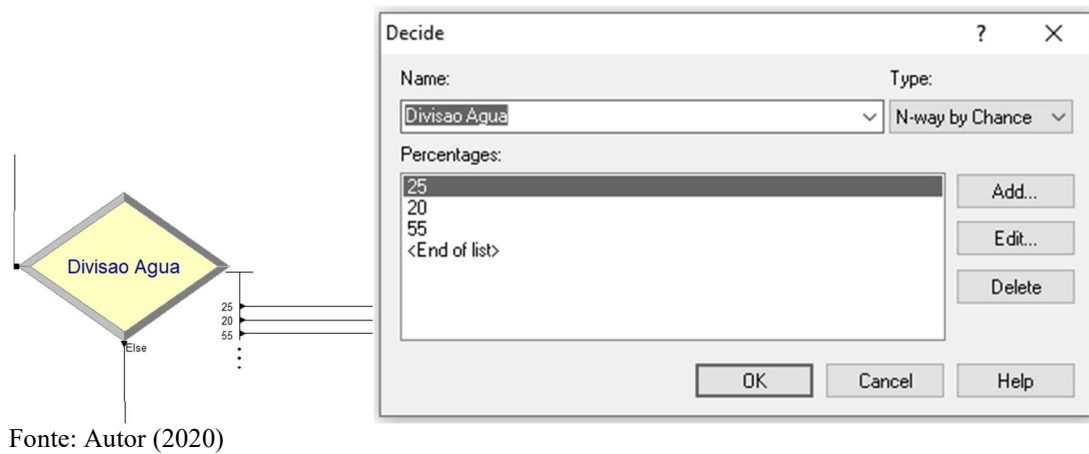


O módulo *decide* permite a tomada de decisões no sistema, podendo ser do tipo binária ou múltipla. Neste estudo, serão utilizados *Decides* para:

- 1) Divisão por tipo de entidade (água e apara);
- 2) Divisão do consumo de água (entre chuveiros, seção de secaria e restante dos processos)
- 3) Divisão dos resíduos e fibras geradas.

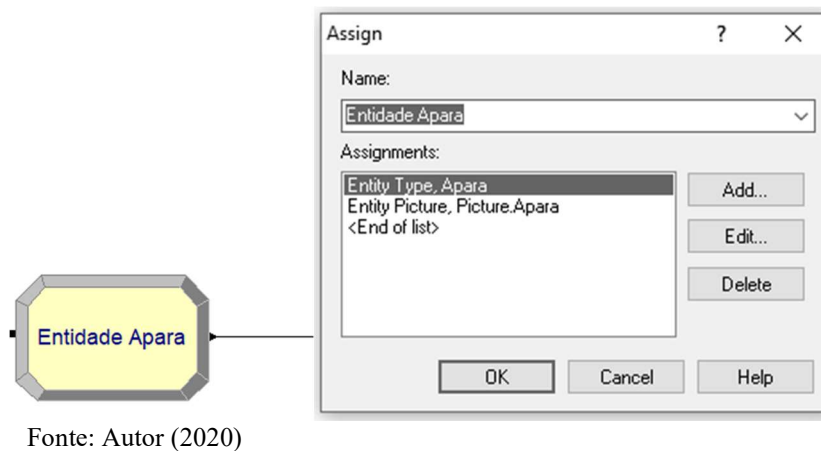
Um exemplo do decide responsável pela divisão do consumo de água pode ser visto na Figura 41.

Figura 41 - Módulo *Decide*



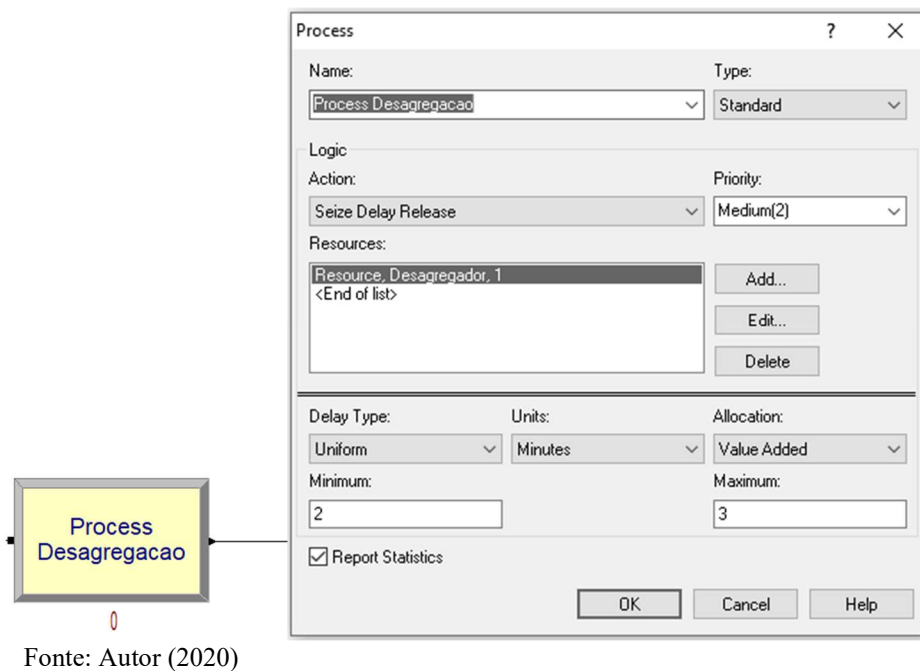
O módulo *Assign* tem a finalidade de alterar algum parâmetro ou variável do modelo. Nesse estudo, ele foi utilizado para alterar a imagem da entidade no decorrer do processo e determinar o tipo de entidade, podendo ser visto na Figura 42.

Figura 42 - Módulo *Assign*



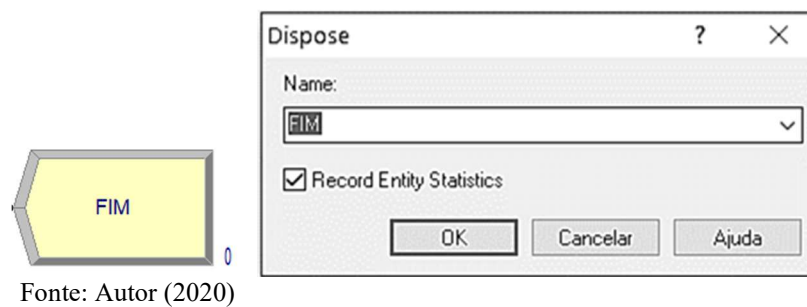
O módulo *Process* representa os processos pelos quais a entidade passa. Possui três ações: *Seize* (ocupa o recurso), *Delay* (processa a entidade) e *Release* (libera o recurso). O exemplo do processo Desagregação pode ser visto na Figura 43, onde possui como recurso o equipamento desagregador e tem como tempo de processo uma distribuição UNIF (2,3) minutos, feita para se adequar à simulação.

Figura 43 - Módulo *Process*



O módulo *Dispose* é responsável por finalizar a simulação, como pode ser visto na Figura 44.

Figura 44 - Módulo *Dispose*

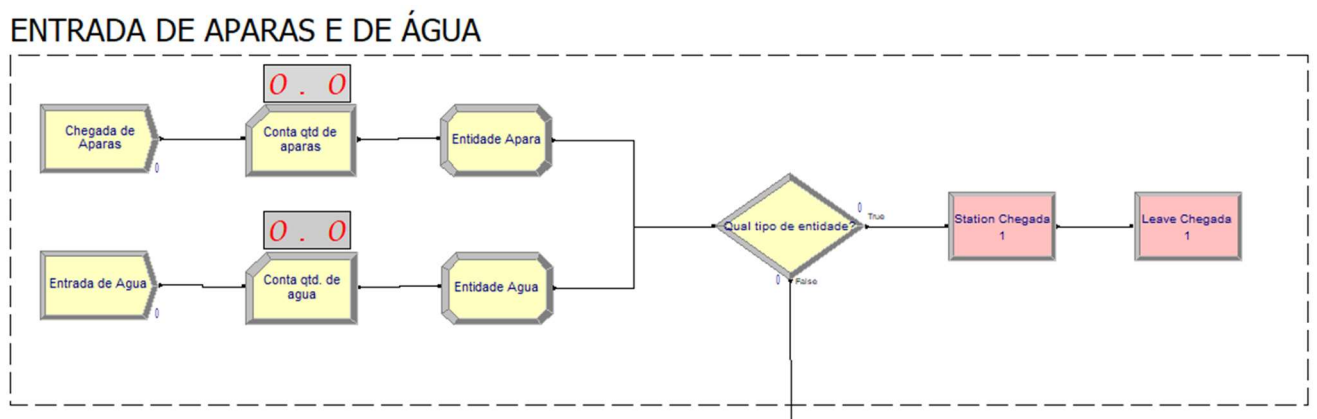


4.4.1 Chegada de Entidades

Neste estudo, trabalhou-se com duas entidades: apara e água. As aparas entram no sistema através do bloco *Create*. Por ser uma linha contínua e automatizada de produção, mede-se a entrada de aparas em toneladas/hora. Pela coleta de dados, tem-se uma chegada a um tempo constante, a cada uma hora, de uma distribuição TRIA (13,14.5,15) toneladas por chegada. Em relação a água, utiliza-se o mesmo princípio, a chegada ocorre a cada uma hora, com uma

distribuição triangular TRIA (79, 80,81) m^3 . Logo, para a entrada de aparas, tem-se uma média de 14 toneladas por hora e, para água, uma vazão média de 80 m^3 por hora. Depois de cada *Create*, há um *Record* para contar a quantidade de cada entidade que entra no sistema. O módulo *Assign* é para diferenciar cada entidade por tipo e por figura. Após a entrada de ambas as entidades, o bloco *decide 2-way by condition* “Qual tipo de entidade?” divide as entidades por tipo. As aparas vão para a *Station* “Chegada 1” e a água vai para o *decide* que irá fazer a divisão de suas respectivas porcentagens. Isso pode ser visto na Figura 45.

Figura 45 - Chegada de Aparas e de água

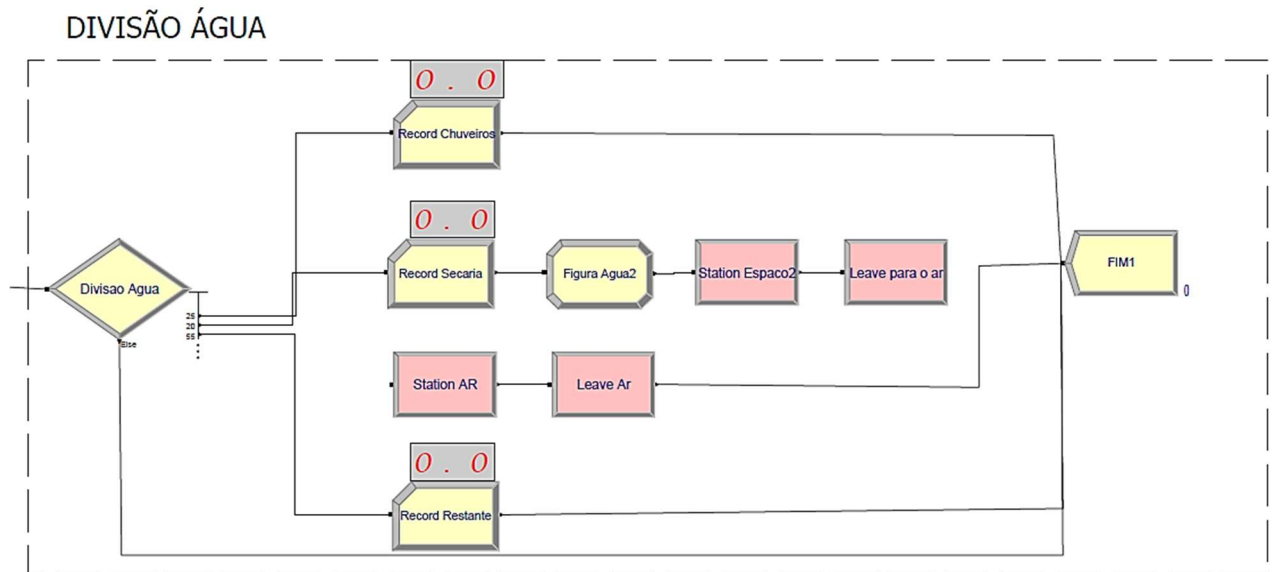


Fonte: Autor (2020)

4.4.2 Divisão da água

Considerando uma vazão média de 80 m^3 /hora, a divisão foi representada de forma que 20% (16 m^3 /hora) dessa água vai para área de secaria (pré secagem e pós secagem), 25% (20 m^3 /hora) para os chuveiros na máquina de papel e o restante distribuído entre os processos e as tubulações, através do módulo *decide 2-way by chance*. O foco do uso da água, neste estudo, será a água fresca consumida nos chuveiros. Essa divisão pode ser vista na Figura 46.

Figura 46 – Porcentagens de divisão do consumo de água



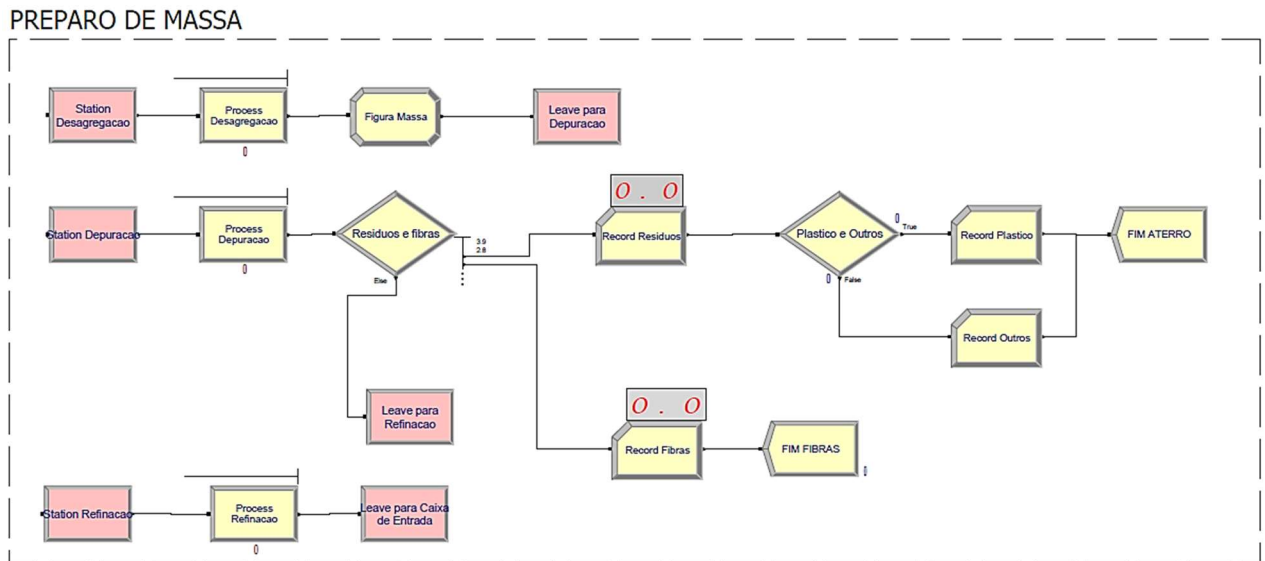
Fonte: Autor (2020)

4.4.3 Preparo da massa

O preparo da massa começa na estação “Desagregação”. De forma contínua, essa massa vai para a estação “Depuração”, onde a retirada de resíduos é finalizada. O *decide n-way by chance* “Resíduos e fibras” representa a porcentagem de resíduos em relação ao volume que entra no sistema, sendo 3,9%, e a porcentagem de fibras, sendo 2,8%, utilizada por motivos de modelagem para se aproximar do sistema real, no que se diz respeito a produção de papel em relação ao consumo de aparas. Ou seja, ao final da depuração, uma média de 4% do volume total das aparas equivalem aos resíduos, sendo divididos entre “plásticos” e “outros”. Dentro do valor total dos resíduos, “plásticos” correspondem, em média, a 87,5% e “outros” a 12,5%, representado pelo *decide 2-way by chance* “Plásticos e Outros”.

A massa caminha para o processo de refinação, que finalizará a etapa do preparo de massa. Vale lembrar que, na prática, esses processos possuem inúmeros equipamentos, sendo impossível representar todos no modelo de animação. Dessa forma, cada processo foi representado por um equipamento, podendo ter mais de um recurso. Esses processos podem ser vistos na Figura 47.

Figura 47 - Preparo de Massa

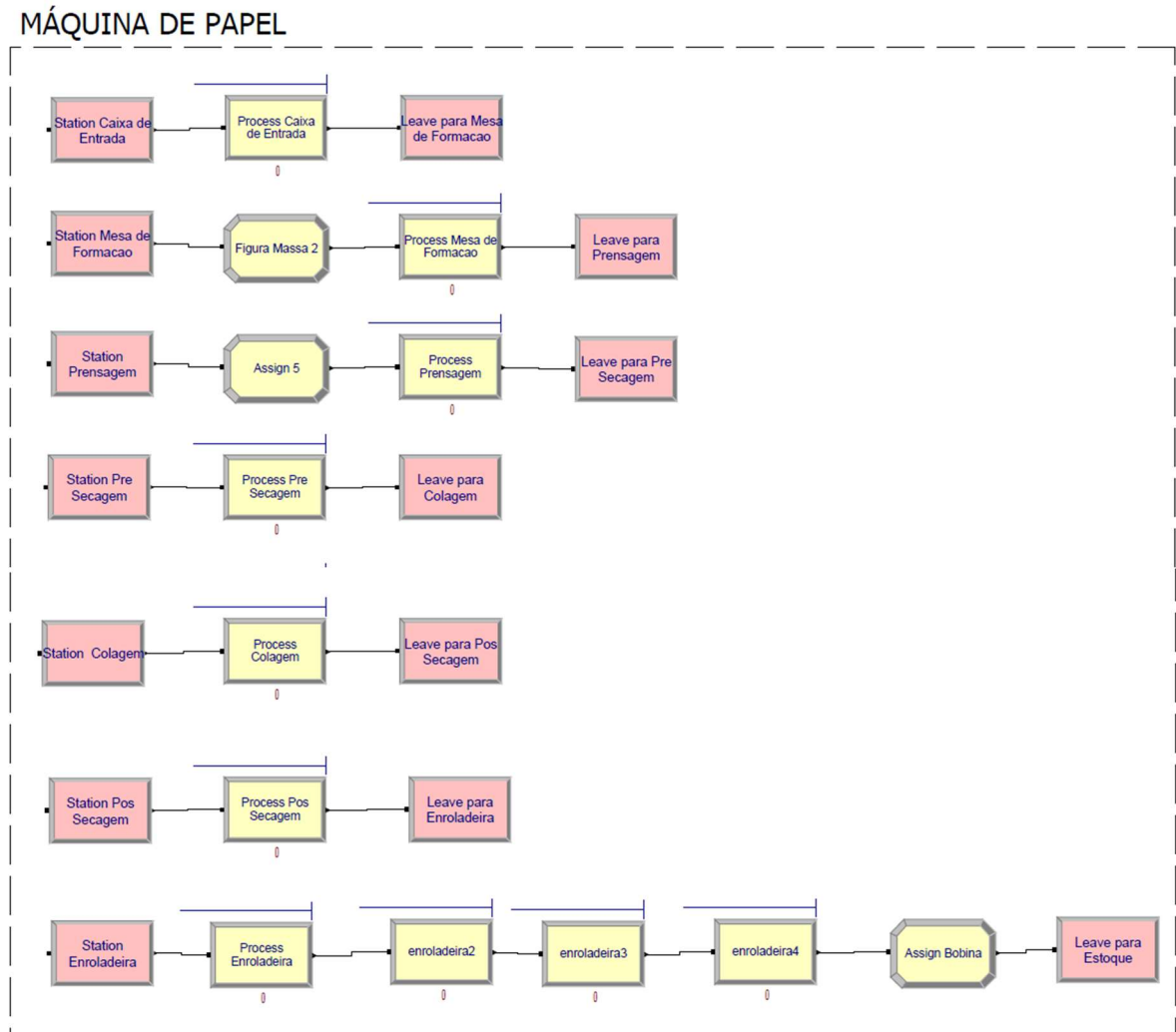


Fonte: Autor (2020)

4.4.4 Máquina de Papel

Depois da massa formada e limpa de resíduos, ela adentra na máquina de papel. Cada processo nessa etapa foi representado por um módulo *Process*, com seus respectivos recursos. Vale ressaltar que a divisão dos tempos foi realizada para se adequar à lógica da modelagem. Por exemplo, o *software* entende que a entrada de aparas ocorre como sendo uma média de 14 unidades por hora e não de toneladas por hora. Dessa forma, em sua lógica, processa-se cada entidade separadamente e não em um volume de 14 toneladas. No sistema real, conta-se o processamento como um todo, ou seja, uma entidade equivale à uma média de 14 toneladas. Por isso, os tempos de processamento foram baixos, pois considerando que uma entrada média de 14 toneladas de aparas por hora, há uma saída média de 13 toneladas de papel por hora. Na estação “Enroladeira”, a bobina jumbo começa a se formar, gerando bobinas menores que pesam uma média de 2500 kg. No *process* “Enroladeira”, foi inserido um *Schedule*, para demonstrar momentos em que a máquina fica parada devido à quebra de papel, o que ocorre de 3 em 3 horas. Os processos “enroladeira 1”, “enroladeira 2” e “enroladeira 3” foram inseridos por motivos de animação, para representar o ato de enrolar a bobina. Os *Assigns* utilizados nessa etapa foram responsáveis por alterar as imagens das entidades na animação. A modelagem da máquina de papel pode ser vista na Figura 48.

Figura 48 - Máquina de Papel

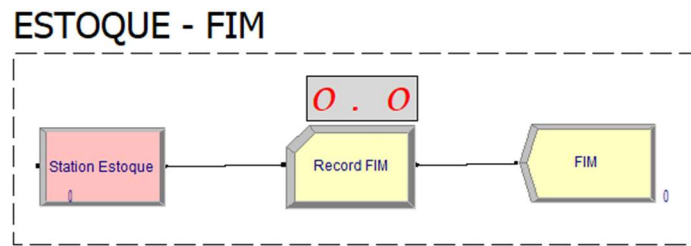


Fonte: Autor (2020)

4.4.5 Saída de papel

Depois da última etapa, que é o acabamento da folha de papel, por meio da enroladeira, as bobinas se dirigem ao estoque. O *record* “FIM” será responsável por contar a quantidade, em toneladas, geradas no fim de cada replicação. O processo é finalizado com o módulo *dispose* “FIM”, o que pode ser visto na Figura 49.

Figura 49 – Fim do Processo

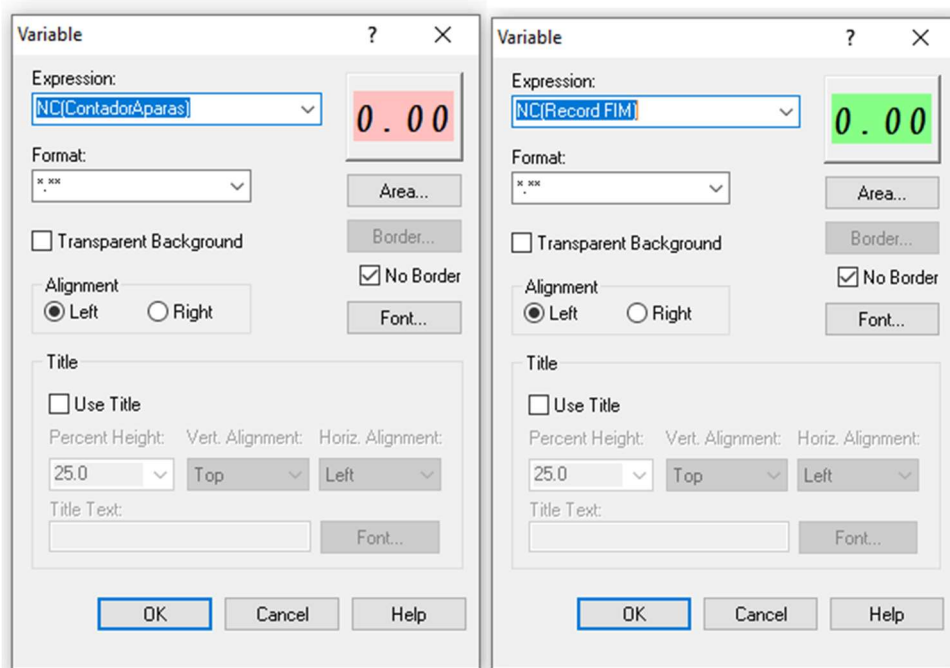


Fonte: Autor (2020)

4.4.6 Animação

A animação do modelo tem como objetivo ilustrar o desempenho do sistema. Serve como ferramenta de validação, ou seja, validar se o modelo simulado se aproxima do funcionamento do modelo real. Nela, é possível enxergar as entidades, os processos, os recursos e seus estados, as quantidades que entram e saem e as rotas das entidades. Os *Variables* com as expressões dos *Records* em relação à entrada de aparas, ao consumo de água, aos resíduos e à saída de papel foram utilizadas como principal base de comparação com o sistema real. Exemplos do módulo *Variable* para contar a quantidade de aparas que entra e para contar a quantidade de papel que sai do sistema podem ser vistos na Figura 50.

Figura 50 – Exemplos de *Variables* usados na animação

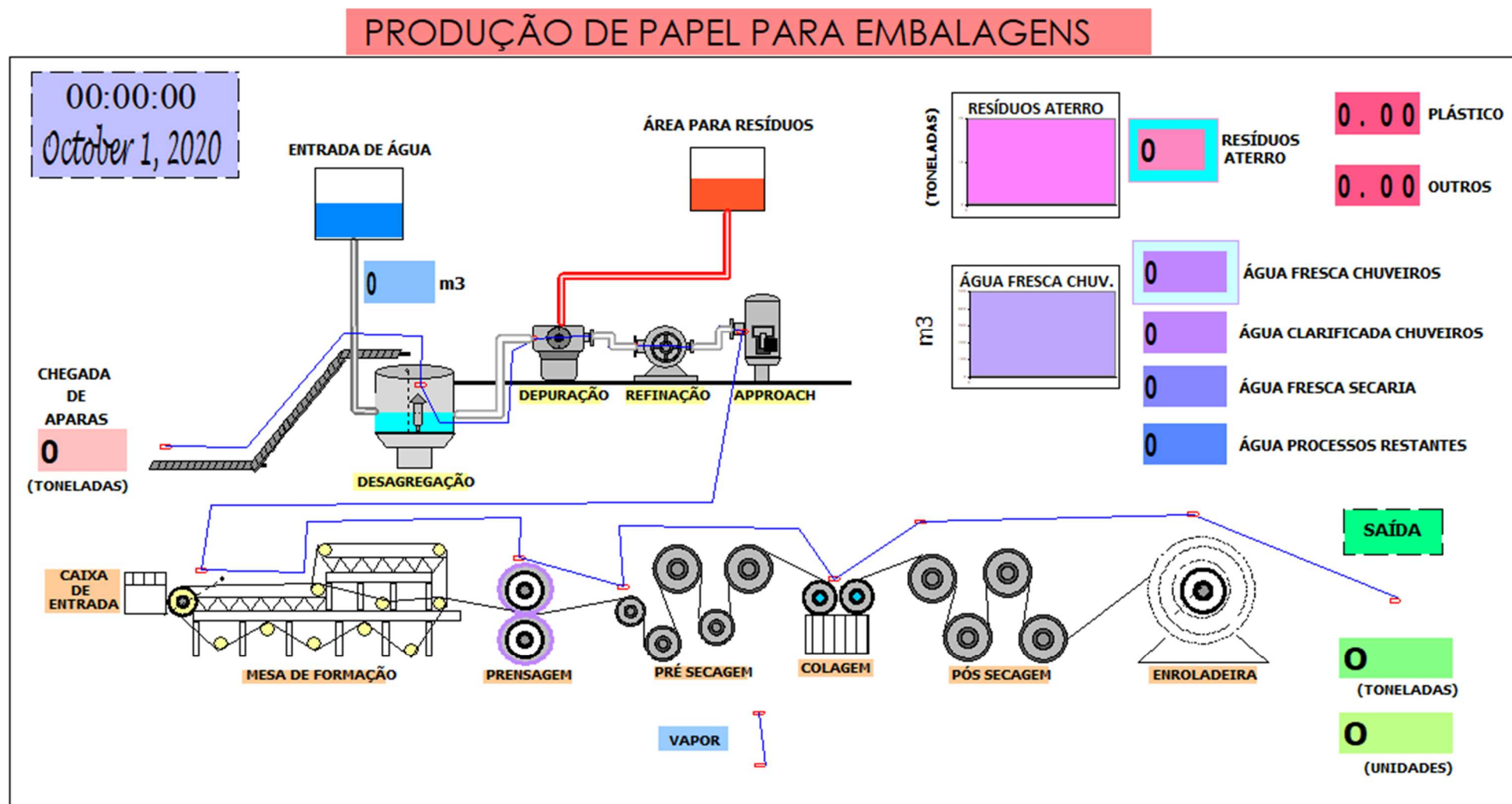


Fonte: Autor (2020)

Na Figura 51, é possível ver a animação antes do modelo ser rodado. Na animação, pode-se visualizar o relógio no tempo zero, que vai até 24 horas; a data; *Variables* que irão indicar a quantidade de aparas que entra no sistema, a quantidade total de resíduos gerados (divididos em plástico e outros), a divisão das quantidades de água consumida e a saída de papel em toneladas e em unidades de bobinas. Além disso, conta com dois gráficos de linha para mostrar a evolução da quantidade de resíduos que irá para o aterro e a quantidade de água fresca consumida nos chuveiros. Para representar a entrada de água, tem-se um gráfico de nível de forma que, na medida que a água entra no sistema, seu nível vai diminuindo. Ainda, para os resíduos, tem-se outro gráfico de nível, onde no decorrer da retirada dos resíduos no processo de depuração, o nível vai aumentando.

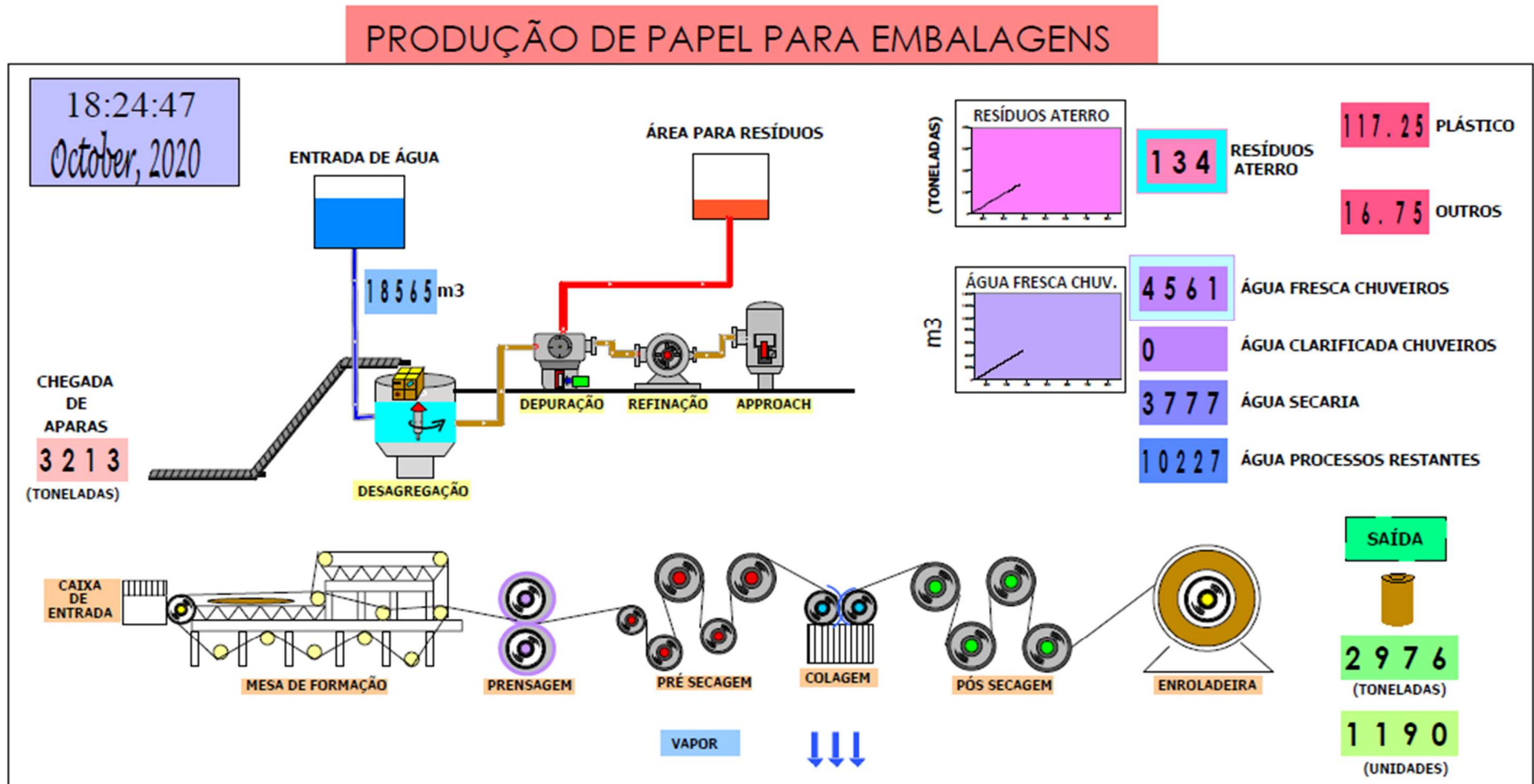
A Figura 52, cenário atual em funcionamento, rodando com um tempo de simulação de 864 horas, considerando o *warm up*, que será explicado mais à frente.

Figura 51 - Animação do Cenário Atual



Fonte: Autor (2020)

Figura 52 - Animação do cenário atual em funcionamento



Fonte: Autor (2020)

4.4.7 Programação

A programação baseou-se no horário real de funcionamento da fábrica. Cada dia de produção equivale a 24 horas ou três turnos de trabalho. Como é um processo automatizado e contínuo, pausas para almoço, por exemplo, não entram no modelo. A única parada inserida, através de *Schedule*, foi a da quebra de papel no final do processo, que ocorre de 3 em 3 horas, com duração de 10 minutos cada.

4.4.8 Validação do Modelo

A validação do modelo ocorreu através de duas formas: da animação e da comparação dos resultados com as planilhas de produção diárias e mensais da fábrica de papel.

Por meio da animação foi possível identificar os processos, os percursos e os equipamentos. A principal forma de validar o modelo foi por meio dos *variables* com as expressões indicando o *record* da quantidade de aparas que entra no sistema, de água consumida, de resíduos gerados e de papel que sai do sistema.

As planilhas de produção utilizadas foram em relação ao balanço geral dos processos, em especial ao consumo de aparas, à produção de papel e à geração de resíduos. Como, no modelo, cada replicação corresponderá a um mês de produção, tomou-se como base de comparação os resultados dos períodos de agosto, setembro e outubro de 2020. Os valores totais de produção em cada um desses meses podem ser vistos na Tabela 3, onde o papel produzido representa, em média, 92% da quantidade de aparas consumida e os resíduos equivalem a uma média de 4%, sendo, dentro dessa porcentagem, aproximadamente 3,5% resíduos plásticos e 0,5% outros tipos de resíduos. As planilhas de produção utilizadas podem ser vistas no Apêndice C.

Tabela 3 – Produção de papel (t), consumo de aparas (t) e resíduos gerados (kg), no cenário real

Valores totais por mês (toneladas)					
Mês/2020	Produção de papel	Consumo de aparas	Geração de Resíduos	% papel em relação as aparas	% resíduos em relação as aparas
Agosto	9147,5	9925,5	379,8	92,2%	3,8%
Setembro	8990,4	9805,6	391,4	91,7%	4,0%
Outubro	9291,3	9939,6	363,15	93,5%	3,7%
Média	9143,1	9890,3	378,12	92,4%	3,82%

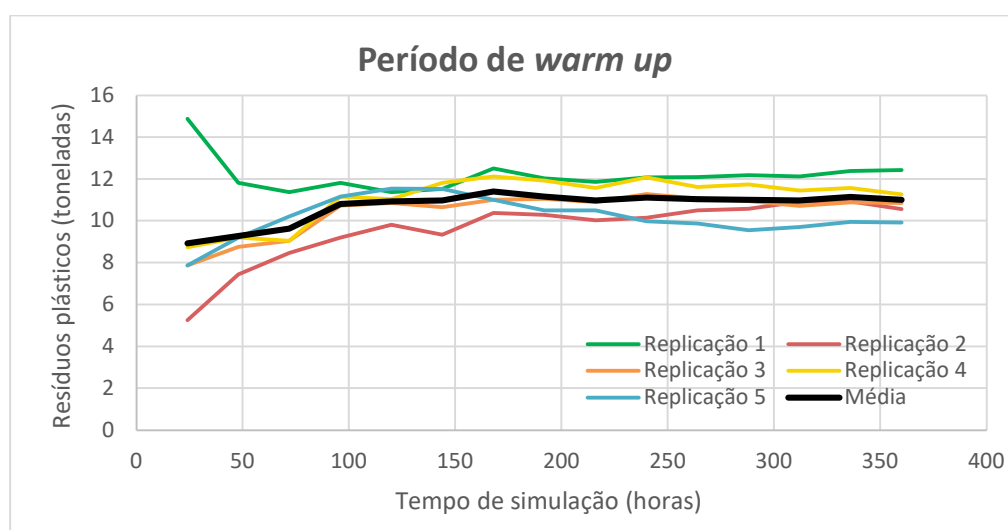
Fonte: Autor (2020)

4.5 Número de replicações e precisão

O modelo proposto é descrito como um sistema não terminal. Dessa forma, considerou-se uma confiança de 95%, um erro de 5% e uma precisão desejada (h^*) de 3% do valor da média da medida de desempenho e a simulação foi feita com 20 replicações. Teve-se como medida de desempenho a geração de resíduos plásticos no mês.

Primeiramente, calculou-se o período de *warm up*, através da observação visual, método sugerido por Freitas Filho (2008). Para isso, o modelo foi rodado a cada 24 horas até chegar em 360 horas, com 5 replicações cada. O gráfico do período de *warm up* pode ser visto na Figura 53, onde considerou-se que o modelo entra em regime permanente a partir de 144 horas.

Figura 53 - Medida de desempenho x *Warm up*



Fonte: Autor (2020)

A precisão calculada e a desejada resultaram em, respectivamente, 5,86 e 9,97. Dessa forma, como a precisão calculada (h) mostrou-se menor do que a desejada (h*), não foi necessário rodar o sistema com mais replicações. Com a determinação do *warm up* de 144 horas, foi estabelecido um tempo de simulação de 864 horas, o que equivale a um mês de produção ao desconsiderar o tempo de *warm up*, sobrando 720 horas. Ou seja, no modelo, cada replicação equivale a um mês. Os resultados da medida de desempenho para as 20 replicações podem ser vistos na Tabela 4.

Tabela 4 - Número de replicações x Medida de desempenho

Número de replicações	Geração de resíduos PLÁSTICOS no mês (toneladas)
1	350,88
2	346,50
3	320,25
4	331,63
5	343,00
6	348,25
7	332,50
8	333,38
9	308,00
10	319,38
11	329,88
12	344,75
13	319,38
14	335,13
15	315,88
16	323,75
17	343,88
18	337,75
19	344,75
20	319,38
Média	332,41
Desvio Padrão	12,53

Precisão calculada (h)	5,86
Precisão desejada (h*)	9,97

326,56	Intervalo de confiança	338,27
--------	-------------------------------	--------

Fonte: Autor (2020)

Portanto, existe uma probabilidade de 95% de que o intervalo [326,56; 338,27] contenha a média dos resíduos plásticos gerados por mês.

4.6 Análise do cenário atual

A avaliação do cenário atual será feita através dos resultados de consumo de aparas, da produção de papel, da geração de resíduos e do consumo de água fresca nos chuveiros.

A relação entre o consumo de aparas e a produção de papel e entre o consumo de aparas e a geração de resíduos, considerando um período de um mês, pode ser vista nas Tabela 5 e Tabela 6, respectivamente.

Tabela 5 - Consumo de aparas x Produção de papel

Replicações	Consumo de Aparas (toneladas)	Produção de Papel (toneladas)	% de papel em relação às aparas
1	9866	9183	93,1%
2	9813	9135	93,1%
3	9859	9196	93,3%
4	9863	9183	93,1%
5	9851	9155	92,9%
6	9877	9192	93,1%
7	9866	9191	93,2%
8	9860	9151	92,8%
9	9855	9185	93,2%
10	9855	9141	92,8%
11	9856	9144	92,8%
12	9868	9145	92,7%
13	9857	9157	92,9%
14	9872	9223	93,4%
15	9880	9207	93,2%
16	9865	9175	93,0%
17	9862	9160	92,9%
18	9875	9193	93,1%
19	9856	9135	92,7%
20	9870	9161	92,8%
Média	9861,30	9170,60	93,00%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 6 – Resíduos gerados x Consumo de aparas

Replicações	Resíduos Gerados (toneladas)	Plástico (toneladas)	Outros (toneladas)	% dos resíduos em relação às aparas
1	401	351	50	4,06%
2	396	346	50	4,04%
3	366	320	46	3,71%
4	379	331	48	3,84%
5	392	343	49	3,98%
6	388	340	48	4,03%
7	380	333	47	3,85%
8	381	334	47	3,86%
9	352	310	42	3,57%
10	365	319	46	3,70%
11	377	329	48	3,83%
12	394	344	50	3,99%
13	365	320	45	3,70%
14	383	335	48	3,88%
15	361	316	45	3,65%
16	370	324	46	3,75%
17	393	344	49	3,98%
18	374	327	47	3,91%
19	394	344	50	4,00%
20	365	319	46	3,70%
Média	378,80	331,54	47,26	3,85%

Fonte: Autor (2020)

Na Tabela 7, é possível visualizar essas médias no modelo atual e no real. Nota-se que o modelo atual é válido, pois os valores de interesse e utilizados para validar o modelo são próximos dos valores de produção reais.

Tabela 7 - Comparação modelo atual com o real, em valores médios

MÉDIAS	Consumo de aparas (toneladas)	Produção de papel (toneladas)	Resíduos gerados (toneladas)	% de papel em relação às aparas	% dos resíduos em relação as aparas
MODELO ATUAL	9861,30	9170,60	379,90	93,00%	3,85%
MODELO REAL (fábrica)	9890,26	9143,08	378,12	92,44%	3,82%

Fonte: Autor (2020)

Na Tabela 8, tem-se a divisão da média de consumo de água no sistema. O foco da análise dos resultados será a água fresca e clarificada consumida nos chuveiros. Na Tabela 9, tem-se o consumo de água fresca nos chuveiros, por mês, em metros cúbicos, em 20 replicações.

Tabela 8 - Divisão do consumo de água

Média de consumo de água		
Vazão da água no sistema	80 m ³ /h	TOTAL
Secaria	16 m ³ /h	20% do total
Água total chuveiros	20 m ³ /h	25% do total
Água fresca chuveiros	20 m ³ /h	100%
Água clarificada chuveiros	0 m ³ /h	0%

Fonte: Autor (2020)

Tabela 9 - Consumo de água fresca nos chuveiros, em m³, com 20 replicações

Replicações	Consumo de água fresca chuveiro cenário atual (m³)
1	14364
2	14526
3	14436
4	14253
5	14583
6	14404
7	14463
8	14369
9	14446
10	14426
11	14402
12	14590
13	14620
14	14530
15	14450
16	14235
17	14404
18	14324
19	14579
20	14434
Média	14442

Fonte: Autor (2020)

4.7 Propostas de Melhorias

4.7.1 Cenário I

Atualmente, a água é retirada do rio, tratada e utilizada nos processos de produção de papel. É conhecida como água fresca.

Então, propõe-se como a primeira melhoria, a economia dessa água fresca, água limpa captada do rio, através do reaproveitamento de água já tratada e que já foi utilizada no processo, conhecida também como água clarificada. Levando em consideração o cenário atual, em que todo o processo é alimentado por água fresca, a uma vazão média de 80 m³/h, foi realizado um estudo em quais pontos da máquina seria possível utilizar água clarificada ao invés da água fresca. Os pontos que se destacaram por permitir a utilização da água clarificada, foram os chuveiros.

A partir do estudo, as vazões de água dos chuveiros foram levantadas e verificados quais deles poderiam utilizar a água clarificada, como segue a Tabela 10.

Tabela 10 - Pontos de utilização de água clarificada, com as respectivas vazões (m³/h)

Chuveiros da mesa inferior			
Local	Vazão (m³/h)	Tipo de água Cenário Atual	Tipo de água Cénário Proposto
Lubrificação das bordas da caixa de sucção	1,14	Fresca	Fresca
Lubrificação transversal das caixas de sucção de transferência	3,18	Fresca	Clarificada
Lubrificação das bordas das caixas de alto vácuo	1,70	Fresca	Fresca
Lubrificação transversal das caixas de alto vácuo simples, dupla e tripla	4,77	Fresca	Clarificada
Cortador de margens	0,28	Fresca	Fresca
Chuveiros da mesa superior			
Local	Vazão (m³/h)	Tipo de água Cenário Atual	Tipo de água Cenário Proposto
Lubrificação das bordas da caixa de alto vácuo dupla	0,57	Fresca	Fresca
Lubrificação transversal da caixa de alto vácuo dupla	1,59	Fresca	Clarificada

Prensa			
Local	Vazão (m³/h)	Tipo de água Cenário Atual	Tipo de água Cenário Proposto
Lubrificação dos tubos de sucção do feltro superior da 1ª prensa	2,27	Fresca	Fresca
Lubrificação dos tubos tira bolha e tubos de sucção do filtro inferior	4,55	Fresca	Clarificada

Fonte: Autor (2020)

Dessa forma, os pontos onde foi possível realizar o uso da água clarificada no lugar da água fresca foram nos chuveiros da mesa superior (lubrificação transversal das caixas de transferência e lubrificação transversal das caixas de alto vácuo simples, dupla e tripla), chuveiros da mesa inferior (lubrificação transversal da caixa de alto vácuo dupla) e na prensa (lubrificação dos tubos tira bolha e tubos de sucção do filtro inferior) totalizando 14,04 m³/h de água clarificada.

4.7.2 Cenário II

Dentro do processo produtivo da máquina de papel são extraídos resíduos plásticos que acompanham as aparas no momento de formação dos fardos. Esses resíduos são retirados durante o processo de desagregação e depuração da massa para formação da folha de papel. A proporção dos resíduos plásticos em relação as aparas é de aproximadamente 3,5%. Este material atualmente é descartado em um aterro sanitário municipal. Com o objetivo de realizar um reaproveitamento deste material, verificou-se que ele possui um alto poder calorífico e que através de processos químicos, como o da pirólise, ele pode ser convertido em combustível através da degradação térmica, gerando, assim, energia.

A segunda proposta, portanto, é a utilização do poder calorífico do plástico residual pirolisado como combustível da caldeira da fábrica, reduzindo, assim, a quantidade de resíduos descartados nos aterros sanitários.

Para agregar essa proposta, foi realizado um levantamento do volume de plástico gerado, verificando o poder calorífico do plástico e da madeira em base seca através da Tabela 11, averiguando quanto haveria de economia de lenha, combustível sólido utilizado atualmente para gerar calor na caldeira.

Tabela 11 - Poder calorífico em base seca de materiais

Componente	PCI (base seca) (kJ/kg)
Orgânico	18.003
Plástico	43.124
Papel/Papelão	15.910
Têxteis e Couro	17.585
Resíduos Sanitários	15.910
Madeira	15.491
Borracha	40.612

Fonte: Adaptada SCHRAMM E BAZZO (2016)

4.7.3 Comparação dos Cenários

A utilização da simulação computacional foi utilizada para a construção dos novos cenários, sendo possível a análise de dados de interesse e a modificação dos cenários sempre que fosse necessário, de acordo com os objetivos traçados.

4.7.3.1 Cenário Atual e Proposto I

No cenário atual, 100% de água fresca é utilizada na reposição de água dos chuveiros. Com a aplicação da água clarificada nos pontos sugeridos, cerca de 70% do volume total de água fresca consumida com chuveiros foi reduzido. Na figura 54, é possível verificar as modificações na modelagem para as novas porcentagens de divisão de água, sendo cerca de 70% de água clarificada e 30% de água fresca nos chuveiros. A Tabela 12 mostra o consumo de água fresca no cenário atual e no proposto, assim como o consumo da água clarificada no proposto. A Tabela 13 mostra a vazão média da água fresca e da clarificada, em m³/h, no cenário atual e no proposto, assim como suas respectivas porcentagens.

Figura 54 - Porcentagens para água fresca e clarificada

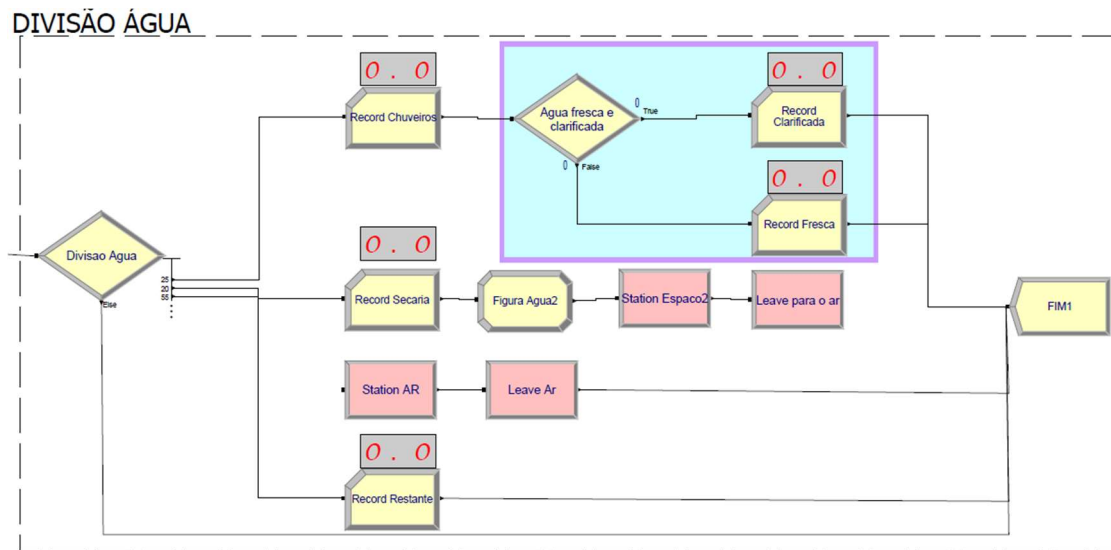


Tabela 12 – Consumo de água fresca no cenário atual em comparação com o proposto

Replicações	Consumo de água fresca chuveiro cenário atual (m³)	Consumo de água fresca chuveiro cenário proposto (m³)	Consumo de água clarificada chuveiro cenário proposto (m³)
1	14364	4309	10055
2	14526	4358	10168
3	14436	4331	10105
4	14253	4276	9977
5	14583	4375	10208
6	14404	4321	10083
7	14463	4339	10124
8	14369	4311	10058
9	14446	4334	10112
10	14426	4328	10098
11	14402	4321	10081
12	14590	4377	10213
13	14620	4386	10234
14	14530	4359	10171
15	14450	4335	10115
16	14235	4271	9965
17	14404	4321	10083
18	14324	4297	10027
19	14579	4374	10205
20	14434	4330	10104
Média	14442	4333	10109

Fonte: Autor (2020)

Tabela 13 – Média da vazão da água fresca e clarificada no cenário proposto e no atual, em m³/h

	Cenário Atual		Cenário Proposto	
	Vazão (m ³ /h)	Percentual (%)	Vazão (m ³ /h)	Percentual (%)
Volume total	20,06	100%	20,06	100%
Volume água fresca	20,06	100%	6,02	30%
Volume de água clarificada	0	0	14,04	70%

Fonte: Autor (2020)

Dessa forma, houve uma diminuição da captação da água fresca do rio em aproximadamente 70%, ou seja, essa porcentagem não será mais retirada do rio, sendo substituída pela água já utilizada e já presente no processo, a água clarificada. Considerando um mês de trabalho, 30 (trinta) dias, essa porcentagem equivale a economia de um volume de 10.108,8 m³ de água fresca.

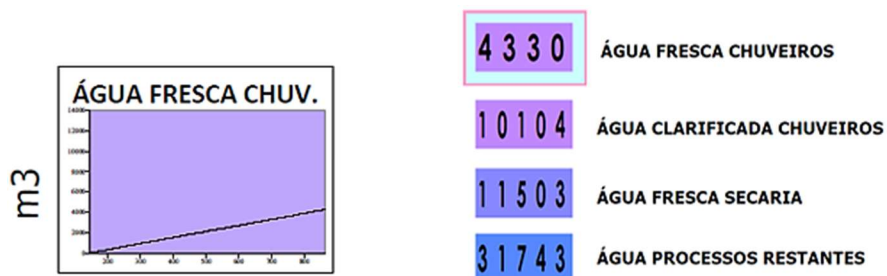
As Figuras 55 e 56 ilustram, por meio da animação de estatísticas, essa diferença, no cenário atual e no proposto. Além disso, na Figura 57, é possível ver um gráfico comparativo entre o consumo de água fresca, no cenário atual e proposto, para 20 replicações, em metros cúbicos.

Figura 55 – Consumo de água na animação do cenário atual, em m³



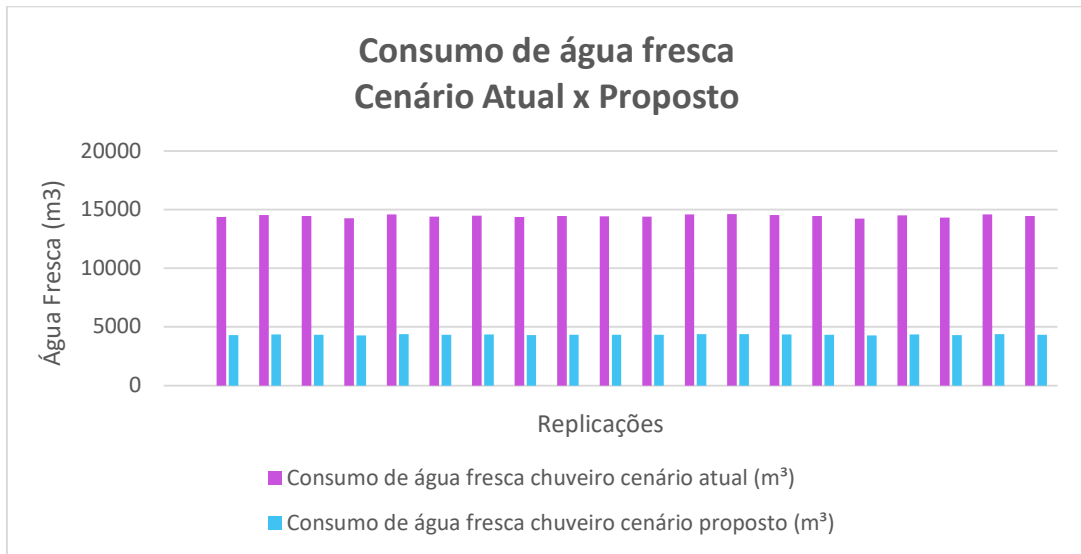
Fonte: Autor (2020)

Figura 56 – Consumo de água na animação do cenário proposto, em m³



Fonte: Autor (2020)

Figura 57 – Comparação consumo de água fresca no cenário proposto e no atual (m³)

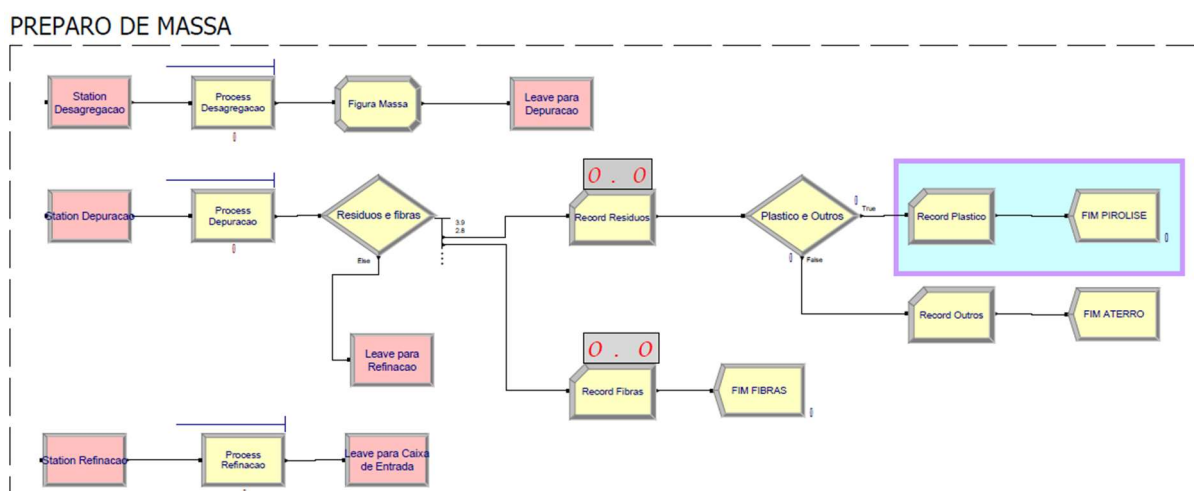


Fonte: Autor (2020)

4.7.3.2 Cenário Atual e Proposto II

No cenário atual, os resíduos gerados representam cerca de 4% do volume consumido de aparas, onde cerca de 3,5% equivalem a resíduos plásticos e 0,5% a outros tipos de resíduos. Ou seja, do total de resíduos gerados, uma média de 87,5% é plástico e 12,5% outros tipos. Nesse cenário, 100% dos resíduos são encaminhados para o aterro municipal. Ao utilizar o poder calorífico do plástico para transformá-lo em combustível, o plástico deixou de ser descartado no aterro, diminuindo a quantidade de resíduos que vai para o aterro. Dessa forma, apenas cerca de 12,5% do total de resíduos é descartado. A Tabela 14 mostra o resultado, para 20 replicações, da quantidade de resíduos que vão para o aterro no cenário atual e no cenário proposto. A figura 58 mostra a representação na modelagem que os resíduos plásticos não vão mais para o aterro e as Figuras 59 e 60 ilustram, por meio da animação de estatísticas, essa diferença, no cenário atual e no proposto.

Figura 58 – Representação, na modelagem, de que o plástico não é descartado no aterro



Fonte: Autor (2020)

Tabela 14 - Resíduos descartados no aterro, no cenário atual e no proposto, em toneladas

Replicações	Resíduos para aterro (plásticos + outros) Cenário Atual	Resíduos para aterro (apenas outros) Cenário Proposto
1	401	50
2	396	50
3	366	46
4	379	48
5	392	49
6	388	48
7	380	47
8	381	47
9	352	42
10	365	46
11	377	48
12	394	50
13	365	45
14	383	48
15	361	45
16	370	46
17	393	49
18	374	47
19	394	50
20	365	46

Fonte: Autor (2020)

Figura 59 - Resíduos que vão para o aterro, na animação do cenário atual, em toneladas



Fonte: Autor (2020)

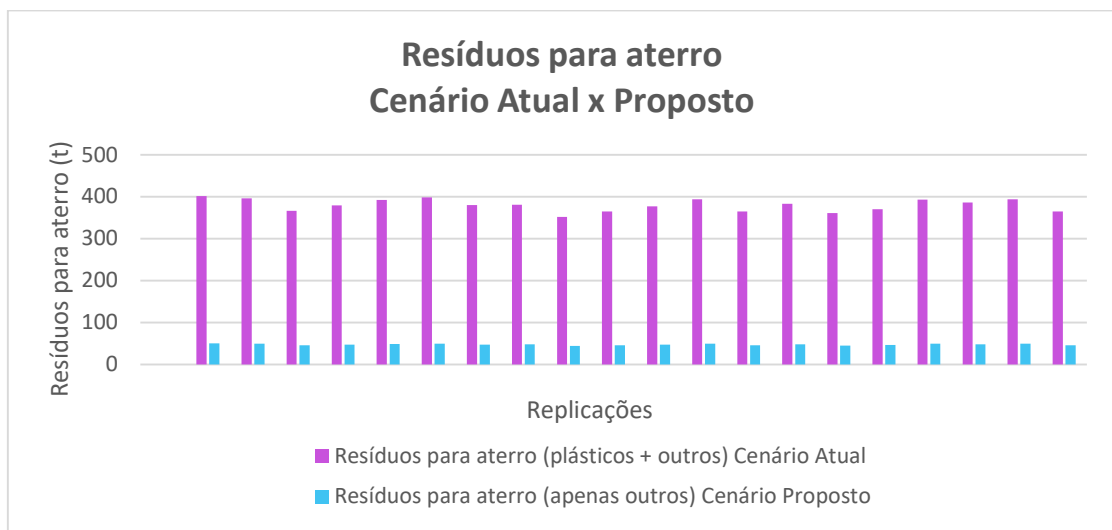
Figura 60 - Resíduos que vão para o aterro, na animação do cenário proposto, em toneladas



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 61, é possível ver um gráfico comparativo entre a quantidade de resíduos descartadas no aterro, no cenário atual e proposto, para 20 replicações, em toneladas.

Figura 61 - Comparação resíduos no cenário proposto e no atual (toneladas)



Fonte: Autor (2020)

Através da Tabela 15, é possível notar que o tempo de decomposição do plástico é de mais de 400 anos. Dessa forma, ao transformar o plástico que iria para o aterro em combustível, uma média de 332 toneladas de plástico deixa de ir para o aterro, por mês, evitando que esse material permaneça no meio ambiente por esse longo período.

Tabela 15 - Tempo de decomposição de materiais

Tempo de decomposição de materiais	
Papel	3 a 6 meses
Panos	6 meses a 1 ano
Filtro de Cigarro	> 5 anos
Madeira pintada	> 13 anos
Nylon	> 20 anos
Metal	> 100 anos
Alumínio	>200 anos
Plástico	> 400 anos
Vidro	>1000 anos
Borracha	indeterminado

Fonte: Adaptado Manual de Educação, Consumo Sustentável – MMA, MEC e IDEC

Além disso, foi calculado, com dados relacionados a base seca, quanto de madeira (lenha) será economizado com essa proposta, sendo economizados em média, por mês, aproximadamente 447 toneladas de madeira, com a utilização do plástico como combustível da caldeira, ou seja, em torno de 9% de madeira seriam economizados e os plástico residual não seria descartado no aterro sanitário. Esse resultado pode ser visto na Tabela 16.

Tabela 16 - Cálculo de economia de madeira na empresa em estudo

Mês	Plástico base seca Tn/mês	Poder calorífico do Plástico kj/kg	Potencial energético mensal do plástico Kj	Poder calorífica da Madeira kj/Kg	Kg de Madeira equivalente ao Potencial energético do Plástico	% de Plástico/Tn de Aparas Consumida	m³ de madeira consumido na empresa	Densidade média da madeira (Kg/m³)	Kg consumidos na empresa	% consumida na empresa
Janeiro	176,4	43.124,00	7.605.685.179,70	15.491,00	490.974,40	1,80%	10.222,30	492	5.029.350,50	10%
Fevereiro	134,9	43.124,00	5.817.737.575,30	15.491,00	375.556,00	1,50%	9.285,70	492	4.568.587,00	8%
Março	149,8	43.124,00	6.457.872.967,10	15.491,00	416.879,00	1,72%	10.072,10	492	4.955.489,80	8%
Abril	110,0	43.124,00	4.742.388.584,60	15.491,00	306.138,30	1,16%	10.199,80	492	5.018.281,10	6%
Mai	129,7	43.124,00	5.592.375.173,70	15.491,00	361.008,00	1,44%	10.039,60	492	4.939.484,40	7%
Junho	162,7	43.124,00	7.014.234.517,30	15.491,00	452.794,20	1,80%	9.330,00	492	4.590.370,30	10%
Julho	167,6	43.124,00	7.228.225.594,50	15.491,00	466.608,10	1,77%	10.435,50	492	5.134.268,90	9%
Agosto	192,6	43.124,00	8.304.334.343,80	15.491,00	536.074,80	1,94%	10.504,40	492	5.168.144,90	10%
Setembro	209,4	43.124,00	9.031.810.349,40	15.491,00	583.036,00	2,14%	10.156,60	492	4.997.055,60	12%
Outubro	170,1	43.124,00	7.336.935.161,10	15.491,00	473.625,70	1,71%	10.433,00	492	5.133.034,80	9%

Fonte: Autor (2020)

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES

A simulação computacional vem constatando grande efetividade ao ser utilizada como uma ferramenta de auxílio a tomada de decisões, pois possibilita simular variados cenários presentes nos processos produtivos e suas conexões.

Dessa forma, este estudo demonstrou e avaliou a sustentabilidade na reciclagem e no uso da água em uma indústria de papel, levantando o sistema de produção de papel, demonstrando esse processo de forma geral, com foco na reciclagem e no uso da água, por meio da simulação computacional. Com isso, foi possível propor cenários de melhoria, referentes a sustentabilidade.

No decorrer da análise do sistema e da coleta de dados, foram realizados diagnósticos de extrema importância para o desenvolvimento das propostas de melhorias, sendo elas: estudo de processos de reciclagem química, do poder calorífico e do tempo de decomposição de materiais variados, estudos sobre o uso dos diferentes tipos de água e análises de pontos na máquina de papel onde seria possível utilizar a água clarificada no lugar da fresca.

Assim, a primeira proposta foi a economia dessa água fresca, através de um estudo de quais pontos poderia haver a substituição do uso de água fresca pela clarificada. Depois de constatar que eram nos chuveiros, simulou-se o a utilização de água clarificada nos pontos sugeridos e houve uma diminuição da captação da água fresca do rio em aproximadamente 70%, economizando-se, em um mês, um volume de 10.108,8 m³ de água fresca. Essa utilização é viável do ponto de vista químico pois, esse tipo de água já é utilizado em outros pontos da fábrica e, também, na indústria de papel em geral.

A segunda proposta foi a utilização do poder calorífico do plástico, através do processo de pirólise, como combustível da caldeira da fábrica, reduzindo, assim, a quantidade de resíduos descartados nos aterros sanitários. Com isso, de 100% de resíduos gerados que iam para o aterro, agora apenas 12,5% terão essa destinação, pois cerca de 87,5% dos resíduos totais eram plásticos, que serão transformados em combustível. Além disso, depois de utilizar os dados de poder calorífico e de base seca do plástico, constatou-se que serão economizados em média, por mês, aproximadamente 447 toneladas de madeira, com a utilização do plástico como combustível da caldeira, ou seja, em torno de 9% de madeira seria economizada e o plástico residual não seria descartado no aterro sanitário.

Portanto, a simulação mostrou-se sendo uma ferramenta essencial no processo de análise do sistema e de sugestões de melhorias e os resultados alcançados mostraram-se

satisfatórios.

Além disso, recomenda-se para trabalhos futuros: submeter as propostas de melhorias a direção da empresa em estudo e, se autorizado, comparar os resultados simulados neste estudo com os resultados da realidade; que haja um estudo mais aprofundado a respeito dos processos de reciclagem química, com o intuito de analisar o processo que melhor se aplicará; ampliar a simulação para outras áreas da fábrica, aumentando sua complexidade; e fazer um estudo de simulação envolvendo os custos dessas propostas, analisando sua viabilidade econômica.

REFERÊNCIAS

ALEXANDERSSON, T. **Water reuse in papermills**. Lun: Media-Tryck, 2003.

ALEXANDRE, G. **Redução do Material Orgânico do Lodo Final na Fabricação de Papel Tissue através de Otimização do Processo**. 2012. Disponível em: < <https://acervodigital.ufpr.br/bitstream/handle/1884/28577/R%20-%20D%20-%20GILSON%20ALEXANDRE.pdf?sequence=1&isAllowed=y> > Acesso em: 08 abr. 2020.

ALLEM, R. **Characterization of paper coatings by scanning electron microscopy and image analysis**. J. Pulp Pap. Sci., 24(10), 329. 1998.

ALLENDER, B. M.; WATERHOUSE, J. F. Morphological factors in the refining of Eucalypt and Pinus radiata fibers. Institute of Paper Chemistry. **Technical Paper Series**, n. 209, 1986.

ANAP. Associação Nacional dos Aparistas de Papel. **Relatório Anual 2018-2019**. 2019. Disponível em: < <https://anap.org.br/website/wp-content/uploads/2019/08/relatorio-estatstico-2018.pdf> > Acesso em: 18 mar. 2020.

ARANTES, B.; Miranda, J.; PEREZ, N.; SOUZA, R.; NERY, F.; PATAR, A.; Ribeiro, V. **Fechamento de Circuito em Águas do Processo de Fabricação de Papel**. 2000. Revista O Papel, São Paulo, out. 2000. Artigo Técnico, p. 79-85.

ARAÚJO, C. Curso Preparação de Massa, ABTCP. Agosto, 2010

BACHMANN E ASSOCIADOS. **Benchmarking de Fábricas de Celulose e Papel Tipos de Papéis**. 2013. Disponível em: < <http://www.bachmann.com.br/website/documents/ACPTiposdePapeisrev1.pdf> > Acesso em: 15 mar. 2020.

BACHMANN, D. **Benchmarking ambiental na indústria de celulose e papel**. 2009. Disponível em: < http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1251302938_d9dd1703fb7ee71abcc8e5c37473a806_27356785.pdf > Acesso em 01 abr. 2020.

BANKS, J.; CARSON, J.S.; NELSON, B.L.; NICOL, D.M. **Discrete event system simulation**. 4.ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2005.

BARBOSA, F. **Análise das variáveis operacionais de um processo de produção de papel visando maior eficiência da operação**. 2015. Disponível em: < http://repositorio.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/265981/1/Barbosa_FranciscoElpidioViana_M.pdf > Acesso em: 05 abr. 2020.

BNDES. **A Indústria de Papel e Celulose**. 2011. Disponível em: < https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/935/1/A%20indústria%20de%20papel%20e%20celulose_P-final.pdf > Acesso em: 18 mar. 2020.

BPBES. **O mundo não está o caminho da sustentabilidade, diz relatório da ONU.** 2019. Disponível em: <<https://www.bpb.es.net.br/3799/>> Acesso em: 01 mar. 2020.

BRESSAN, G. **Modelos de Simulação de Eventos Discretos.** 2002. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/2446242/mod_resource/content/1/modsim03.pdf> Acesso em: 07 Abr. 2020.

CAMPOS, Edison da Silva. **Curso Básico de Fabricação de Celulose e Papel.** 2011. Disponível em: <http://www.eucalyptus.com.br/artigos/outros/2011_Curso_Fabricacao_Celulose_Papel.pdf> Acesso em: 20 mar. 2020.

CARTONAGEM VISION. **O papelão ondulado.** 2016. Disponível em <<http://cartonagemvision.com.br/noticias/o-papelao-ondulado/>> Acesso em 13 jun. 2020.

CHUNG, Christopher A. **Simulation Modeling Handbook: a practical approach.** Washington D.C: CRC press, 2004.

CHWIF, L.; MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e Aplicações.** São Paulo: Bravarte. 2a ed. 2007.

CHWIF, L. MEDINA, A. C. **Modelagem e Simulação de Eventos Discretos: Teoria e prática.** 3. ed. São Paulo. 2010.

CHWIF, L. MEDINA, A. C. **Livro Simulação.** Disponível em <<http://www.livrosimulacao.eng.br/download/Analyzer.pdf>> Acesso em 15 jun. 2020.

DOLNY, L. **Redução do Efluente de Água Branca em uma Máquina De Papel.** 2011. Disponível em <<https://acervodigital.ufpr.br/handle/1884/27615>> Acesso em 02 abr. 2020.

DRUMMOND, D. **Otimização do setor de prensagem por meio de planejamento de produção em uma indústria de papel.** Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química. 2008. Disponível em <http://taurus.unicamp.br/bitstream/REPOSIP/266229/1/Drummond_DanielaMedeirosDevienne_D.pdf> Acesso em 13 jun. 2020.

FARDIM, P. **Papel e Química da Superfície Parte II – Revestimento e Printabilidade.** 2002. Disponível em: <https://www.tappi.org/content%5CJournal%5C2002%5CTJ%5C09sep02%5CFardim2_Port.pdf> Acesso em 27 mar. 2020.

FAVARO, J. **Estudos da polpação kraft, branqueamento e refino de Eucalyptus grandis x Eucalyptus urophyll.** Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista. 2015. Disponível em: <<http://www.athena.biblioteca.unesp.br/exlibris/bd/cathedra/11-12-2015/000855548.pdf>> Acesso em 10 jun. 2020.

FIEP. Federação das Indústrias do Estado do Paraná. **Indústria de Celulose, Papel, Embalagens e Artefatos de Papel**, p. 39. 2016. Disponível em:

<[http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital\[75083\].pdf](http://www.fiepr.org.br/para-sindicatos/estudos-economicos/uploadAddress/papel_digital[75083].pdf)> Acesso em 15 mar. 2020.

FILHO, C. ; LEITIS, G. **Sistema de Vácuo na Formação da Folha de Papel**. O Papel, 2013. Disponível em <http://www.revistaopapel.org.br/noticia-anexos/1373897771_8edb81568b87706fd9e480fa4a6c5c89_946160675.pdf> Acesso em 26 mar. 2020.

FREITAS, P. J. **Introdução a Modelagem e Simulação de Sistemas: Com Aplicações em Arena**. Florianópolis – SC, Ed. Visual Books, 2008.

G1. **Sobrecarga da Terra 2019: Planeta atinge esgotamento de recursos naturais mais cedo em toda a série histórica**. 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/natureza/noticia/2019/07/29/sobrecarga-da-terra-2019-planeta-atinge-egotamento-de-recursos-naturais-mais-cedo-em-toda-a-serie-historica.ghtml>> Acesso em: 23 mar. 2020.

GAVIRA, M. **Simulação Computacional como uma Ferramenta de Aquisição de Conhecimento**. 2003. Disponível em < <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18140/tde-20052003-004345/publico/Gavira1.pdf> > Acesso em 10 abr. 2020.

GESS, J. M. **Retention of fines and fillers during papermaking**. Atlanta (USA). Tappi, 1998.

GHAREHKHANI, S.; SADEGHINEZHAD, E.; KAZI, S. N., YARMAND, H.; BADARUDIN, A., SAFAEI, M. R.; ZUBIR, M. N. M. **Basic effects of pulp refining on fiber properties- A review**. Carbohydrate polymers, v. 115, n. 1, p. 785-803, 2015.

GIERTZ, H. **Pulp and Paper Technology**. PT Coursein Markarid. Sweden, 1993.

GRUNWALD, A. **Diverging pathways to overcoming the environmental crisis: A critique of ecomodernism from a technology assessment perspective**. Journal of Cleaner Production, Technology and Degrowth. v. 197, p. 1854–1862, 1 out. 2018.

HAMAGUCHI, M. **Análise do Circuito de Água em Processo de Fabricação de Papel Imprensa Integrada com Produção de Pastas Termomecânicas**. 2007. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde-09012008-175600/publico/Marcelo_Hamaguchi_Dissertacao_Edicao_Revisada_FINAL.pdf> Acesso em: 08 abr. 2020.

HARREL, C.R.; MOTT, J.R.A., BATEMAN, R.E., BOWDEN, R.G., GOGG, T.J. **Simulação: Otimizando Sistemas**. 2a ed. São Paulo – SP, Ed. IMAM, 2000.

HARREL, C.; GHOSH, B. BOWDEN, R. **Simulation Using Pro model**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 2004.

IBÁ. Associação Brasileira de Árvores. **Relatório 2019**. 2019. Disponível em: <<https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2019.pdf>> Acesso em: 17 mar. 2020.

IPEA. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Apenas 13% dos resíduos sólidos urbanos no país vão para reciclagem**. 2017. Disponível em: <http://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=29296 > Acesso em 15 mar. 2020.

JAEGER, P. **Celulose e Papel**. Disponível em <[http://engmadeira.yolasite.com/resources/celulose%20parte%2001%20\(1\).pdf](http://engmadeira.yolasite.com/resources/celulose%20parte%2001%20(1).pdf) > Acesso em: 10 abr. 2020.

KLOCK, U. ANDRADE, A. **Fabricação do Papel – UFPR – DETF – Disciplina Polpa e Papel**. Disponível em:<<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasklock/polpaepapel/fabricadepapel.pdf>> Acesso em 13. Jun. 2020.

KOSAI, S.; YAMASUE, E. **Global warming potential and total material requirement in metal production: Identification of changes in environmental impact through metal substitution**. Science of The Total Environment, v. 651, p. 1764-1775, 2019.

KWAN, V.; NAIDU, E.; BIXTER, M. **Controlling environmental crisis appraisal through knowledge, vividness, and timing**. Journal of Environmental Psychology, v. 61, p. 93–100, 1 fev. 2019.

LAW, A. M. **How to build valid and credible simulation models**. In: WINTER SIMULATION CONFERENCE, Proceedings... Austin, TX, USA, 2009.

LAW, A. M.; KELTON, W. D.: **Simulation Modeling and Analysis**. 2. Ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

LEHR, J., KEELEY, J., LEHR, B J., 2005, **Water encyclopedia, volumes 1-5**. Publisher John Wiley & Sons.

LIMA, M. J.; BARBOSA, G. A.; BEAL, C. R. **Otimização da transferência e estocagem utilizando ferramentas de modelagem e simulação**. Bol. téc. Petrobras, 2003, 46. (3/4). 301 – 307, jul./dez., 2003.

LUNDIN, T.; WURLITZER, F.; PARK, S. W.; FARDIM, P. **Análise energética em refinação de baixa consistência de madeira de coníferas**. O Papel, v.70, n.10, p.41-60, 2009.

MARTIN, C. **Reciclagem de papel cartão com plástico já é realidade**. O Papel, 2019. Disponível em:< <https://www.opapeldigital.org.br/pub/papel/?numero=67&edicao=11085>> Acesso em 07 mar. 2020.

MMA. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Catadores de Materiais Recicláveis**. Disponível em < <https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/catadores-de-materiais-reciclaveis> > Acesso em 01 abr. 2020.

MORAES, C. PESCIO, P. **Otimização do controle de velocidade em bomba de mistura na caixa de entrada para processo de fabricação de papel**. Disponível em: < https://www.academia.edu/34057356/Otimização_do_controle_de_velocidade_em_bomba_de_mistura_na_caixa_de_entrada_para_processo_de_fabricação_de_papel > Acesso em 11 jun. 2020.

NISKANEN, K. **Paper Physics**. Papermaking Science & Technology Series – Volume 16: 1ST. Ed. TAPPI: New York, 2000.

NUNES, D. **Conservação de Água em Máquina de Fabricação de Papel**. 2007. Disponível em < <http://livros01.livrosgratis.com.br/cp044520.pdf> > Acesso em: 03 abr. 2020.

O PAPEL. **O Horizonte do Setor de Base Florestal**. 2020. Disponível em < https://cdn-mflip.sflip.com.br/temp_site/edicao-a7e272202d38f212dc3978bcb70a6f.pdf > Acesso em 20 mar. 2020.

OLIVEIRA, L. **Sistemas de Preparo de Massa para Produção de Papel**. 2016. Disponível em < <https://www.slideshare.net/LucianoROliveira/sistema-de-preparo-de-massa-na-produo-de-papel> > Acesso em 13 mar. 2020.

PARAGON. **O que é Simulação?** 2019. Disponível em: < <http://www.paragon.com.br> >. Acesso em: 09 Set. 2019

PAULAPURO, H. **Papermaking Science and Technology – Book 8 - Papermaking Part 1, Stock - Preparation and Wet End**. Gummerus Printing, Jyväskylä, Finland. 2000.

PENG, C.Y. **Water Consumption, Quality Demanded, and Re-use of the Treated Wastewater for Paper Industry**. 2001. Disponível em: < <http://www.water.org> >. Acesso em 02 abr. 2020.

PEREIRA, S. S. **A importância dos catadores de materiais recicláveis no processo de gestão ambiental dos resíduos sólidos urbanos: breves reflexões na cidade de Campina Grande/PB**. Revista Agrogeoambiental, Pouso Alegre, Edição Especial n. 1, p. 13-17, ago. 2013. Disponível em < <https://agrogeoambiental.ifsuldeminas.edu.br/index.php/Agrogeoambiental/article/view/563> > Acesso em 14 jun. 2020.

POCOVI, H.C. **Secagem do papel pelo processo de alta intensidade e de alta temperatura**. Congresso Anual da ABCP, 21; p. 447-461; São Paulo. 1988.

PÖYRY. **A Indústria De Celulose E Papel No Brasil**. 2016. Disponível em < https://www.poyry.com.br/sites/www.poyry.com.br/files/media/related_material/16out27a-abtcp.pdf > Acesso em 18 mar. 2020.

PRADO, D. **Usando o ARENA em Simulação**. Belo Horizonte, MG. Ed. INDG, 2004. Série Pesquisa Operacional – Volume 3.

RABELO, J. **Manual do Arena 9.0**. 2006. Disponível em < http://mz.pro.br/simulacao/32-APOSTILA_ARENA_9.pdf> Acesso em 12 jun. 2020.

REZENDE, R. **Notas de aula da disciplina de Simulação de Sistemas**. Goiânia: Curso de Engenharia de Produção, Pontifícia Universidade Católica de Goiás, 2020.

RIBEIRO, L.; FREITAS, L.; CARVALHO, J.; FILHO, J. **Aspectos econômicos e ambientais da reciclagem: um estudo exploratório nas cooperativas de catadores de material reciclável do Estado do Rio de Janeiro**. Belo Horizonte: Nova Economia, 2014. Vol. 24, número 1.

SALLES, A. C.; ALVES, A. P. F.; DOLCI, D. B.; LUNARDI, G. L. **Adoção de Práticas de TI Verde nas Organizações: Um Estudo Baseado em Mini Casos**. IV Encontro da Administração da Informação – EnADI. 2013.

SANTOS, Vanessa Sardinha dos. **Tempo de decomposição do lixo**. Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/curiosidades/tempo-decomposicao-lixo.htm>. Acesso em 23 de novembro de 2020.

SCOTT, L.; VIGAR-ELLIS, D. **Consumer understanding, perceptions and behaviors with regard to environmentally friendly packaging in a developing nation**. International Journal. 2014.

SCHRAMM, Júlia Santos; BAZZO, Edson. **Análise do potencial energético e do processo de incineração como alternativa na gestão de resíduos sólidos urbanos em Florianópolis**. Anais dos Encontros Nacionais de Engenharia e Desenvolvimento Social- ISSN 2594-7060, v. 13, n. 1, 2016.

SIEBERS, P.O. **The impact of human performance variation on the accuracy of manufacturing system simulation models**, Tese de Doutorado, University school of industrial and manufacturing, 2007.

SILVA, B. SANTOS, S. CLETO, M. **Comparativo entre embalagem de polpa moldada e embalagem de papelão ondulado utilizado em uma indústria de fixadores**. Santos, São Paulo. 2019. Disponível em < http://www.abepro.org.br/biblioteca/TN_STO_298_1686_37241.pdf> Acesso em: 13 jun. 2020

SHANNON, R.E. **Systems simulation: the art and science**. Englewood Cliffs, N. J.: Prentice-Hall, 1975.

SMOOK, G. A. **Handbook for Pulp & Paper Technologists**. 3rd edition. USA: Angus Wilde Publications Inc. 2002, p. 74 - 90, 101 - 134.

SMOOK, G. A. **Manual para técnicos de pulpa y papel**. Atlanta: Tappi Press, 1990.

STOERE, P.; NAZHAD, M.; KEREKES, R. **An Experimental study of the effect of refining on paper formation.** Tappi Journal Peer Reviewed Paper, vol. 84, n. 7, July 2001.

STRÖM, G. **A novel approach for improving fiber coverage during blade coating.** Nord. Pulp Pap. Res. J., 10(4), 227. 1995.

SUNDHOLM, J. **Mechanical Pulping.** Papermaking Science & Technology Series – Volume 5: 1st. Ed. TAPPI: New York, 1999.

TAYLOR, R.E. **Simulation and Analysis of Industrial Systems.** Richard D. Irwin, Homewood, III, 1970.

THOMPSON, G.; SWAIN, J.; KAY, M.; FORSTER, C.F. **The treatment of pulp and paper mill effluent: a review.** Bioresource Technology, v. 77, p. 275-286, 2001.

VIALI, Lorí. **Testes de Hipóteses Não Paramétricos.** UFRGS. Porto Alegre. 2008

VOITH. **Desagregação. A tecnologia adequada para cada matéria-prima.** Disponível em < <http://voith.com/br/produtos-e-servicos/tecnologia-de-fabricacao-de-papel/secao/preparacao-de-massa/desagregacao-10616.html?page=1> > Acesso em 13 mar. 2020.

YILDIZ-GEYHAN, E.; ALTUN-CIFTCIOGLU, G. A.; KADIRGAN, M. A. N. **Social life cycle assessment of different packaging waste collection system.** Resources Conservation and Recycling. v.124, p. 1-12, 2017.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Dados coletados

Tem-se as tabelas com os dados coletados.

A1 - Chegada de aparas

Chegada de aparas (toneladas/hora)									
14,50	13,01	13,08	14,64	13,01	13,70	13,71	13,99	13,49	14,20
14,33	14,24	13,79	14,00	15,10	14,98	14,05	14,14	13,85	13,48
14,29	14,52	13,89	14,57	13,50	14,61	14,27	13,54	14,50	13,79
14,71	14,89	15,00	15,00	15,13	13,98	13,85	14,04	14,70	14,29
13,61	14,57	13,82	14,24	15,02	14,38	13,48	14,68	14,75	13,55

A2 - Chegada de água

Vazão da água (m ³ /hora)								
79	80	80	79	80	80	79	79	80
80	80	80	80	79	81	79	80	80
81	81	81	81	79	81	80	81	79
79	79	80	81	81	79	81	79	80
80	80	79	81	79	81	80	80	81

A3 - Tempo Total do processo

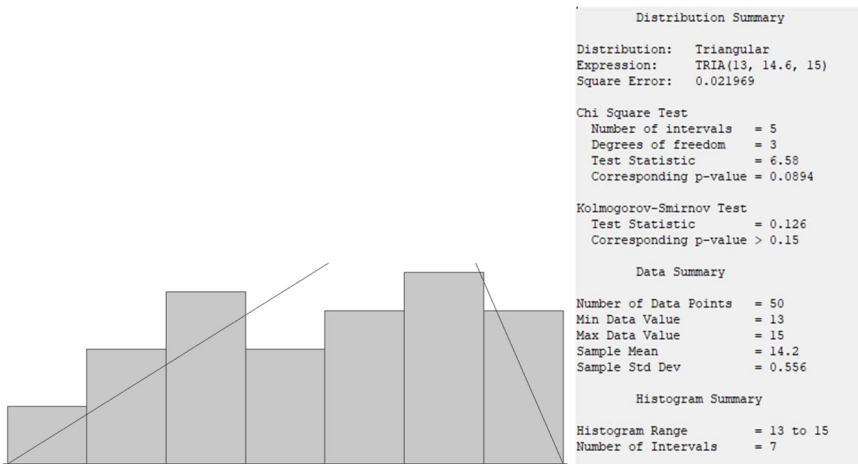
Tempo para fazer uma bobina (minutos)									
21.44	23.01	25.25	21.45	25.56	23.34	26.09	25.34	24.34	22.55
24.01	22.44	25.58	22.00	24.44	24.23	27.43	26.02	25.44	21.45
22.55	23.13	22.45	22.09	24.35	23.00	23.12	26.06	27.09	25.01
20.59	26.00	20.34	27.55	21.56	20.59	23.44	22.09	24.09	24.06
23.23	27.31	24.55	20,00	23.00	24.09	20.00	23.45	25.56	22.00

A4 - Tempo de deslocamento na esteira

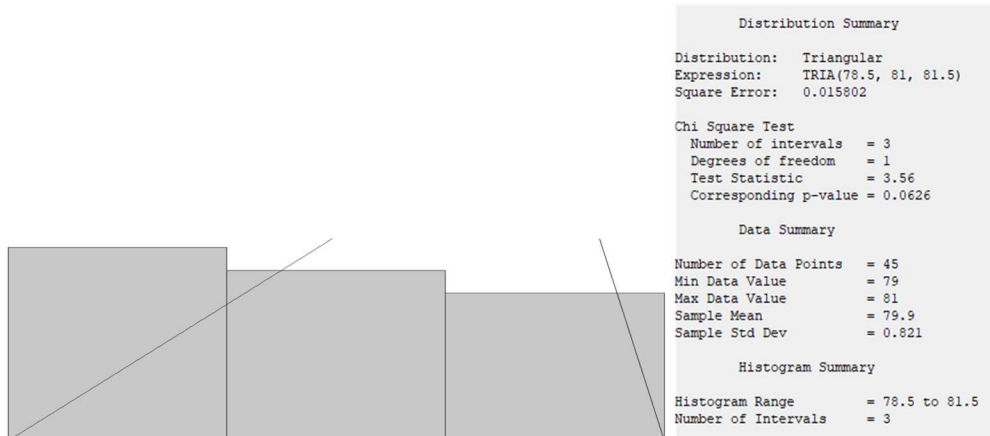
Tempo de deslocamento na esteira (minutos)									
4,54	3,55	6,39	6,33	5,09	7,09	7,31	4,57	4,56	7,03
6,66	5,37	6,12	8,34	8,11	6,59	7,12	5,33	4,00	5,57
3,34	7,11	5,56	3,59	4,55	9,08	5,59	5,59	6,07	7,22
5,50	4,57	3,59	8,01	4,78	4,54	7,12	7,44	5,23	8,25
7,56	6,48	6,01	7,04	5,03	3,45	3,55	6,45	5,11	3,55
5,00	5,20	6,10	4,70	7,00	5,10	5,20	5,00	5,00	5,40
5,20	5,70	4,90	4,80	6,10	5,00	7,00	5,30	5,60	5,20
5,00	4,90	5,60	6,00	4,90	4,00	5,00	5,10	3,90	4,70
4,80	5,40	5,20	5,00	5,05	5,07	5,09	5,00	6,20	4,50
4,70	4,09	5,10	4,90	5,00	6,00	5,30	5,00	5,10	5,00

APÊNDICE B – *Input Analyzer*

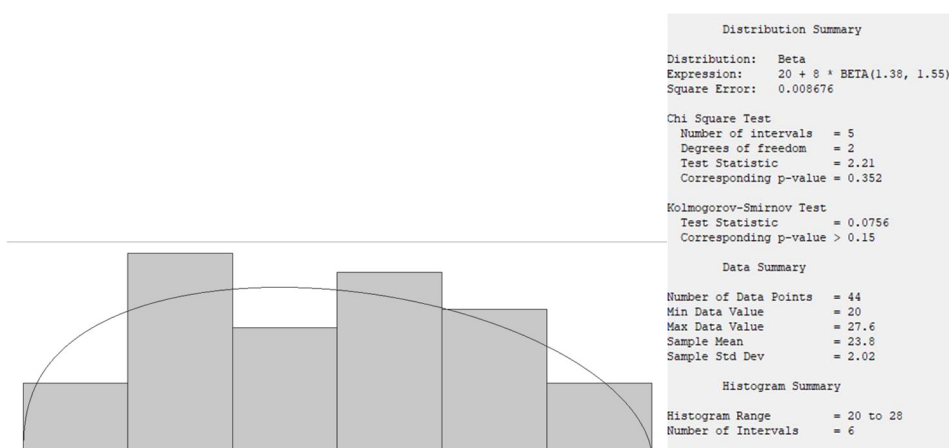
B1 – Chegada de Aparas



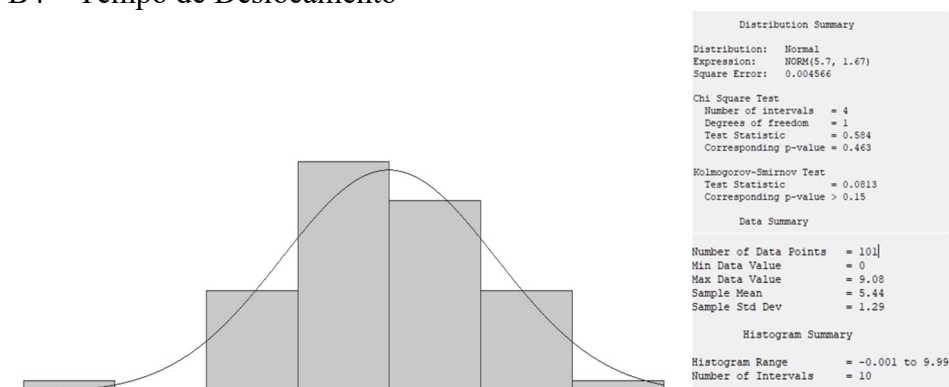
B2 – Chegada de água



B3 – Tempo de processo de uma bobina



B4 – Tempo de Deslocamento



APÊNDICE C – Dados para validação do modelo

C1 – Produção mês de agosto/2020

Produção de papel (t) - Agosto				Consumo de aparas (t) - Agosto				Resíduos Totais (kg) - Agosto			
Data	Prod. Papel	Data	Prod. Papel	Data	Aparas	Data	Aparas	Data	Resíduos	Data	Resíduos
1-ago	293,921	17-ago	300,516	1-ago	308,57	17-ago	327,335	1-ago	10180	17-ago	8630
2-ago	290,462	18-ago	281,587	2-ago	315,61	18-ago	307,316	2-ago	14960	18-ago	10020
3-ago	223,596	19-ago	307,948	3-ago	259,28	19-ago	334,488	3-ago	9330	19-ago	15800
4-ago	322,683	20-ago	307,213	4-ago	365,71	20-ago	346,372	4-ago	18200	20-ago	11920
5-ago	312,584	21-ago	288,877	5-ago	332,22	21-ago	303,409	5-ago	15240	21-ago	7570
6-ago	323,069	22-ago	300,493	6-ago	346,46	22-ago	323,829	6-ago	14420	22-ago	5580
7-ago	264,504	23-ago	316,437	7-ago	284,41	23-ago	335,475	7-ago	9240	23-ago	8940
8-ago	314,164	24-ago	323,939	8-ago	340,98	24-ago	359,052	8-ago	9610	24-ago	9020
9-ago	271,335	25-ago	306,027	9-ago	297,51	25-ago	339,686	9-ago	24060	25-ago	22130
10-ago	271,433	26-ago	277,245	10-ago	295,65	26-ago	298,921	10-ago	11410	26-ago	12290
11-ago	272,621	27-ago	291,878	11-ago	297,22	27-ago	325,192	11-ago	19240	27-ago	8020
12-ago	308,385	28-ago	308,748	12-ago	328,32	28-ago	343,983	12-ago	10900	28-ago	8330
13-ago	297,643	29-ago	313,383	13-ago	315,07	29-ago	328,907	13-ago	21340	29-ago	12850
14-ago	219,99	30-ago	307,485	14-ago	238,57	30-ago	320,225	14-ago	11170	30-ago	11500
15-ago	324,50	31-ago	293,803	15-ago	353,20	31-ago	312,316	15-ago	11340	31-ago	6880
16-ago	311,038	TOTAL	9147,507	16-ago	340,20	TOTAL	9925,49	16-ago	9700	TOTAL	379820

	Produção Papel	Consumo Aparas	Geração Resíduos
Total (toneladas)	9147,51	9925,49	379,82
Média diária	295,08	320,03	12,25

% média de papel produzido em relação ao consumo de aparas	92,2%
% média de resíduos gerados em relação ao consumo de aparas	3,8%

C2 – Produção mês de setembro/2020

Produção de papel (t) - Setembro				Consumo de aparas (t) - Setembro				Resíduos Totais (kg) - Setembro			
Data	Prod. Papel	Data	Prod. Papel	Data	Aparas	Data	Aparas	Data	Resíduos	Data	Resíduos
1-set	299,97	17-set	300,72	1-set	329,08	17-set	323,44	1-set	13790	17-set	14970
2-set	260,49	18-set	312,05	2-set	284,63	18-set	339,96	2-set	19630	18-set	15080
3-set	334,08	19-set	303,06	3-set	362,02	19-set	330,03	3-set	17640	19-set	10170
4-set	341,43	20-set	259,86	4-set	376,81	20-set	277,22	4-set	8210	20-set	9490
5-set	333,22	21-set	315,24	5-set	363,77	21-set	344,77	5-set	13790	21-set	13590
6-set	292,88	22-set	316,25	6-set	320,79	22-set	343,95	6-set	9240	22-set	13610
7-set	307,85	23-set	311,70	7-set	332,44	23-set	342,69	7-set	7150	23-set	9170
8-set	260,92	24-set	289,32	8-set	284,03	24-set	315,13	8-set	14700	24-set	14750
9-set	250,76	25-set	283,16	9-set	275,37	25-set	309,42	9-set	15620	25-set	12820
10-set	297,57	26-set	304,67	10-set	323,05	26-set	328,81	10-set	10460	26-set	9160
11-set	296,96	27-set	300,48	11-set	326,61	27-set	343,76	11-set	14790	27-set	10220
12-set	299,22	28-set	325,15	12-set	328,06	28-set	350,78	12-set	13650	28-set	12820
13-set	270,25	29-set	286,36	13-set	291,68	29-set	307,00	13-set	11410	29-set	18750
14-set	310,17	30-set	274,56	14-set	341,65	30-set	294,15	14-set	17840	30-set	11370
15-set	335,98	TOTAL	8990,43	15-set	369,48	TOTAL	9805,65	15-set	14610	TOTAL	391400
16-set	316,14			16-set	345,07			16-set	12900		

	Produção Papel	Consumo Aparas	Geração Resíduos
Total (toneladas)	8990,43	9805,65	391,40
Média diária	299,68	326,85	13,05

% média de papel produzido em relação ao consumo de aparas	91,7%
% média de resíduos gerados em relação ao consumo de aparas	4,0%

C3 – Produção mês de outubro/2020

Produção de papel (t) - Outubro				Consumo de aparas (t) - Outubro				Resíduos Totais (kg) - Outubro			
Data	Prod. Papel	Data	Prod. Papel	Data	Aparas	Data	Aparas	Data	Resíduos	Data	Resíduos
1-out	313,708	17-out	332,805	1-out	341,09	17-out	361,17	1-out	7140	17-out	5990
2-out	268,086	18-out	235,429	2-out	289,00	18-out	237,28	2-out	9200	18-out	4600
3-out	290,529	19-out	305,807	3-out	314,00	19-out	332,44	3-out	5870	19-out	13020
4-out	317,097	20-out	295,898	4-out	351,45	20-out	323,64	4-out	12380	20-out	18810
5-out	289,569	21-out	303,604	5-out	312,15	21-out	318,92	5-out	10050	21-out	17140
6-out	270,862	22-out	285,235	6-out	294,62	22-out	304,46	6-out	8430	22-out	11650
7-out	300,846	23-out	285,434	7-out	329,09	23-out	304,98	7-out	10360	23-out	8010
8-out	290,614	24-out	327,827	8-out	316,08	24-out	349,72	8-out	8660	24-out	9510
9-out	275,413	25-out	296,423	9-out	299,75	25-out	306,05	9-out	19130	25-out	19860
10-out	278,586	26-out	305,425	10-out	301,83	26-out	326,54	10-out	8980	26-out	12130
11-out	316,948	27-out	317,594	11-out	344,00	27-out	336,61	11-out	9680	27-out	14200
12-out	314,449	28-out	300,455	12-out	341,70	28-out	324,88	12-out	17920	28-out	21060
13-out	299,23	29-out	285,578	13-out	318,19	29-out	304,42	13-out	11090	29-out	8440
14-out	270,349	30-out	297,837	14-out	231,10	30-out	320,87	14-out	16890	30-out	10650
15-out	351,877	31-out	323,35	15-out	380,64	31-out	348,42	15-out	15440	31-out	8980
16-out	344,453	TOTAL	9291,317	16-out	374,58	TOTAL	9939,64	16-out	7880	TOTAL	363150

	Produção Papel	Consumo Aparas	Geração Resíduos
Total (toneladas)	9291,32	9939,64	363,15
Média diária	299,72	320,63	11,71

% média de papel produzido em relação ao consumo de aparas	93%
% média de resíduos gerados em relação ao consumo de aparas	4%