



UNIVERSIDADE DE UBERABA

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E EXTENSÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA  
MESTRADO PROFISSIONAL

URIAS FERNANDES MACIEL JÚNIOR

DESEMPENHO DE UM SECADOR CONTÍNUO EM LEITO FLUIDIZADO DE  
DISPERSIVOS SOLÚVEIS - WG

UBERABA, MG  
2020





URIAS FERNANDES MACIEL JÚNIOR

DESEMPENHO DE UM SECADOR CONTÍNUO EM LEITO FLUIDIZADO DE  
DISPERSIVOS SOLÚVEIS - WG

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Orientador:

Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer

UBERABA, MG

2020

Catálogo elaborado pelo Setor de Referência da Biblioteca Central UNIUBE

M187d Maciel Júnior, Urias Fernandes.  
Desempenho de um secador contínuo em leito fluidizado de dispersivos solúveis - WG / Urias Fernandes Maciel Júnior. – Uberaba, 2020.  
66 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química, concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais.  
Orientador: Prof. Dr. José Roberto Delalibera Finzer.

1. Processos de secagem. 2. Engenharia Química. I. Finzer, José Roberto Delalibera. II. Universidade de Uberaba. Programa de Mestrado em Engenharia Química. III. Título.

CDD 660.28426

URIAS FERNANDES MACIEL JÚNIOR

**DESEMPENHO DE UM SECADOR CONTÍNUO EM LEITO FLUIDIZADO DE  
DISPERSIVOS SOLÚVEIS - WG**

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química - Mestrado Profissional da Universidade de Uberaba (PPGEQ-MP/UNIUBE).

Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos Agroindustriais

Aprovado em: 14/12/2020

BANCA EXAMINADORA:



---

Prof(a). Dr(a). José Roberto Delalibera Finzer  
Orientador - Universidade de Uberaba



---

Prof(a). Dr(a) Marília Assunta Sfredo  
IFRS - Instituto Federal do Rio Grande do Sul



---

Prof(a). Dr(a) Mauro Luiz Begnini  
UNIUBE - Universidade de Uberaba



## DEDICATÓRIA

*Ao meu Avô Klinger Peralta, o grande homem em minha vida que nunca irei esquecer. Uma vitória de seu “mochelo” um menino que virou um homem. Nunca me desviei de meu caminho graças à presença do senhor em meu coração. Que o Sr. e minha vó Maria Hilda estejam com Deus em sua plenitude olhando por mim e minha família.*

*A minha querida esposa Ana Paula, que sempre me encorajou a buscar meus sonhos enfrentando junto todos os desafios da vida sejam eles profissionais e pessoais, incentivando nas horas difíceis e estando sempre presente.*

*Minha linda filha Geovana Fernandes, que agradeço muito a Deus de fazer parte de sua história e a exemplo da mãe sempre me vê como um super-herói. Sua existência direciona meu foco e desafio ainda maiores para buscar cada vez mais inspirá-la no caminho do conhecimento*

*Aos meus pais Urias e Vera que me ensinaram o maior bem do mundo, que são os valores de família, exemplo de honestidade, amor e a experiência de conhecer Jesus Cristo e seu poder.*

*A minha irmã Grazielle uma guerreira, que tem um desafio de lutar aos obstáculos da vida e a benção de ser uma educadora, minha irmã Gabrielle que representa a juventude atual, mas com um caráter de família e dedicação aos estudos invejável, a meu irmão Gabriel abençoado por Deus por estar vivo diante de suas lutas quando bebê e desafios de uma família linda a construir.*



## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, em primeiro lugar, por me dar a dádiva da vida, sempre me proporcionar oportunidades incríveis de crescer profissionalmente e pessoas incríveis que contribuíram com meu amadurecimento e realização dos meus sonhos.

Ao professor Dr. José Roberto Delalibera Finzer além de estar presente em minha graduação, disponibilizou todo apoio e orientação, dedicando seu conhecimento em todas as etapas do projeto, organizando ideias e estruturando todo o trabalho.

A toda equipe da Ouro Fino Química sem a qual não poderia ter realizado este projeto, pelo grande incentivo e cooperação com dados Técnicos conferidos ao presente trabalho.

À Universidade de Uberaba, pela disponibilidade e estrutura oferecidas ao longo do programa de pós-graduação. Aos queridos colegas do mestrado, que sempre alegraram nossas aulas, que sempre mostraram que apesar das dificuldades erámos capazes de seguir com esta conquista.

Aos docentes do Programa de Mestrado em Engenharia Química da Universidade de Uberaba agradeço pela oportunidade e pelas orientações ao longo do programa. Agradeço pelas contribuições para a construção deste projeto e também aos docentes examinadores pelo tempo concedido a leitura e entendimento deste trabalho.



## EPÍGRAFE

*“Não te mandei eu? Esforça-te, e tem bom ânimo; não temas, nem te espantes; porque o Senhor teu Deus é contigo, por onde quer que andares”.*

*(Josué 1:9)*



## RESUMO

Este trabalho apresenta um projeto da modelagem matemática do comissionamento de um secador de leito fluidizado em uma unidade de defensivos agrícola herbicidas. Trata-se de uma nova tecnologia implantada no país, que por sua vez, apresenta vários pontos positivos, desde a sua formulação, aplicação e eficácia. A planta de grânulos dispersíveis em água, tem como padrão de produção, uma formulação pó molhável e a alteração de grande impacto seria uma adequação multi-propósito, com um processo de grânulos dispersíveis em água. Para realização desta mudança física do produto, foi necessário o projeto de um secador de leito fluidizado. Todo o processo necessita de uma precisão muito alta, para que assim, o produto acabado tenha uma boa performance desde sua dispersão em água e absorção após a aplicação no campo. Assim, foi de extrema importância realizar o estudo do processo com ênfase na operação de secagem. A secagem deve seguir uma forma específica realizada durante o desenvolvimento tecnológico da fórmula e registrada nos órgãos MAPA, ANVISA e IBAMA. Para que o grânulo não sofra uma queima direta, ele deve perder umidade de forma lenta e homogênea, evitando assim o que se chama de cozimento. O processo se inicia na micronização dos materiais, em seguida ele é direcionado a umectação do qual se utiliza cerca de 8 a 9% m/m de água. Após a umectação realizam-se a extrusão sendo a passagem em baixa pressão e formação dos grânulos. A entrada no secador é na seção superior na primeira câmara com temperatura próxima de 55 a 60°C. Deve-se realizar uma passagem durante as cinco divisões de câmara propiciando que os grânulos percam umidade, não realizem quebra física, não se aglomerem, haja um resfriamento lento e não formação de *oversize*. Toda instrumentação deve seguir um procedimento interno, do qual consiga controlar o sistema retirando os efeitos externos de impacto desfavorável. Para que mantenha uma alta capacidade de fluidização e secagem, conta com uma alimentação externa do ar atmosférico e como fornecedor de energia térmica um queimador em óleo combustível. Para o final do processo as características físico-químicas são de caráter provatório e determinam o desempenho, disponibilidade e qualidade.

**Palavras-Chave:** Comissionamento do leito fluidizado, Controle do processo de secagem, ganho de performance, modelagem matemática.



## ABSTRACT

This work presents a project of the mathematical modeling of the startup and commissioning of a fluidized bed dryer in a pesticide plant. It is a new technology implanted in the country, which in turn, presents numerous positive points, since its formulation, application and effectiveness. The production plant has a wettable powder formulation as a production standard and the high impact change would be a multi-purpose suitability, with a process of water-dispersible granules. To carry out this physical change of the product, it would be necessary to design a fluidized bed dryer. The whole process requires very high precision, so that the finished product has a good performance since its dispersion in water and absorption after application in the field. Thus, it was extremely important to model the process on the bed during the drying process. The drying must follow a specific form carried out during the technological development of the formula and registered in Organs MAPA, ANVISA and IBAMA bodies. In order for the granule not to suffer a direct burn, it must lose moisture slowly and evenly, thus carrying out what we call cooking. The process starts with the micronization of the materials, then it is directed to wetting, which uses about 8 to 9% w / w of water. After wetting, we perform the extrusion with low pressure and granule formation. The entry into the dryer is superior in the first chamber with a temperature close to 55 to 60°C. A model pass must be made during the three chamber divisions, allowing it to lose moisture, undergo heating, perform physical breakage, do not agglomerate, slow cooling to room temperature and do not form oversize. All instrumentation must follow an internal procedure, from which it is able to manipulate the system removing the external impact effects. In order to maintain a high fluidization and drying capacity, it has an external supply of atmospheric air and a fluid oil burner as heat energy. At the end of the process, the physical and chemical characteristics are of a provincial nature and determine performance, availability and quality.

**Key words:** Fluidized bed commissioning, drying process control, performance gain, mathematical modeling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Perda de pressão em leito de partículas em função da velocidade superficial do ar. Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991). .....	6
Figura 3.2 - Secador de bandejas vibradas com escoamento cruzado de partículas e ar de secagem (ADAPTADO DE KUNII E LEVENSPIEL, 1991). .....	7
Figura 3.3 - Leito fluidizado em múltiplas Câmaras (Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991). .....	7
Figura 3.4 - Comportamento do escoamento de partículas em leito fluidizado. (Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991). .....	8
Figura 3.5 - Leito fluidizado horizontal usado no estudo (CHEN et al., 2017). .....	10
Figura 3.6 - Esquema de um secador de leito vibro-jorrado (FINZER, 1989). .....	11
Figura 3.7 - Efeitos da difusão em poros (SFREDO, 2006). .....	13
Figura 3.8 - Gráfico de Geldart (Geldart, 1986) .....	14
Figura 3.9 - Função $F(t/t_m)$ Diferentes modelos de escoamento dos sólidos (Kunii e Levenspiel, 1991).....	15
Figura 4.1 - Foto da unidade de pós-granulados herbicida WDG: A - Sistema de Cartuchos de filtros possibilitando retirada dos particulados “finos” arrastados pelo ar de secagem; B – Secador de Leito Fluidizado; C – Elevador de canecas. (Autor, 2020) .....	17
Figura 4.2 - Fluxograma de formulação geral herbicida granulado: A- Silos de armazenagem, B- Flexomix (umectação do produto), C- Extrusão dos grânulos, D- Secador, E- Elevador de canecas e F- Peneira classificatória. (Autor, 2020) .....	18
Figura 4.3 - Fluxograma do projeto do herbicida granulado, onde A – Etapa de formulação WP, B- Etapa de extrusão e secagem (WG), C – Utilidades, D – Armazenagem e envase. (AUTOR, 2020). .....	19
Figura 4.4 - Supervisório granulado herbicida – Tela de controle da umectação / extrusão: A- Instrumentação de adição da água, B- Instrumentação de extrusão / granulação. (AUTOR, 2020).....	20
Figura 4.5 - Tela principal de comando. Secador de leito fluidizado. A- Saída e controle de Finos , B- Entrada de Ar aquecido, C- controle de temperaturas das câmaras e D- produto acabado. (AUTOR, 2020).....	21
Figura 4.6 - Tela de supervisão Envase. . (Autor, 2020) .....	22
Figura 4.7 - Moegas de Armazenagem / transferência. (Autor, 2020) .....	23
Figura 4.8 - Visão superior Roscas dosadoras de pós para extrusão automatizadas. (Autor, 2020).....	24
Figura 4.9 - Tanque dosador de fluido. (Autor, 2020).....	25
Figura 4.10 - Flexomix FXD 160. (Autor, 2020). .....	26
Figura 4.11 - Extrusora Bextruder. (Autor, 2020). .....	27
Figura 4.12 - Tela perfurada. (Autor, 2020) .....	27



Figura 4.13 - Visão lateral do equipamento extrusora. (Autor, 2020).	28
Figura 4.14 - Secador de leite fluidizado, constituído por cinco câmaras (Autor, 2020).	29
Figura 4.15 – Filtro coletor de particulados. (Autor, 2020).	29
Figura 4.16 - Dados extraídos do sistema durante o turno. ( Autor, 2020).	30
Figura 4.17 - Esquema do interior do secador com descrição de dimensões, A- Superior, B – Inferior, C- Elevação e D – Separação entre etapas. (Autor, 2020).	31
Figura 4.18 - Imagens internas do Secador e suas etapas. Onde A- Visão interna do secador demonstrando as divisões , B- Medida da parte inferior das chapas de separação das câmaras, C- Medida da parte superior das chapas de separação das câmaras, D- Espaço entre a chapa e o fundo do secador e E- medida interna entre as chapas. (Autor, 2020).	32
Figura 4.19 - Leite fluidizado industrial constituído por multi-câmaras, portas laterais de inspeção acesso. (Autor, 2020).	33
Figura 4.20 - Visão interna da Câmara demonstrando leite e passagem entre as placas e aberturas abaixo das divisórias. (Autor, 2020).	33
Figura 4.21 - Sistema de coleta e saída do ar atmosférico. (Autor, 2020).	34
Figura 4.22 - Controles de automação Termostatos na parte superior e inferior das câmaras (Autor, 2020).	35
Figura 4.23 - Sistema de Armazenagem de fluido térmico BPF e queimador. (Autor, 2020).	36
Figura 4.24 - Estação de fornecimento do gás GLP (Autor, 2020).	36
Figura 4.25 - Elevador de canecas. (Autor, 2020).	37
Figura 4.26 - Peneira vibratória (Autor, 2020).	38
Figura 5.1 - Paquímetro utilizado para medição do tamanho das partículas (Autor, 2020).	39
Figura 5.2 - Equipamento Karl Fischer (Autor, 2020).	43
Figura 5.3 - Gráfico resultados de Umidade dos Grânulos entrada do Secador (Autor, 2020).	44
Figura 5.4 - Resultados de Umidade dos Grânulos Saída do Secador (Autor, 2020).	45
Figura 5.5 - Pintura dos grânulos para identificação. (Autor, 2020).	46
Figura 5.6 - $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$	50
Figura 5.7 - Distribuição do $t(s) \times C(\%)$ Câmara 01	51
Figura 5.8 - $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$	53
Figura 5.9 - Distribuição do $T(s) \times C(\%)$ câmara 02	53
Figura 5.10 - $t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$	55
Figura 5.11 - Distribuição do $T(s) \times C(\%)$ câmara 03.	56



Figura 5.12 – $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$ .....	58
Figura 5.13 – Distribuição do $t(s) \times C(\%)$ câmara 04.....	58
Figura 5.14 – $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$ .....	60
Figura 5.15 – Distribuição do $t(s) \times C(\%)$ Câmara 05.....	61
Figura 5.16 - Distribuições do teor de umidade das partículas medidas na entrada e na saída para todos os experimentos. $Q_0(X)$ é o teor de umidade cumulativa normalizado das partículas. ....	62
Figura 5.17 - Comparação de resultados numéricos para modelos tanque em série (TIS) e dados experimentais de distribuição de tempo de residência. $E(t)$ saída das partículas.....	63
Figura 5.18 - Estudo de tempo de transposição por câmara. (Autor, 2020). ....	64
Figura 5.19 - Dados de tempo de transporte durante a passagem pelas câmaras e umidade obtida na saída de cada câmara (Autor, 2020).....	65
Figura 5.20 - Imagem do Instrumento de controle de temperatura. (Autor, 2020).....	65
Figura 5.21 – Esquema do sistema de automação no supervisor para o controle de temperatura do ar (Autor, 2020).....	66



## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1 – - Resultados referentes do tamanho das partículas em milímetros. (Autor, 2020).....	40
Tabela 5.2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS (Autor, 2020). .....	41
Tabela 5.3 - Resultados de Umidade dos Grânulos Entrada do Secador (Autor,2020). .....	43
Tabela 5.4 - Resultados de Umidade dos Grânulos Saída do Secador (Autor,2020).....	44
Tabela 5.5 – Resultados de teor de umidade na saída de cada câmara. (Autor,2020). .....	45
Tabela 5.6 - Estudo de tempo de transposição por câmara. (Autor,2020). .....	47
Tabela 5.7 Intervalo das Partículas na Câmara 01.....	47
Tabela 5.8 Intervalo das partículas na câmara 02.....	48
Tabela 5.9 Intervalo das partículas na câmara 03.....	48
Tabela 5.10 Intervalo das partículas na câmaras 04. ....	48
Tabela 5.11 Intervalo das partículas na câmara 05.....	48
Tabela 5.12 $F(t_i/t_m)$ e $t_i/t_m$ . .....	49
Tabela 5.13 $F(t/t_m) \times (t_i/t_m) t$ Câmara / $t$ Médio.....	50
Tabela 5.14 - $F(t_i/t_m)$ e $t_i/t_m$ , .....	52
Tabela 5.15 $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T$ Câmara / $T$ Médio .....	52
Tabela 5.16 $F(t_i/t_m)$ e $t_i/t_m$ , .....	54
Tabela 5.17 - $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T$ Câmara / $T$ Médio .....	55
Tabela 5.18 - $F(t_i/t_m)$ e $(t_i/t_m)$ . .....	57
Tabela 5.19 - $(t/t_m) X (t_i/t_m) T$ câmara / $T$ Médio .....	57
Tabela 5.20 - $F(t_i/t_m)$ e $t_i/t_m$ . .....	59
Tabela 5.21 - $(t/t_m) X (t_i/t_m) T$ Câmara / $T$ médio.....	59
Tabela 5.22 - Dados de tempo durante a passagem e umidade obtida . (Autor,2020).....	64



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

D50	Diâmetro máximo de 50% das Partículas	$\mu\text{m}$
D90	Diâmetro máximo de 90% das Partículas	$\mu\text{m}$
D10	Diâmetro máximo de 10% das Partículas	$\mu\text{m}$
$h$	Altura	m
$r$	Raio	m
$R$	Resistência	$\text{m}^{-1}$
$t$	Tempo	s
$v$	Velocidade	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$V$	Volume	$\text{m}^3$
$\Delta P$	Diferencial de Pressão	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
$\pi$	Constante Pi (3,14)	
$\rho$	Densidade	$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$
ISO	Certificação de qualidade / meio ambiente / segurança	
CLP	Instrumento de controle do processo ( <i>Programmable Logic Controller</i> )	
OEE	Indicador de Eficiência Global do Equipamento	
F(t)	Função em relação ao tempo	
$\Delta P$	Diferencial de Pressão	$\text{kg}\cdot\text{cm}^{-2}$
BPF	Óleo de baixo ponto de fluidez	
CS	Suspensão de encapsulado	
$C_p$	Capacidade calorífica	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
$C_{pi}$	Capacidade calorífica do componente i	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
CNTP	Condições normais de temperatura e pressão	
EC	Concentrado Emulsionável	
EW	Emulsão de óleo em água	
FISPQ	Ficha de informações de segurança de produtos químicos	
FS	Suspensão concentrada para tratamento de sementes	
GLP	Gás liquefeito de petróleo	
L	Comprimento	m
$m_i$	Vazão mássica do componente	$\text{kg}\cdot\text{h}^{-1}$
MAPA	Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento	



$P_{V_{ar}}$	Pressão parcial de vapor d'água no ar	Pa
P	Pressão	Pa
$P_n$	Pressão atmosférica nas condições normais	Pa
$P_{atm}$	Pressão atmosférica local	Pa
SC	Suspensão concentrada	
SP	Pó solúvel	
SE	Suspo-emulsão	
SL	Concentrado solúvel	
T	Temperatura	°C
$T_{ch}$	Temperatura adiabática de chama	°C
U	Energia interna	$\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$
u	Velocidade do fluído	m/s
$u_{mf}$	Velocidade mínima de fluidização	m/s
$u_g$	Velocidade do ar	m/s
V	Volume	$\text{m}^3$
W	Taxa de trabalho	kJ/h
$W_f$	Taxa de trabalho de escoamento = $\sum v_i.(P.V_{n1})$	kJ/h
WG	Grânulo dispersível em água	
WP	Pó molhável	
$\Delta p_{mf}$	Queda de pressão na velocidade mínima de fluidização	kPa
$T_i$	Tempo inicial	s
$\Delta T$	Variação de tempo inicial e final	s
Q	Constante da somatória entre a concentração e tempo	s
$T_m$	Tempo médio	s
C	Concentração de partículas na população de medida	%
$\Delta P$	Desvio Padrão	
$X_i$	Valor na posição i no conjunto de dados	
$M_a$	Média aritmética dos dados	
n	Quantidade de dados	



## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS .....	3
2.1	Objetivo geral .....	3
2.2	Objetivos específicos .....	3
2.3	Justificativas .....	3
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
3.1	Defensivos na Indústria do Agronegócio .....	4
3.2	Conceitos de Fluidização.....	5
3.3	Partículas Porosas : Mecanismo de Migração da Umidade .....	11
3.4	Conceitos de Secagem e Classificação de Mecanismo na Fluidização de Partículas .....	13
4	MATERIAL E MÉTODOS .....	16
4.1	Unidade Industrial de Formulação WP e WG .....	16
4.2	Descrição do Processo .....	17
4.3	Projeto da Unidade WG .....	18
4.4	Supervisório de automação e controle do sistema de formulação.....	19
4.5	Etapas de Moagem / Extrusão .....	23
4.6	Secador em leito Fluidizado .....	28
4.7	Sistema de controle e aquecimento .....	34
4.8	Transportes e Classificação .....	37
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	39
5.1	Determinação do Tamanho dos Grânulos .....	39
5.2	Determinação da Umidade dos Grânulos .....	42
5.3	Parametrização dos Instrumentos do processo de secagem .....	65
6	CONCLUSÃO .....	66



## 1 INTRODUÇÃO

O processo industrial de defensivos vem cada vez mais se renovando, contudo sofre grandes impactos de demanda levando em consideração a disputa do mercado e o viés ambiental. No cenário geral de produção dos defensivos são utilizadas muitas tecnologias para melhorar cada vez mais a eficiência e a menor dosagem. Uma tecnologia inovadora é a mudança do estado físico do produto WP (pó molhável) para grânulos WG (grânulos dispersíveis em água). O propósito é realizar o *startup e* condicionamento da unidade tendo como principal impacto as características físico-químicas do produto final.

Dentro da legislação brasileira existem inúmeros parâmetros pelos quais se deve seguir fielmente. Hoje os principais órgãos governamentais são ANVISA (Agência Nacional de Vigilância Sanitária), MAPA (Ministério Agricultura Pecuária e Abastecimento) e IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente). No estudo atual foi realizado um grande investimento na ordem de R\$ 12.000.000,00 do qual contemplava a extensão do processo de formulação já existente na unidade. Para que o projeto fosse contemplado inicialmente foram realizados estudos prévios em laboratório e prateleira (*Shelf-life*), após a validação foi realizado o comissionamento em planta industrial que será objeto do estudo. Assim a empresa realizou a aquisição de um produto Herbicida com dois ingredientes ativos dos quais são direcionados à cultura da cana. O produto já era comercializado por outra empresa do ramo agroquímico. Todo o processo de formulação sempre foi realizado com uma mistura dos ativos e tensoativos mais o veículo inerte. Para facilitar no momento da adição, formação e preparo da calda utilizou-se um acondicionamento diferencial do mercado (hidrossolúvel na embalagem primária). Contudo, tinha-se o viés de que o agricultor não ficaria exposto durante a adição do pó no tanque de mistura.

Durante o processo de formulação foi desenvolvida uma umectação do WP (pó molhável) de aproximadamente 8 a 9% com água, realizando uma mistura. Logo em seguida todo o material foi direcionado a um sistema de homogeneização e extrusão em baixa pressão. O produto ao passar por uma tela com orifícios toma uma forma de grânulos. Durante esse momento devido ter recebido uma grande carga de umidade há a

necessidade de realizar a secagem o que faz parte da ampliação na unidade. Todo o processo de acondicionamento/ transporte pneumático/ dosagem de umectante/ mistura/ extrusão/ secagem/ classificação e envase foi fielmente projetado levando em consideração as características físico-químicas do produto. A etapa de secagem é a mais importante sendo que, o grânulo deve receber energia térmica controlada durante toda etapa. Esta deve ser com fluidização uniforme e com retirada lenta da umidade evitando que o grânulo se queime. Assim o objetivo do estudo é desenvolver o comissionamento da unidade com atendimento da demanda mantendo a qualidade do produto mesmo após a passagem em um secador de leito fluidizado. O secador consome GLP para queima e manter as câmaras com temperaturas acima da ambiente e controlada pelo CLP.

O grande desafio em realizar o estudo do desempenho do secador, podendo assim, reduzir o custo operacional, aumentar a produtividade, melhorar performance durante a aplicação, evitar perdas de processo (geração de *Oversize*), e estabilidade no controle operacional de forma que facilite a automação industrial. Durante todo o processo devido às certificações das ISO 9001, 140001 e OSHAS tem-se o compromisso de toda rastreabilidade, preocupação com meio ambiente e sustentabilidade. OSHAS, para lista de referências.

## 2 OBJETIVOS E JUSTIFICATIVAS

### 2.1 Objetivo geral

Estudar o desempenho do secador, evidenciando o comportamento do grânulo durante as etapas na operação de secagem correlacionando o tempo de passagem (produtividade) e perda de umidade (qualidade), com foco na melhoria do OEE (*Overall Equipment Effectiveness*).

### 2.2 Objetivos específicos

1. Classificar o tipo de escoamento do grânulo dentro das câmaras na etapa de fluidização;
2. Estabilizar os parâmetros de controle da secagem *versus* perda da umidade durante o escoamento do produto após extrusão até o envase;
3. Realizar o estudo da influência do tempo de passagem dos grânulos em função da temperatura, minimizando a geração de resíduos seja os finos no sistema de exaustão e os *oversizes* pós-classificação;
4. Efetuar a qualificação operacional técnica para melhorias de *performance* e novos equipamentos de controle na automação.

### 2.3 Justificativas

Redução de custo operacional (Custo Fixo – Mão de obra direta e Processos processo), proporcionando o aumento no OEE (*Indicador de Eficiência Global do Equipamento*), disponibilidade para novas janelas e competitividade, sem deixar de

focar no desempenho de aplicação no campo. Todo este processo tem o viés na inovação do mercado agroindustrial. No final espera-se diminuição de desperdícios no processo com sustentabilidade e tempo de vida.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 Defensivos na Indústria do Agronegócio**

Os defensivos são caracterizados nas indústrias químicas como misturas de inúmeras substâncias ou até mesmo uma única substância. Hoje no mercado existem várias aplicações sendo direcionadas muitas das vezes na prevenção das pragas sejam elas emergenciais ou pré-emergentes.

A aplicabilidade pode variar conforme a demanda sendo repelir, destruir e prevenir organismos que prejudicam as lavouras. Falando das indústrias de defensivos tem-se mais de 600 formulações de pesticidas classificando-as em sua função, composição e origem. Em relação à escala, os denominados herbicidas são as maiores produções (Patussi e Bundchen, 2012).

Nas unidades de formulação devido as características físicas e suas aplicabilidades as nomenclaturas internacionais que se adotam no Brasil são regidas pelo do MAPA (Ministério da Agricultura e Abastecimento). Os tipos mais comum adotados como exemplos (MAPA, 2004) são: WG grânulos dispersíveis em água tendo como ação uma formação física que facilite sua dosagem e evite a geração de pós no ambiente e contaminações durante a aplicação, (WP) pó molhável sendo um produto micronizado de inúmeros materiais com dispersantes e umectantes com tamanho de partícula controlado e aplicado em formação de calda, (SP) pó solúvel que é um ativo que após a formação da concentração da calda o mesmo é totalmente solúvel no meio, (SC) suspensão concentrada onde o princípio ativo muitas das vezes é parcialmente solúvel em água formando assim um concentrado suspenso, (EC) concentrado emulsionável onde os tensoativos possibilitam formar uma emulsão em contato com em meio aquoso, (CS) suspensão de encapsulado ficando o princípio ativo em pequenas microcápsulas

efetuando a dosagem gradativa durante seu contato com a planta ou inseto, (EW) emulsão de óleo em água, (SE) suspo-emulsão, (FS) suspensão concentrada para tratamento de sementes, nestes sendo necessário a adição de corante entre outros.

Todas as formulações podem ser direcionadas ao campo com dois tipos ou formas de aplicações. Sempre para um produto é formulado, a embalagem contém todas as informações tanto de registro quanto de forma de aplicação.

Os agrônomos são os responsáveis por identificar as pragas existentes e assim para o melhor manejo receitar o defensivo com maior eficácia.

As formulações são classificadas quanto seu uso conforme (MATUO,1990):

- A- Formulação pré-mistura: há a necessidade de diluição à concentração adequada até que seja aplicada;
- B- Formulação de pronto uso: o produto contém a concentração certa para uso direto.

### **3.2 Conceitos de Fluidização**

Para uma compreensão sobre a fluidização, pode-se imaginar a evolução da mesma quando uma pequena vazão de ar, de velocidade " $u_g$ ", escoar entre os espaços vazios de um leito das partículas. Inicialmente ocorrerá apenas o escoamento do ar nos espaços vazios do leito das partículas que permanecerá estático formando um leito fixo.

À medida que ocorre um aumento da vazão de ar ascendente, algumas partículas começarão a se movimentar em regiões restritas do leito e ocorrerá a formação de um leito expandido. Se houver ainda um aumento posterior da velocidade do ar, todas as partículas se tornarão suspensas em um estado similar ao de um fluido, havendo então um comportamento semelhante ao de um líquido em ebulição (FINZER, 1989).

Nesta situação a força de arraste sobre as partículas pelo ar irá contrabalancear o peso das partículas. Neste estado, o leito é considerado fluidizado e a velocidade do ar é

superior à mínima de fluidização,  $u_{mf}$ , conforme a Figura 3.1 (KUNII e LEVENSPIEL, 1991; SUAVE, 2017). O escoamento de partículas em leitos fluidizados pode ser efetuado com diversas sistemáticas. A Figura 3.2 consiste em um sistema em leito fluidizado de bandejas vibradas para promoção do escoamento de partículas, podendo operar o leito no estado fluidizado ou simplesmente deslizante em fase densa (SFREDO, 2006).

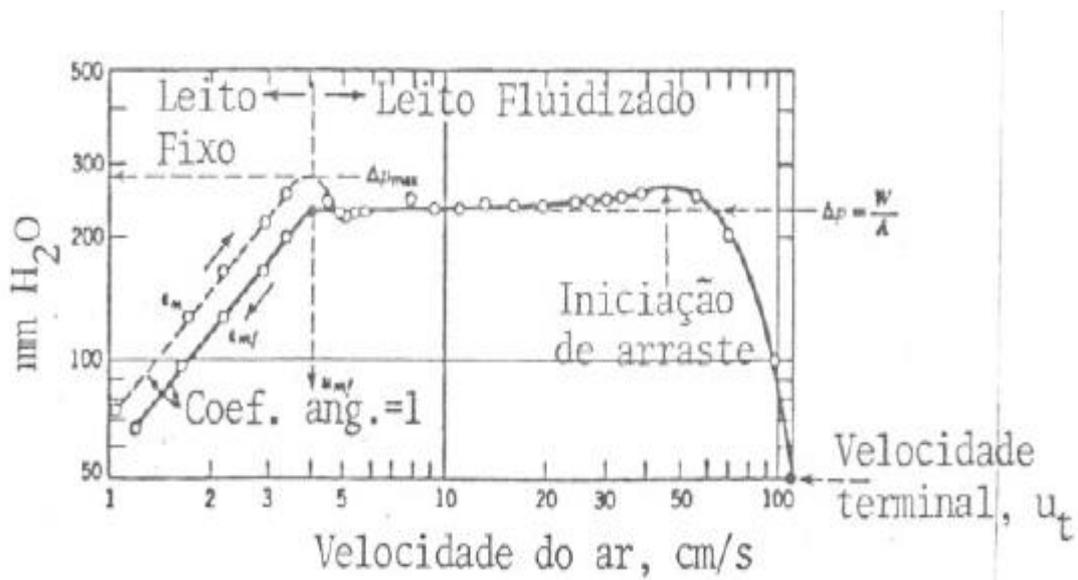


Figura 3.1- Perda de pressão em leito de partículas em função da velocidade superficial do ar. Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

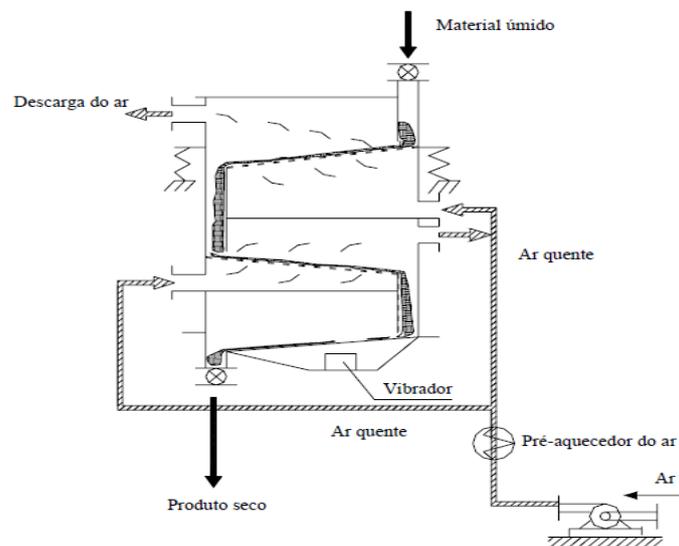


Figura 3.2 – Secador de bandejas vibradas com escoamento cruzado de partículas e ar de secagem  
(ADAPTADO DE KUNII E LEVENSPIEL, 1991).

Diversos tipos de sistemas em leito fluidizado são descritos na literatura e usados industrialmente. A Figura 3.3 consiste no esquema de um secador em leito fluidizado formado por múltiplos compartimentos e o escoamento dos sólidos que formam o leito ocorre por diferença de pressão e ação de força de arrasto sobre as partículas (Kunii e Levenspiel, 1991).

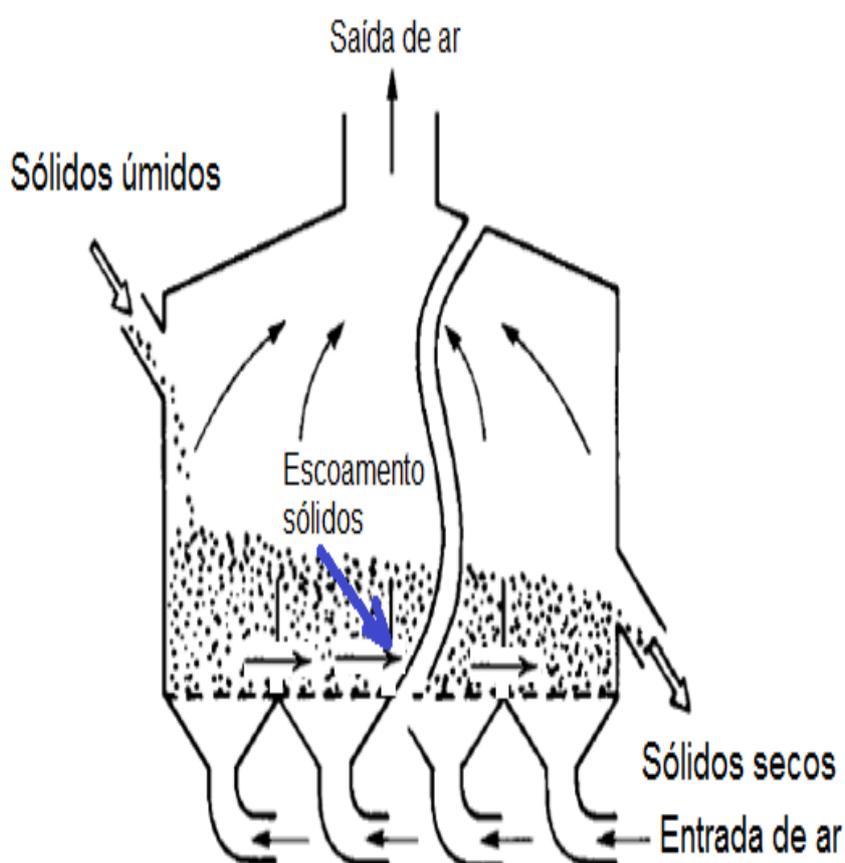


Figura 3.3 – Leito fluidizado em múltiplas Câmaras (Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

Um leito fluidizado com um gás em fase densa assemelha-se muito a um líquido em ebulição e em muitos aspectos exibe um comportamento de líquido. Isso é mostrado na Figura 3.4. Por exemplo, um objeto grande e leve é facilmente deslocado no leito, ao soltar-se, irá aparecer e flutuar na superfície.

Quando o recipiente é inclinado, a superfície superior do leito permanece horizontal, e quando dois leitos estão conectados, seus níveis se igualam. O leito também tem propriedades semelhantes a de líquidos em escoamento. Sólidos jorrarão em um jato de um orifício no lado de um recipiente e pode-se planejar para escoar como um líquido de um vaso para outro (KUNII; LEVENSPIEL, 1991).

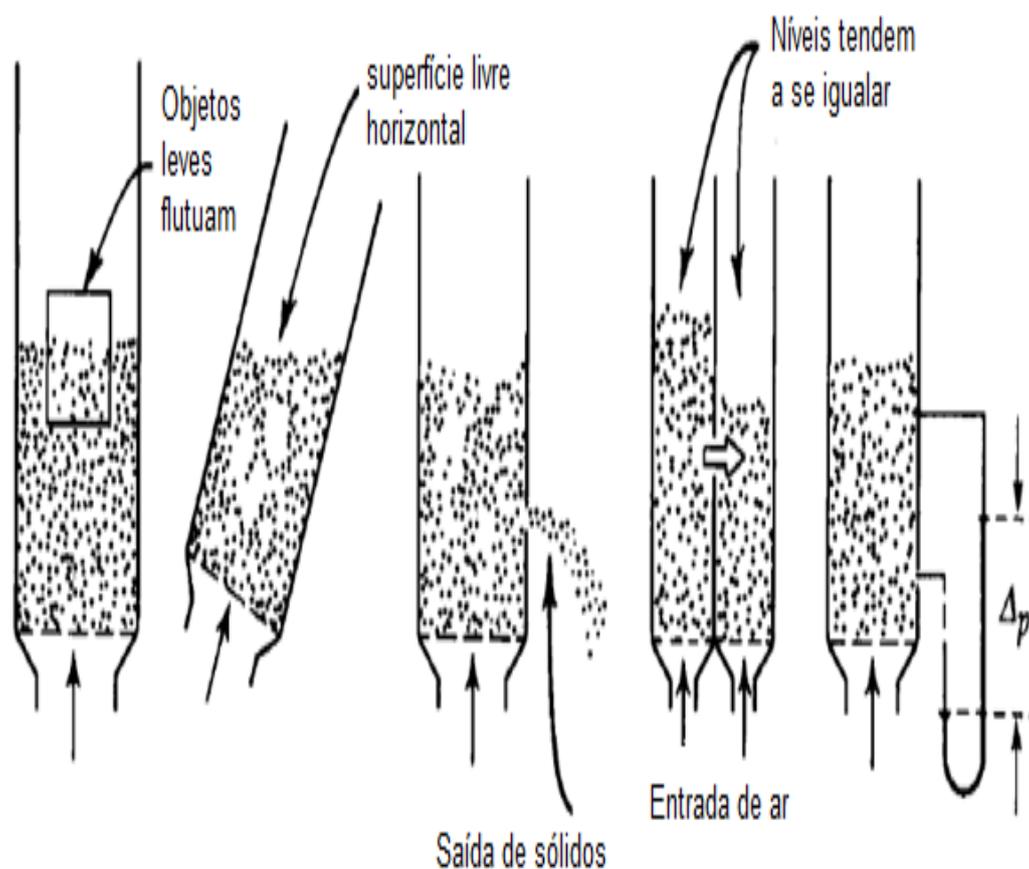


Figura 3.4 - Comportamento do escoamento de partículas em leito fluidizado. (Adaptado de Kunii e Levenspiel, 1991).

No secador em leito fluidizado horizontal as partículas desempenham um papel importante na transferência. É muito utilizado em indústrias: química, farmacêutica, agrícola e produção de alimentos. Comparado com as técnicas tradicionais de secagem, o leito fluidizado tem influência significativa na qualidade do produto final. Isso reflete os intensos efeitos fluidodinâmicos do escoamento gás-sólido no leito fluidizado, resultando em ampla mistura com transferência de calor e massa entre as duas fases.

Modelos baseados na suposição de escoamento pistonado certamente fornecem algumas informações sobre o comportamento da secagem de sólidos, ao longo da direção horizontal de um leito fluidizado. No entanto, o efeito de mistura lateral é negligenciado nos modelos *plug flow*. (CHEN et al., 2017), usaram um equipamento esquematizado na Figura 3.5 para estudar a mistura. O número teórico do tanque pode ser calculado pela Equação (1).

(1)

$$K = \frac{\bar{\tau}^2}{\sigma^2}.$$

$$\bar{\tau} = \frac{\int_0^{\infty} \tau F d\tau}{\int_0^{\infty} F d\tau} \cong \frac{\sum_j \tau_j F_j \Delta\tau_j}{\sum_j F_j \Delta\tau_j},$$

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} \tau^2 d\tau}{\int_0^{\infty} F d\tau} \cong \frac{\sum_j \tau_j^2 F_j \Delta\tau_j}{\sum_j F_j \Delta\tau_j} - \bar{\tau}^2.$$

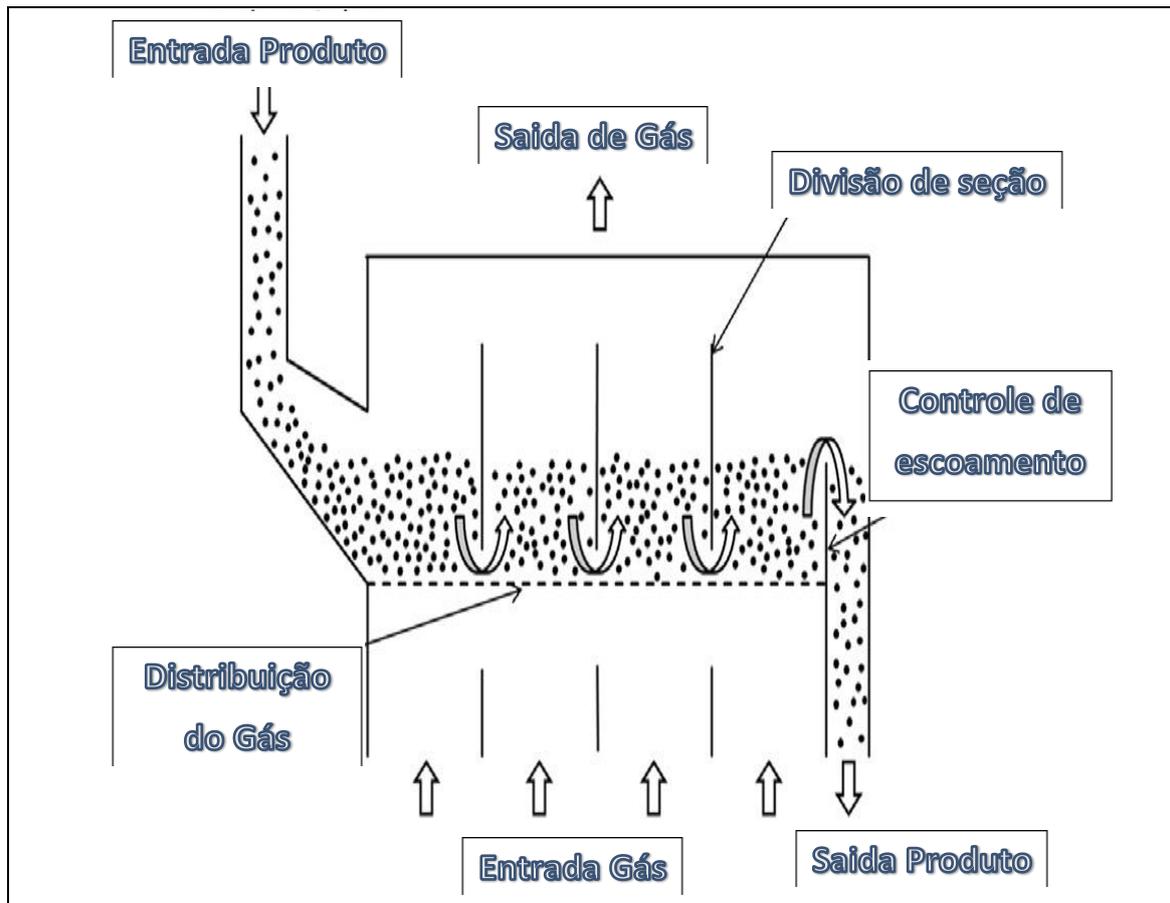


Figura 3.5 - Leito fluidizado horizontal usado no estudo (CHEN et al., 2017).

Um secador de leito-vibro jorrado permite controlar o escoamento dos sólidos no interior do leito operando com velocidade do ar inferior à mínima de jorro. A dispersão das partículas foi estudada em operação do secador (FINZER, 1989). Sendo representado na legenda da Figura 3.6: esquema de um secador de leito vibro-jorrado. A- Soprador centrífugo; B – Controlador de vazão do ar; C- tubulação na chapa galvanizada; D- Medidor de orifício; E- Manômetro; F- Tubulação de cimento amianto; G- Resistência elétrica; H- Transformador de voltagem; I- Termopar; J- Registrador de temperatura; L- Uniformizador de escoamento de ar; M- conexão de borracha; O- Pistão de distribuição de ar; P- Tubo cilíndrico; Q- Vaso de secagem; R- Sistema de vibração; S- Seguidor de mola; T- Motor elétrico; U- Variador eletrônico de velocidade do motor; V- conexões; X- Anteparo de acrílico.

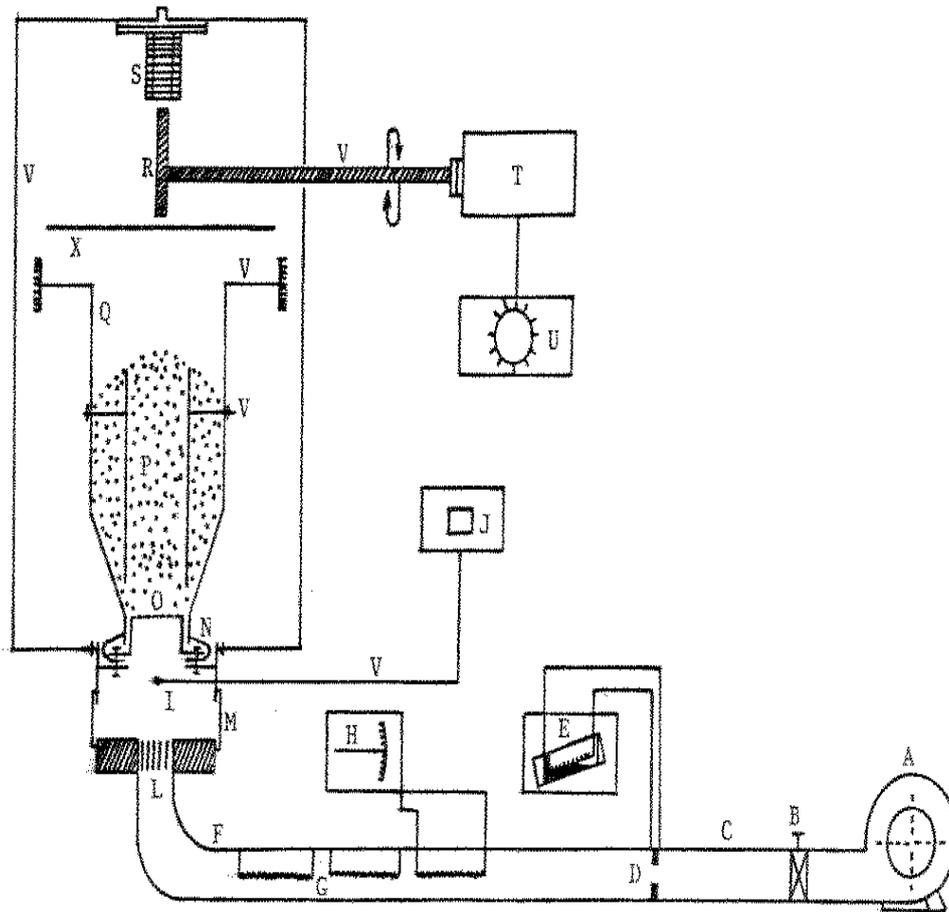


Figura 3.6 - Esquema de um secador de leito vibro-jorrado (FINZER, 1989).

### 3.3 Partículas Porosas : Mecanismo de Migração da Umidade

Um tratamento teórico rigoroso da secagem de sólidos requer o conhecimento dos fatores que afetam o escoamento do líquido e do vapor, sob determinadas condições operacionais (NONHEBEL; MOSS, 1971). As principais formas do transporte da umidade durante a secagem são (STRUMILLO; KUDRA, 1986):

- difusão de líquido: a taxa de transferência de umidade líquida é proporcional ao gradiente de concentração da umidade dentro do sólido;

- difusão de vapor: este é o principal mecanismo de transferência de umidade na forma de vapor no sólido. Isto ocorre em materiais em que a dimensão característica dos poros é maior do que  $10^{-7}$  m;

- difusão térmica: difusão do vapor devido a diferenças na temperatura do sólido;

- efusão ou difusão do tipo Knudsen: esse transporte ocorre quando a dimensão característica dos poros é menor do que  $10^{-7}$  m;

- forças capilares: uma diferença de pressão capilar, causada pelos capilares com vários raios, provoca uma contínua redistribuição da umidade, migrando dos mais amplos para os mais estreitos por sucção capilar, e

- gradiente de pressão: uma diferença na pressão interna, causada por uma evaporação local do líquido ou por uma condensação local do vapor, provoca o movimento da umidade para igualar as pressões. Este movimento ocorre de acordo com a lei de Darcy.

Além desses mecanismos de transporte de umidade, ocorrem, em determinados casos, o transporte devido à termodifusão, à aceleração da gravidade e à pressão interna causada pelo encolhimento ou pressão externa (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A Figura 3.7 mostra, esquematicamente, a diversidade de efeitos possíveis em um determinado poro cilíndrico.

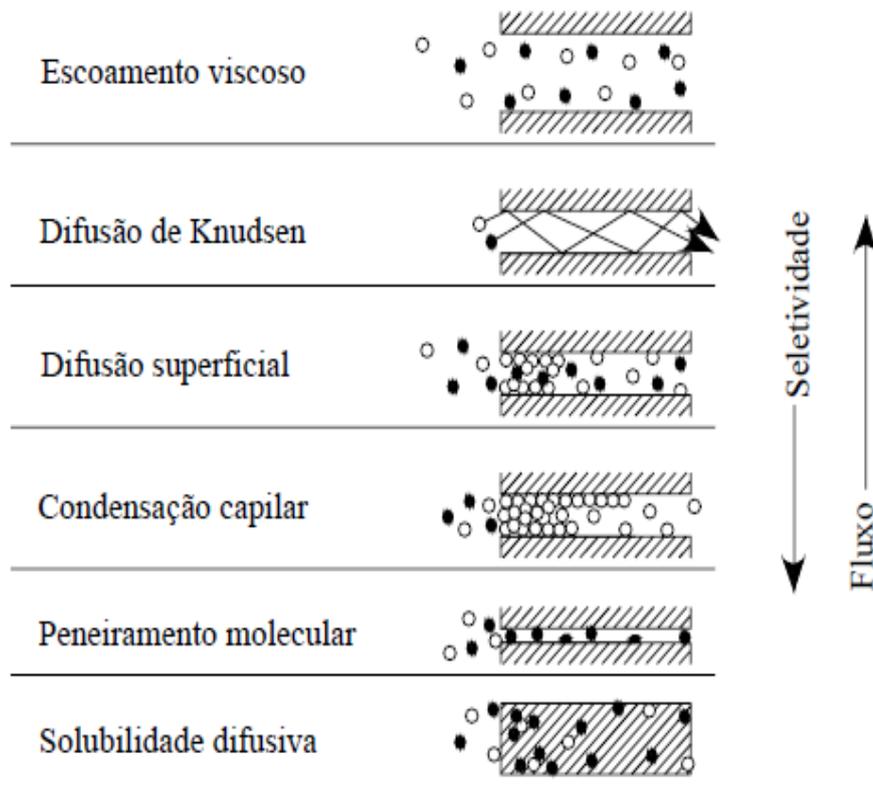


Figura 3.7 - Efeitos da difusão em poros (SFREDO, 2006).

### 3.4 Conceitos de Secagem e Classificação de Mecanismo na Fluidização de Partículas

A secagem trata da remoção de substâncias voláteis de um sólido transformando-as em vapor. Muitos secadores utilizam a técnica de aquecimento convectivo, na qual o ar consiste na fonte de calor para o material processado e de veículo de transporte da umidade eliminada.

O conteúdo de umidade de um material em base seca, ( $X$ ) é definido pelo quociente entre a massa de umidade contida no mesmo pela massa do material completamente desidratado. Às vezes é conveniente quantificar o conteúdo de umidade em base úmida ( $W$ ), que consiste no quociente entre a massa de umidade contida no material pela massa total do material úmido.

Outros estudos levaram a várias modificações e refinamentos propostos. A classificação de Geldart (Kunii; Levenspiel, 1991) classifica os sistemas em quatro classes dependendo das dimensões das partículas e diferença de densidade das mesmas e do gás de fluidização.

Por exemplo, uma classificação AC (intermediária) para partículas na região de transição incerta entre os sólidos de A e C de Geldart. Estes sólidos escoam bem quando fluidizados (influência do tipo A), mas eles permanentemente desfluidizam em qualquer superfície horizontal e assim obstruem as tubulações horizontais (influência do tipo C).

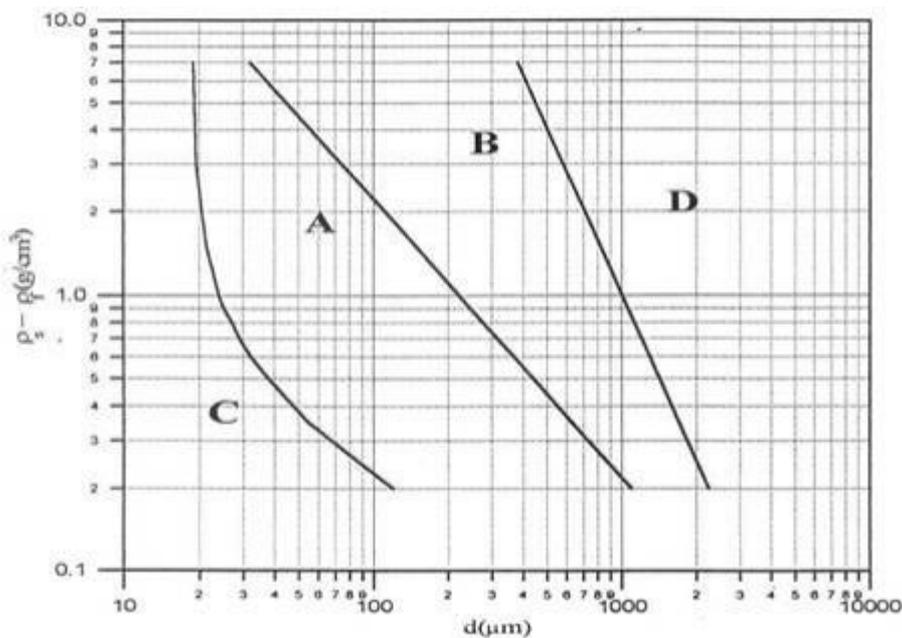


Figura 3.8 - Gráfico de Geldart (Geldart, 1986)

Os leitos fluidizados em fluxos moderados de gás,  $u < 10 u_{mf}$  possuem comportamento com partículas contidas no leito. Em escoamento com maiores velocidades de gás, mais e mais partículas são projetadas acima do nível do leito, algumas retornam, outras são levadas para fora do leito.

A superfície do leito torna-se agitada e nebulosa. Este é o leito fluidizado turbulento. Em velocidades de gás ainda mais altas, aumenta a densidade de partículas

no topo do leito, e o transporte de sólidos torna-se alto. Este é o leito fluidizado rápido (KUNII e LEVENSPIEL, 1991).

Normalmente a distribuição do tempo de residência das partículas no secador é determinada usando o método estímulo-resposta. O estímulo corresponde à alimentação das partículas marcadas no secador, enquanto a resposta trata do registro do tempo de saída das partículas. A distribuição do tempo de residência do material no equipamento é descrita pela função  $F(t)$ , que representa a fração em peso do material que permanece no equipamento por um intervalo de tempo  $\leq t$ .

Na Figura 8 são esquematizados gráficos da função  $F(t/t_m)$ , onde  $t_m$  é o tempo de residência médio das partículas no leito. Na Figura 3.9 as curvas representam: a- escoamento pistonado; b- baixo grau de mistura; c- mistura ideal; d- parte do material permanece por longo tempo em regiões estranhas do equipamento.

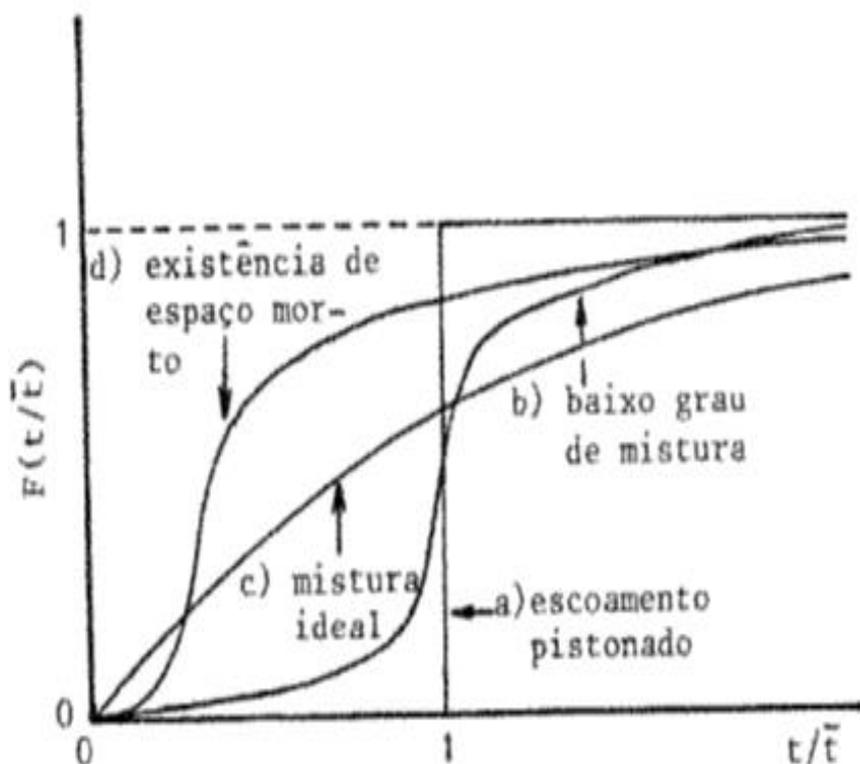


Figura 3.9 - Função  $F(t/t_m)$  Diferentes modelos de escoamento dos sólidos (Kunii e Levenspiel, 1991).

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Unidade Industrial de Formulação WP e WG**

A instalação industrial na unidade de formulação é multi propósito podendo realizar tanto formulações WP (pó molhável, formulação física em pós onde o ativo é micronizado junto aos tensoativos para futura aplicação em formação de calda) quando WG (Grânulos dispersíveis em água, sendo a formação física do pó após sofrer as etapas de extrusão e secagem), a nomenclatura inglesa já está difundida entre fabricantes e usuários. O estudo se dará com foco na unidade WG nas etapas extrusão / secagem. A Figura 4.1 consiste em uma imagem da unidade de pós-granulados da Ourofino-Uberaba-MG

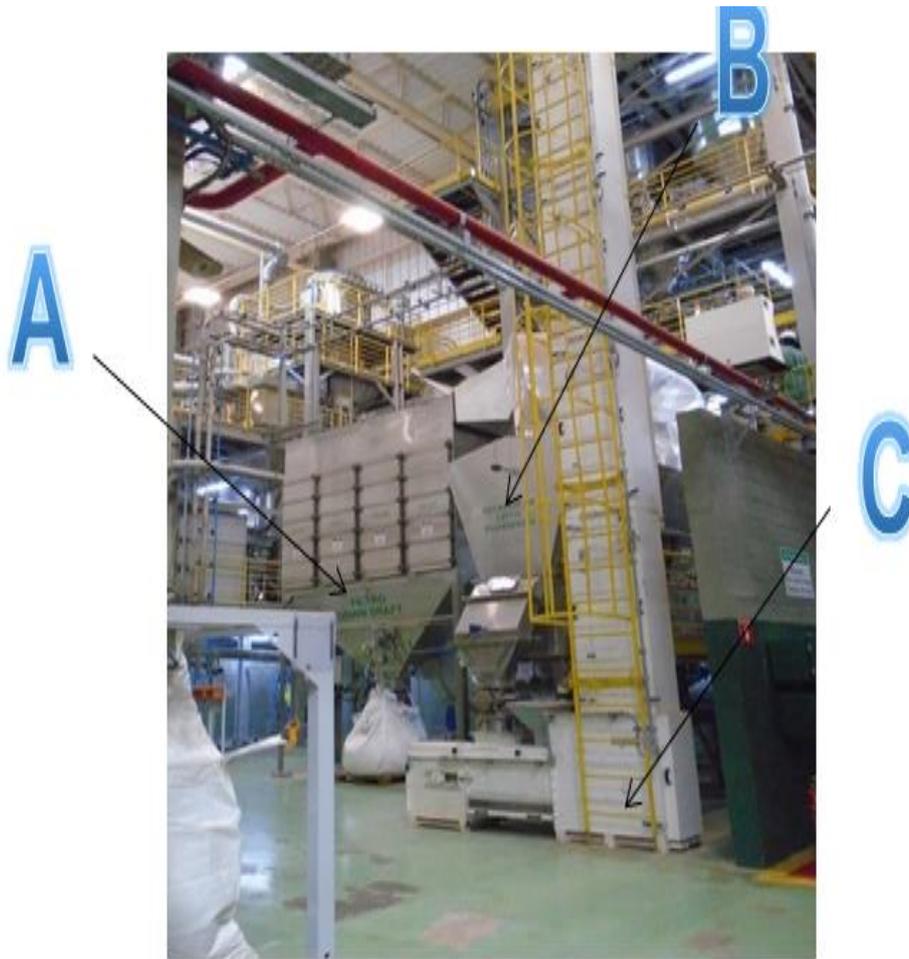


Figura 4.1 - Foto da unidade de pós-granulados herbicida WDG: A - Sistema de Cartuchos de filtros possibilitando retirada dos particulados “finos” arrastados pelo ar de secagem; B – Secador de Leito Fluidizado; C – Elevador de canecas. (Autor, 2020).

#### 4.2 Descrição do Processo

A unidade de granulados herbicida é composta por dois silos de armazenagem em aço inox 316 sem sistema de agitação. Tem a capacidade de 5,0 toneladas, condicionado com sistema de exaustão e transporte pneumático.

Aterramento em toda a unidade devido a utilização de materiais que são altamente explosivos e/ou inflamáveis, assim denominou a unidade como EX Classificação de segurança a prova de explosão. O material fica separado por lote de fabricação do qual foi previamente realizada uma mistura e micronização. Posteriormente, é dosado por uma válvula dosadora e transportado por rosca sem fim. Nesta etapa o produto está em

fase de acabamento, ou seja, ainda em processo de formação física, porém quimicamente já finalizado. O material em pó, após a armazenagem, passa por uma etapa de umidificação com adição de uma solução umectante ou até mesmo água para facilitar a fluidez e a extrusão. O estudo atual se dará após a umidificação e é representado no fluxograma (Figura 4.2).

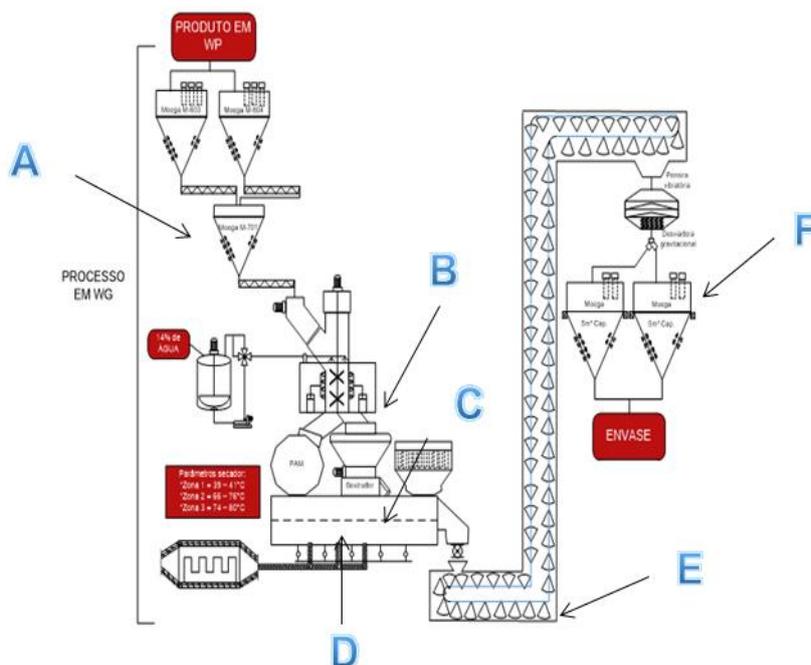


Figura 4.2 - Fluxograma de formulação geral herbicida granulado: A- Silos de armazenagem, B- Flexomix (umectação do produto), C- Extrusão dos grânulos, D- Secador, E- Elevador de canecas e F- Peneira classificatória. (Autor, 2020)

### 4.3 Projeto da Unidade WG

Durante a fase de desenvolvimento do projeto, foi um desafio muito grande colocar-se as duas unidades multi propósitos, ou seja, poder realizar tecnologias independentes e distintas sem a necessidade de alterações dos instrumentos. Hoje um dos grandes vilões de produtividade são os *Setups* e assim quando se padroniza uma unidade da qual ela pode alterar sua tecnologia de processo sem *setup* tem-se um grande ganho na performance da unidade.

Para que não se tenha o tempo perdido de troca na unidade utiliza-se a unidade como multi propósito. Na empresa em estudo já existe a unidade WP, que realiza a

mistura dos ativos e inertes para posterior micronização /moagem. Operando o processo anterior de formulação em característica única de micronização / moagem, e outra com as duas unidades em conjunto formulando a base inicial micronizada e em seguida a etapa de extrusão/secagem (Conforme Figura 4.3 ).

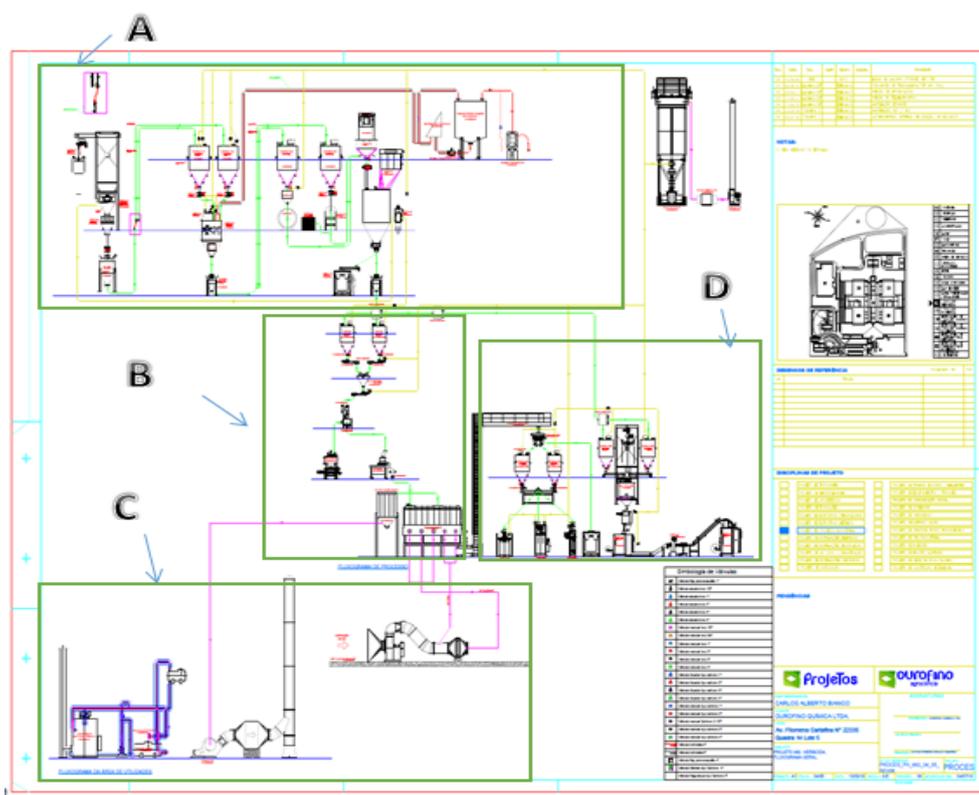


Figura 4.3 – Fluxograma do projeto do herbicida granulado, onde A – Etapa de formulação WP, B- Etapa de extrusão e secagem (WG), C – Utilidades, D – Armazenagem e envase. (AUTOR, 2020).

#### 4.4 Supervisório de automação e controle do sistema de formulação

A unidade possui um sistema de controle onde o operador pode acessar qualquer etapa antes e durante o processo. Os parâmetros são padronizados durante o *startup* dos produtos, e assim, somente pequenos ajustes devido às características físicas do produto podem se alterar. A tela de comando foi projetada e construída pela empresa de instrumentação *Dynamic Ar* (ver a Figura 4.4).

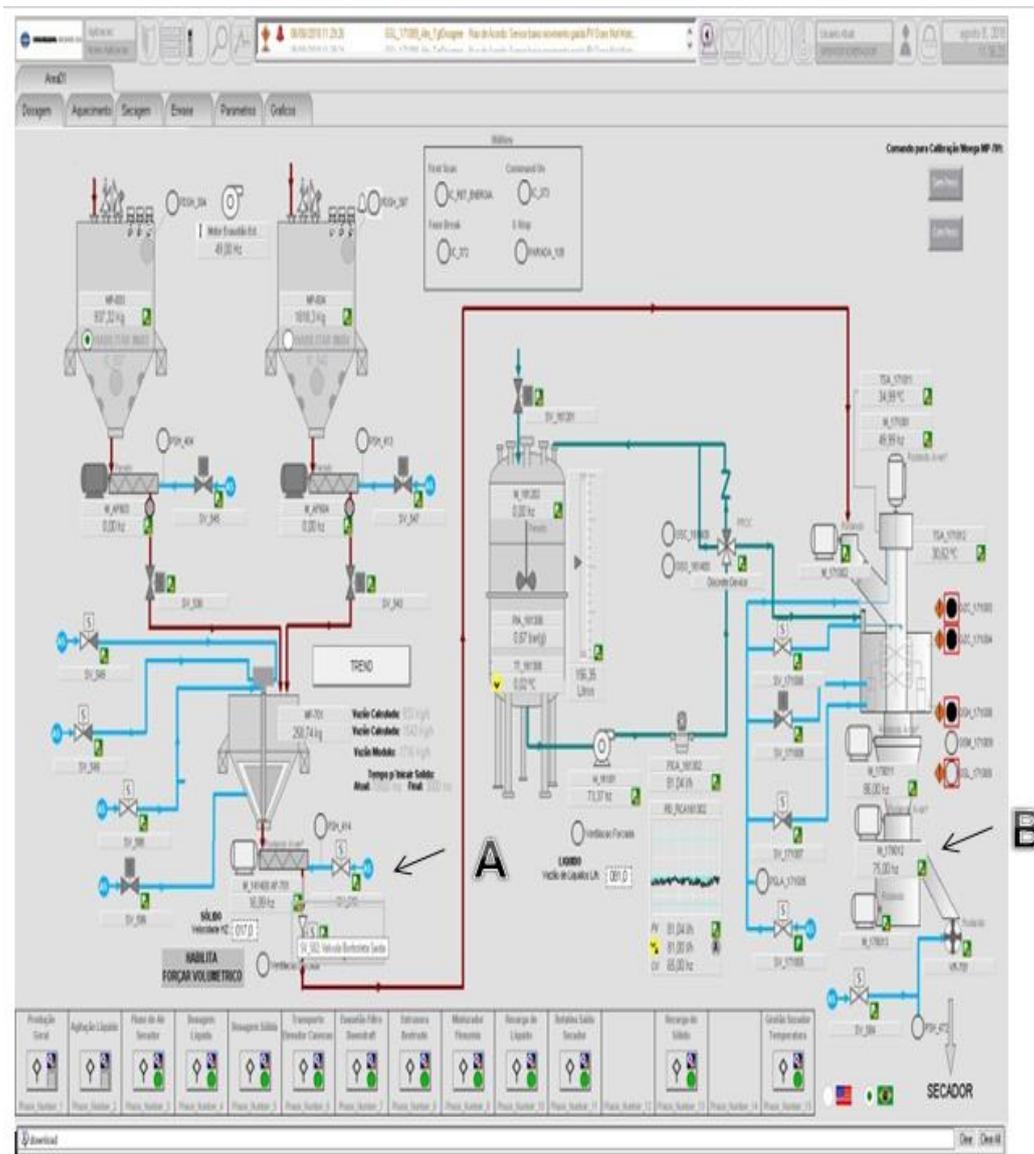


Figura 4.4 – Supervisório granulado herbicida – Tela de controle da umectação / extrusão: A- Instrumentação de adição da água, B- Instrumentação de extrusão / granulação. (AUTOR, 2020).

O instrumento do estudo atual tem uma malha de controle mais extensa podendo assim ser validado um parâmetro com maior precisão. Após os controles já estabelecidos o operador realiza o monitoramento *online* do processo via tela de comando. Nela ficam expressos os dados do ar aquecido em escoamento, temperatura superior e inferior de cada câmara, pressão interna do secador, abertura das canas de entrada nos leitos, controle do tempo de retenção de material, temperatura do fluido de aquecimento, controle das câmaras de resfriamento, elevador de canecas e pressão de ar interno das câmaras (ver a Figura 4.5).



Têm-se as etapas que antecedem a umectação com telas de comando (Figura 4.6), e pós-secagem constituindo em transporte / peneira classificatória / armazenagem silos e envase. Para detalhamento de dados o sistema emite gráficos *online* dos parâmetros podendo os operadores verificar caso haja desvios .

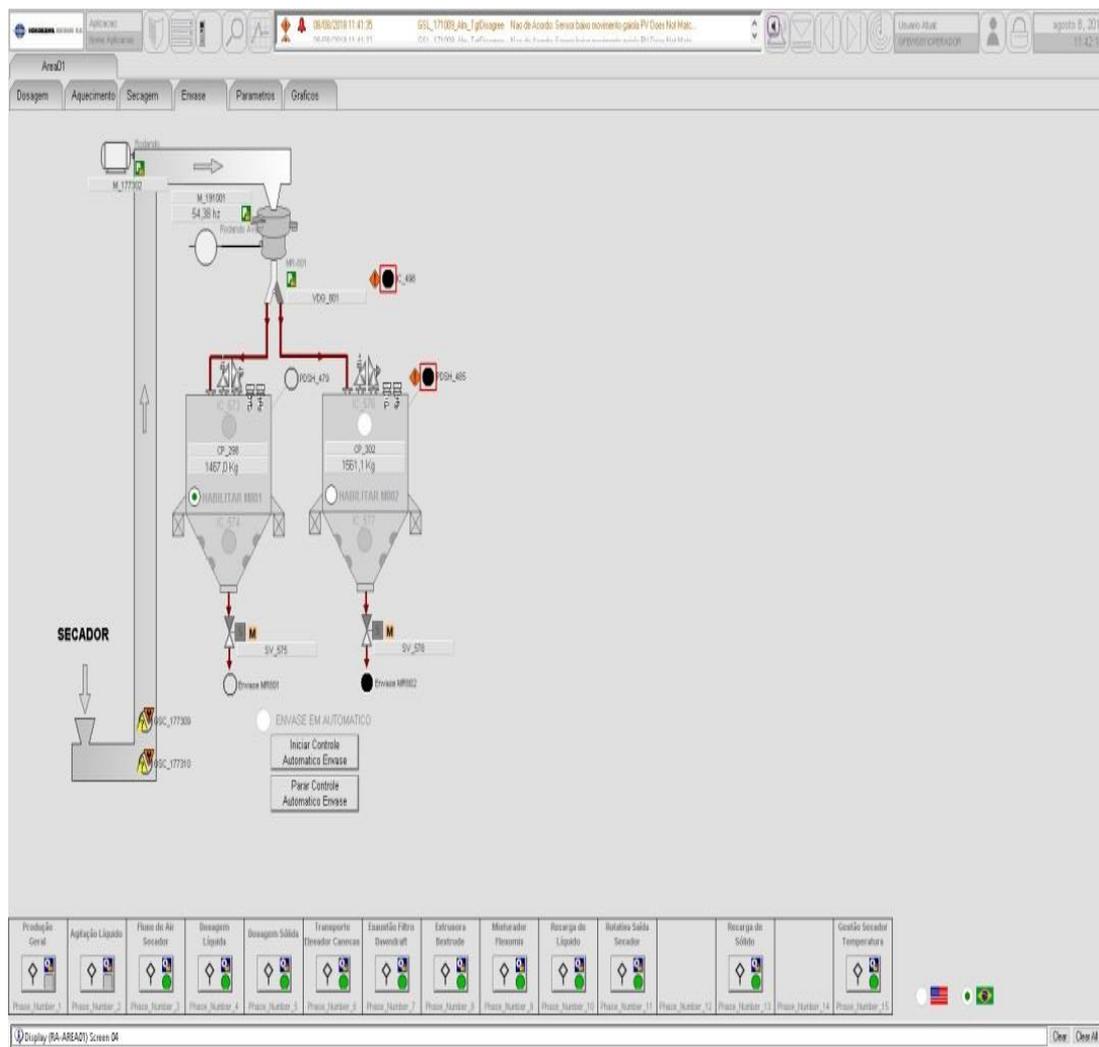


Figura 4.6 - Tela de supervisão Envase. . (Autor, 2020)

#### 4.5 Etapas de Moagem / Extrusão

O sistema de moagem e extrusão é composto por:

a) Moega de aço inox para armazenagem e transferência com fundo cônico, tendo em suas extremidades inferiores, um sistema de pulso *Vibrajet*.

Proporciona um melhor escoamento e padroniza a adição do material de forma uniforme e contínua. A mesma não prejudica a performance da unidade. Fabricante: *Dynamic Air* (Figura 4.7), com capacidade para 5 ton.



Figura 4.7 - Moegas de Armazenagem / transferência. (Autor, 2020)

b) Rosca dosadora com dupla dosagem em paralelo ou série. Sistema de automação para descarga de material continuamente em silos independentes com capacidade de 1500 kg/h. Todo o equipamento tem controle via supervisor e é composto por rosca sem fim em formato helicoidal Fabricante Hosokawa, conforme (Figura 4.8).



Figura 4.8 - Visão superior Roscas dosadoras de pós para extrusão automatizadas. (Autor, 2020)

c) Tanque de Adição de fluidos sejam eles base água e/ou tensoativos. Tanque de inox com sistema de dosagem via bomba centrífuga, possui na base balança gravimétrica, agitador com eixo de pás e sistema de exaustão. Sua capacidade nominal é de 200 l e útil de 190 l. Fabricante: Dyanmic Air. O tanque tem controle de temperatura para caso seja necessário adição de fluidos aquecidos e também um sistema de vazão via supervisor. Toda automação é feita operacionalmente com uma receita estabelecida e manipulada pela tela de supervisão. O tanque fica posicionado ao lado da extrusão facilitando assim o processo de acondicionamento e operação. Sua capacidade foi dimensionada com intuito de atingir os volumes desejados da capacidade produtiva

levando em consideração a performance da secagem na extrusora, ver imagem na Figura 4.9



Figura 4.9 - Tanque dosador de fluido. (Autor, 2020).

d) Flexomix FXD-160 consiste em um equipamento do qual recebe o pó após a micronização e armazenagem, sendo alimentado através de uma rosca dosadora.

Depois de realizada a equalização do sistema de dosagem, o equipamento com auxílio de amassadores internos, realiza uma perfeita mistura do pó e fluido necessária para umectação. O controle de umidade no material produto é de aproximadamente 8 a 9% m/m. A capacidade de produção é de  $1500 \text{ kg.h}^{-1}$  (Fabricante: Hosokawa). Representado da Figura 4.10 a seguir.



Figura 4.10 - Flexomix FXD 160. (Autor, 2020).

Extrusora Bextruder ABX 450 acoplada na parte inferior do Flexomix, recebendo o material já umectado e transformando fisicamente em formato de pellets ou grânulos conforme descrito nas indústrias de defensivos.

O equipamento tem uma cuba receptora de aproximadamente capacidade 10 kg com pás internas movimentadoras em aço inox e inclinação de 45° pressionando o produto em direção à tela perfurada. Conforme indicam as Figuras 4.11 – Extrusora em atividade de produção, 4.12 – Tela de extrusão com orifícios circulares de 2 mm de diâmetro e 4.13 – Visão lateral do equipamento. Fabricante: HOSOKAWA com capacidade de 1500 kg/h.



Figura 4.11 - Extrusora Bextruder. (Autor, 2020).

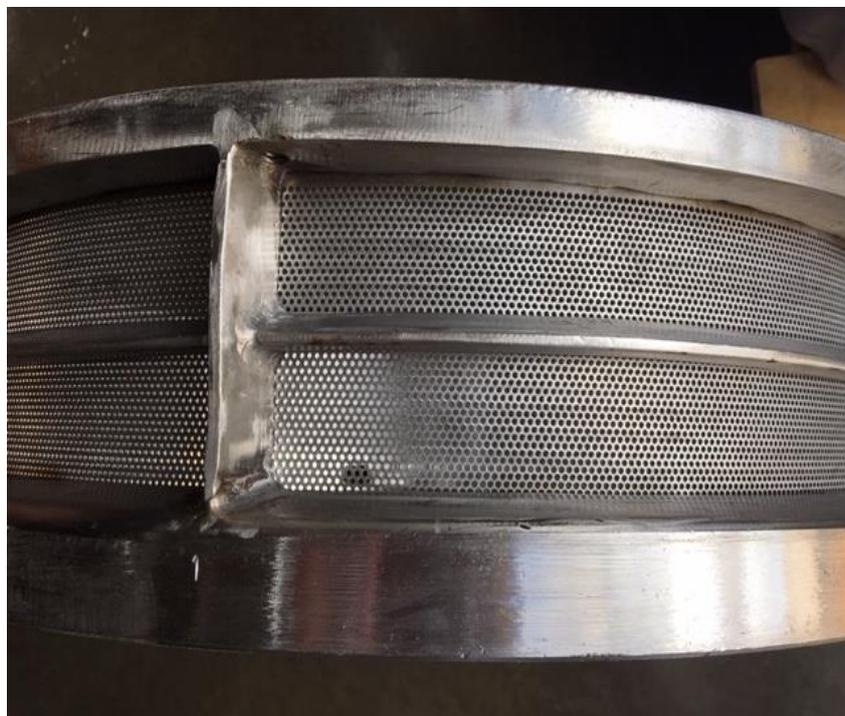


Figura 4.12 - Tela perfurada. (Autor, 2020)



Figura 4.13 - Visão lateral do equipamento extrusora. (Autor, 2020).

#### 4.6 Secador em leito Fluidizado

O secador de Leito Fluidizado possui sistema de coleta dos particulados finos na parte superior, entrada de gases com tubulações independentes por câmara, no aquecimento ou para resfriamento. As dimensões principais do secador de leito fluidizado são: comprimento de 6 m e altura de 2,5 m. A saída do sistema contém controle por válvula rotativa influenciando no tempo de residência do fluido e dos sólidos, sistema de sustentação com pontos de drenagem na parte inferior facilitando limpeza conforme indica a Figura 4.14 e a Figura 4.15 e filtro de mangas coletor de particulados transportados pela força de arrasto do ar de secagem. .



Figura 4.14 - Secador de leito fluidizado, constituído por cinco câmaras (Autor, 2020).



Figura 4.15 – Filtro coletor de particulados. (Autor, 2020).

O processo de secagem consiste em parâmetros estabelecidos pela modelagem do fornecedor e adequações para comissionamento da unidade.

A temperatura ambiente influencia diretamente nos parâmetros do ar que realiza a fluidização durante o processo mesmo nas câmaras mais aquecidas quanto nas de resfriamento.

A temperatura média de nossa região durante o estudo esteve na média entre 27,9°C. O ar é recolhido da atmosfera e através de um queimador com óleo BPF (baixo ponto de fulgor) com temperatura de 125,1 °C. O ar é controlado nas câmaras com a temperatura de 76,3°C na câmara 01, 53,6 °C na câmara 02, 64 °C na câmara 03, 35 °C na câmara 04 e 32 °C na câmara 05. A vazão do ar de secagem admitida no secador é de 6.480 m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>.

*Dados Operacionais do turno A - 06:00 às 14:00 (produto WDG) - Secagem*

HORA	06:00:00	07:00:00	08:00:00	09:00:00	10:00:00	11:00:00	12:00:00	13:00:00	14:00:00	Média/turno
<b>Vazão m<sup>3</sup>/h</b>	6304	6256	6380	6540	6490	6520	6480	6495	6390	<b>6480</b>
<b>C° BPF</b>	124,8	125,7	124,6	125,1	125	125,6	124,9	125,1	125,3	<b>125,1</b>
<b>C° AMB</b>	22,5	25,5	26,8	27,1	27,9	31,1	31,2	32,1	32,5	<b>27,9</b>
<b>Kg/h WDG</b>	1504	1556	1590	1540	1500	1550	1540	1550	1560	<b>1550</b>

Figura 4.16 - Dados extraídos do sistema durante o turno. ( Autor, 2020).

A parte interior do secador é constituída por 5 câmaras em chapa de aço inox 304 com medida interna entre as paredes (largura) 90 cm na parte superior, 70 cm na inferior e 15 cm disponibilizando espaço entre a tela de distribuição do ar e que (C na Figura 4.16), também, constitui o suporte do leito, até a parte inferior das divisões. O distanciamento entre chapas divisórias das seções é de 50 cm, conforme mostram as Figuras 4. 17/18/19 e 20.

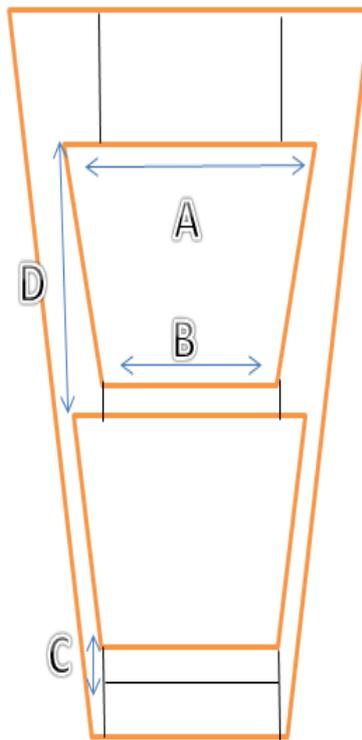


Figura 4.17 - Esquema do interior do secador com descrição de dimensões, A- Superior, B – Inferior, C- Elevação e D – Separação entre etapas. (Autor, 2020).

**A****B**

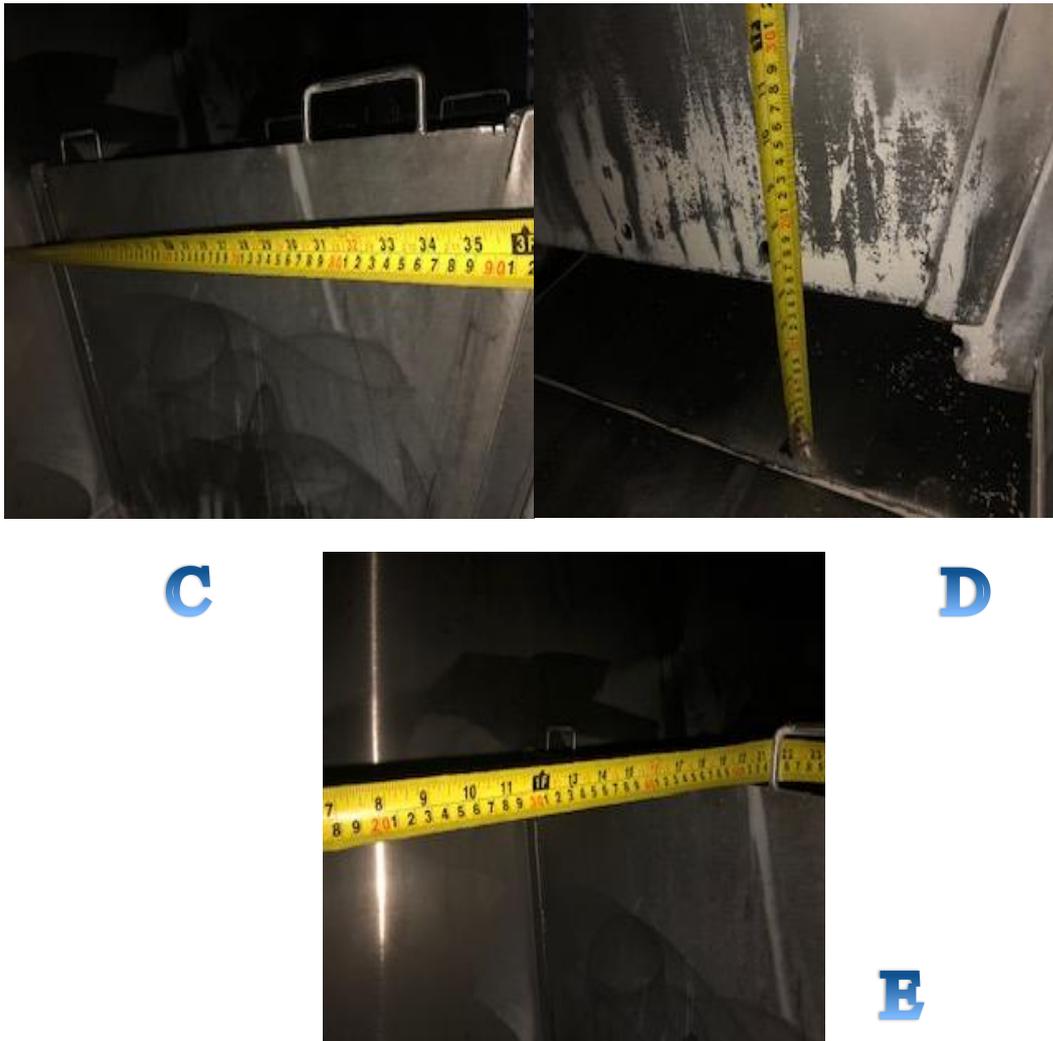


Figura 4.18 - Imagens internas do Secador e suas etapas. Onde A- Visão interna do secador demonstrando as divisões , B- Medida da parte inferior das chapas de separação das câmaras, C- Medida da parte superior das chapas de separação das câmaras, D- Espaço entre a chapa e o fundo do secador e E- medida interna entre as chapas. (Autor, 2020).



Figura 4.19 - Leito fluidizado industrial constituído por multi-câmaras, portas laterais de inspeção acesso.(Autor, 2020).



Figura 4.20 - Visão interna da Câmara demonstrando leito e passagem entre as placas e aberturas abaixo das divisórias. (Autor, 2020).

#### 4.7 Sistema de controle e aquecimento

No secador tem-se a ação de aquecimento e resfriamento, mantendo parâmetros rígidos de controle via automação. Na seção de resfriamento, um sistema externo coleta o ar atmosférico e o direciona via tubulação nas duas últimas câmaras, o que promove o resfriamento dos grânulos. Após os grânulos perderem umidade durante seu tempo de residência no leito fluidizado, a sua temperatura é reduzida por contato com ar frio em escoamento. É extremamente necessária esta etapa devido o produto possuir restrições de armazenagem em temperatura acima da ambiente, propiciando seu compactamento no silo de estocagem, aglomeração dos grânulos, deformações, entupimentos e absorção de umidade. A Figura 4.21 consiste em um filtro Absoluto usados na descarga do ar para atmosfera.



Figura 4.21 - Sistema de coleta e saída do ar atmosférico. (Autor, 2020).

Já no sistema de aquecimento as zonas são aquecidas conforme o controle pré-estabelecido para cada formulação. Utiliza-se um processo com a queima do gás GLP para elevar e manter a temperatura de processamento do óleo BPF. A temperatura desejada poderá ser ajustada via equipamentos de supervisão. Com um sistema de sucção o ar atmosférico é coletado e passa pelo aquecedor. O ar aquecido é direcionado para as câmaras do secador atuando como sistema de troca térmica e transporte da umidade dos grânulos. A Figura 4.22 mostra termostatos de controle instalados na câmara. A Figura 4.23 consiste no sistema de armazenagem do BPF e queimador; a Figura 4.24 mostra o sistema de armazenagem do GLP.



Figura 4.22 - Controles de automação Termostatos na parte superior e inferior das câmaras (Autor, 2020).



Figura 4.23 - Sistema de Armazenagem de fluido térmico BPF e queimador. (Autor, 2020).



Figura 4.24 - Estação de fornecimento do gás GLP (Autor, 2020).

#### 4.8 Transportes e Classificação

Após a secagem, os grânulos são utilizando-se os Elevadores de Canecas MODELO: EZ220, fabricante Dynamic, com capacidade para 3000 kg/h conforme a Figura 4.25.



Figura 4.25 - Elevador de canecas. (Autor, 2020).

Depois de o material ser transportado no elevador, passa por um sistema de classificação dos grânulos, que proporciona um produto homogêneo. Para esta etapa utiliza-se uma peneira classificatória circular com diâmetro de 1,5 m, área de peneiramento 1,76 m<sup>2</sup>, que através do movimento vibrado do leito ela separa na tela com abertura dos orifícios de 4,5 mm os grânulos fora de especificação e que apresentam deformações *oversize*, sendo direcionados para etapa de moagem e retorno ao classificador. O produto acabado é depositado em um silo de envase. A Figura 4.26 consiste na imagem da Peneira classificatória / Vibratória MODELO: 1200-3S fabricante Dynamic. O sistema vibratório atua na frequência de 40 Hertz e amplitude de 500 mm.



Figura 4.26 - Peneira vibratória (Autor, 2020).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Determinação do Tamanho dos Grânulos

Nas empresas de defensivos utiliza-se um equipamento denominado Granulômetro que fornece as dimensões dos tamanhos de partículas insolúveis com parâmetros de D50 ( 50% de uma população de partículas com diâmetro menor do que D50), D90 ( 90% de uma população de partículas com diâmetro menor que D90) e D10 ( 10% de uma população de partículas com diâmetro menor do que D10). Para segurança o material deve passar pela avaliação de sua FISPQ (*Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos*).

Após a secagem foram coletadas 50 amostras de grânulos das quais foram determinadas em triplicata, comprimento e diâmetro. O procedimento foi realizado com auxílio de um paquímetro digital Marca Mitutoyo Absolute AQS Digimatic, Figura 5.1. Foram obtidos os dados da Tabela 5.1.

Nesta tabela estão os três resultados encontrados de todas as 50 amostras coletadas.



Figura 5.1 - Paquímetro utilizado para medição do tamanho das partículas (Autor, 2020).

Tabela 5.1 -- Resultados referentes do tamanho das partículas em milímetros. (Autor, 2020).

Avaliação das dimensões iniciais das partículas de WG																									
Nº da Partícula	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
Comprimento 1	2,87	3,49	2,39	2,14	2,83	2,67	1,88	2,49	2,88	3,08	2,85	1,86	1,88	3,73	2,90	3,64	3,02	3,30	2,19	3,26	2,74	3,72	2,28	2,90	4,62
Comprimento 2	2,87	3,48	2,39	2,14	2,83	2,67	1,88	2,49	2,89	3,08	2,85	1,87	1,88	3,73	2,89	3,64	3,02	3,31	2,19	3,26	2,73	3,72	2,28	2,90	4,62
Comprimento 3	2,88	3,49	2,40	2,14	2,84	2,68	1,87	2,49	2,88	3,08	2,85	1,86	1,89	3,74	2,89	3,66	3,01	3,30	2,20	3,27	2,74	3,72	2,29	2,91	4,61
Diametro 1	0,98	0,99	0,97	0,97	0,98	1,00	0,99	0,96	0,99	0,96	0,98	0,98	1,01	0,96	0,97	1,00	0,97	0,98	1,02	0,95	0,94	0,99	0,94	0,96	1,00
Diametro 2	0,97	0,99	0,97	0,97	0,98	1,00	0,98	0,96	0,99	0,96	0,97	1,00	1,00	0,97	0,97	1,00	0,97	0,99	1,02	0,95	0,94	1,00	0,94	0,97	1,00
Diametro 3	0,97	0,99	0,96	0,97	0,98	1,00	0,98	0,96	0,99	0,96	0,98	1,00	1,00	0,96	0,98	1,00	0,97	0,98	1,02	0,95	0,95	1,00	0,95	0,96	1,00
Média Comprimento	2,87	3,49	2,39	2,14	2,83	2,67	1,88	2,49	2,88	3,08	2,85	1,86	1,88	3,73	2,89	3,65	3,02	3,30	2,19	3,26	2,74	3,72	2,28	2,90	4,62
Média Diametro	0,97	0,99	0,97	0,97	0,98	1,00	0,98	0,96	0,99	0,96	0,98	0,99	1,00	0,96	0,97	1,00	0,97	0,98	1,02	0,95	0,94	1,00	0,94	0,96	1,00
Nº da Partícula	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Comprimento 1	3,96	3,49	4,22	2,50	3,05	2,32	3,26	2,18	3,44	3,55	2,34	3,06	3,87	2,63	3,27	3,02	3,84	2,41	5,57	3,99	4,40	2,73	2,08	2,89	2,16
Comprimento 2	3,97	3,49	4,21	2,51	3,05	2,33	3,26	2,18	3,45	3,54	2,34	3,06	3,86	2,63	3,27	3,02	3,84	2,41	5,59	3,95	4,37	2,72	2,08	2,89	2,16
Comprimento 3	3,96	3,50	4,24	2,50	3,06	0,33	3,27	2,17	3,44	3,54	2,34	3,05	3,87	2,63	3,27	3,04	3,82	2,39	5,59	3,98	4,39	2,73	2,06	2,88	2,19
Diametro 1	0,94	0,93	0,98	1,01	0,96	0,97	0,99	1,01	0,95	0,97	0,97	0,94	0,96	0,98	0,98	1,00	0,99	1,00	1,00	0,97	0,99	0,99	0,99	0,98	0,98
Diametro 2	0,94	0,94	0,98	1,00	0,96	0,98	0,99	1,01	0,95	0,97	0,97	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00	0,99	1,00	0,99	0,98	0,98	1,00	0,98	0,98	0,97
Diametro 3	0,95	0,94	0,98	1,01	0,97	0,98	0,99	1,00	0,96	0,96	0,96	0,95	0,97	0,99	0,99	1,01	0,99	0,99	1,00	0,97	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97
Média Comprimento	3,96	3,49	4,22	2,50	3,05	1,66	3,26	2,18	3,44	3,54	2,34	3,06	3,87	2,63	3,27	3,03	3,83	2,40	5,58	3,97	4,39	2,73	2,07	2,89	2,17
Média Diametro	0,94	0,94	0,98	1,01	0,96	0,98	0,99	1,01	0,95	0,97	0,97	0,94	0,96	0,98	0,99	1,00	0,99	1,00	1,00	0,97	0,98	0,99	0,98	0,98	0,97

$$DP = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - M_A)^2}{n}}$$

sendo:

$\Sigma$ : símbolo de somatório.

xi: valor na posição i no conjunto de dados;

MA: média aritmética das medidas;

n: quantidade de medidas.

Os resultados dos desvios padrões foram:

DP Diâmetro : 0,01993 mm

DP Comprimento: 0.63712 mm

O que mostra maior dispersão nos comprimentos que no diâmetro, resultado coerente, pois o diâmetro tende a padronização devido aos orifícios padronizados na extrusão.

Simulando que as partículas fossem submetidas à análise granulométrica em peneiras padronizadas da SÉRIE TYLER e fossem classificadas considerando apenas seu comprimento, ter-se-ia a distribuição granulométrica indicada na Tabela 5.2, o que possibilita calcular o diâmetro médio de Sauter em 2,31 mm.

Para o diâmetro das partículas, considerando a uniformidade das leituras, foi realizada a média aritmética e o valor encontrado é de 0,98 mm. A média aritmética para o comprimento das partículas é de 3,02 mm.

Tabela 5.2 - DISTRIBUIÇÃO GRANULOMÉTRICA DAS PARTÍCULAS (Autor, 2020).

Tylers	Abertura (mm)	Média (mm)	Nº Partículas	Fração Retida	Fração Passante (Xi)	Xi / Média
3,500	5,660	0,000	0,000	0,000	1,000	0,000
4,000	4,760	5,210	1,000	0,020	0,980	0,004
5,000	4,000	4,380	3,000	0,060	0,940	0,014
6,000	3,360	3,680	11,000	0,220	0,780	0,060
7,000	2,830	3,095	15,000	0,300	0,700	0,097
8,000	2,380	2,605	9,000	0,180	0,820	0,069
10,000	2,000	2,190	7,000	0,140	0,860	0,064
12,000	1,680	1,840	3,000	0,060	0,940	0,033
14,000	1,410	1,545	1,000	0,020	0,980	0,013
		0,705				
			50,000		Soma:	<b>0,353</b>

Classificação da partícula

$$\bar{D}_S = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left( \frac{X_i}{D_{pi}} \right)}$$

**Sendo:** Xi a fração de massa retida na malha.

$$\bar{D}_p = \frac{1}{0,353} = 2,83 \text{ mm}$$

Diâmetro = 0,98 mm

Comprimento = 2,83 mm

## 5.2 Determinação da Umidade dos Grânulos

Para determinação do teor da umidade dos grânulos iniciou-se com a coleta antes da etapa de secagem. Foram coletados 100 amostras na entrada da câmara logo após a extrusão.

Para que se tenha um resultado mais preciso é necessária uma quantidade de amostras no equipamento de medida em aproximadamente 10 grânulos. Assim foram obtidos 1000 grânulos para realizar 100 bateladas de testes. O equipamento utilizado é um titulador automático para determinação de umidade em base úmida em matérias primas e produtos acabados, podendo ser adaptado para obtenção de outras análises quantitativas com opção de interface com balança, Marca Metrohm e modelo 870 KF Titrino Plus, ver a Figura 5.2, e os resultados para entrada na primeira câmara na Tabela 5.3 e Figura 5.3.



Figura 5.2 - Equipamento Karl Fischer (Autor, 2020).

Tabela 5.3 - Resultados de Umidade dos Grânulos Entrada do Secador (Autor,2020).

**ANÁLISE DE UMIDADE DOS GRÂNULOS NA ENTRADA DA 1ª CÂMARA**

Porção de 10 grânulos - Representatividade KarlFischer (%m/m)

<b>1 a 10</b>	8,2	8,5	8,9	8	8,1	8,9	8,5	8,4	8,4	8,7
<b>11 a 20</b>	8,6	8,2	8,8	7,9	8,6	8,9	7,9	8,6	8,2	8,2
<b>21 a 30</b>	8,6	8,5	8,5	8,9	8,2	8,3	8,1	8,8	8,9	8,8
<b>31 a 40</b>	7,9	8	8,8	7,9	7,9	7,7	8,9	8,8	8,5	8,6
<b>41 a 50</b>	8,5	9,1	9,2	8,8	8,5	8,6	8,5	8,7	8,1	8,7
<b>51 a 60</b>	8	8,5	8	8	8	8,9	8,5	8,6	8,4	8,7
<b>61 a 70</b>	7,9	7,8	7,7	7,7	7,8	8,1	8,2	8,9	9,1	8,2
<b>71 a 80</b>	8,2	8,3	8,4	8,9	9	9	8,9	9,1	8,8	8,5
<b>81 a 90</b>	8,8	8,7	8,6	8,5	8,2	8,2	8,5	8,5	8,9	8,8
<b>91 a 100</b>	8	8	8,9	9	9	8,1	8,2	8,4	8,4	8,1
Média	<b>8,5 %m/m</b>									

Sendo: Desvio Padrão da Umidade : 0,379 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

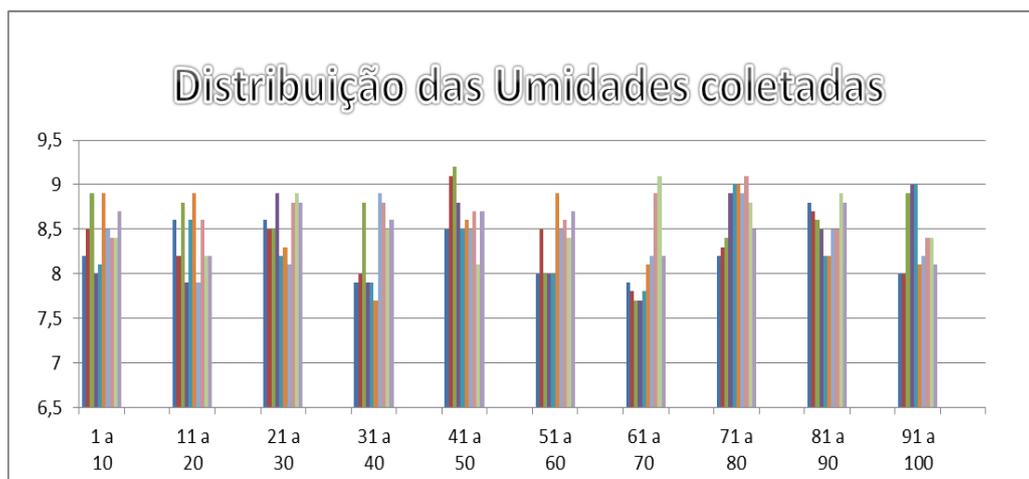


Figura 5.3 - Gráfico resultados de Umidade dos Grânulos entrada do Secador (Autor, 2020).

Em seguida efetuou-se a obtenção de dados após o ciclo da operação de secagem na saída da última câmara. Foram coletadas 100 amostras na transportadora de canecas durante a transferência para o envase. Para que se tenha um resultado mais preciso é necessária uma quantidade de amostras no equipamento de aproximadamente 10 grânulos. Os resultados são relatados na Tabela 5.4 e na Figura 5.4.

Tabela 5.4 - Resultados de Umidade dos Grânulos Saída do Secador (Autor,2020).

#### ANÁLISE DE UMIDADE DOS GRÂNULOS NA SAÍDA DA 1ª CÂMARA

Porção de 10 grânulos - Representatividade KarlFischer (%m/m)

<b>1 a 10</b>	1,5	1,6	2,1	1,6	2	2,1	2,1	2,2	2,1	2,6
<b>11 a 20</b>	1,2	1,2	2,4	1,5	2	2,3	2,8	2,5	1,9	2,5
<b>21 a 30</b>	1,5	1,3	1,5	1,9	1,8	2,5	2,3	2,6	1,8	2,4
<b>31 a 40</b>	1	1,3	1,9	2,1	1,9	1,9	1,9	2,4	1,9	2,1
<b>41 a 50</b>	1,6	1,2	1,8	2,2	1,8	1,8	1,9	2,8	2,1	2,3
<b>51 a 60</b>	1,4	1,5	1,9	2,8	1,7	1,8	1,8	2,4	2,3	2
<b>61 a 70</b>	1,5	1,4	2	2,9	1,6	1,9	1,6	1,5	2,4	2,3
<b>71 a 80</b>	1,9	1,6	1,8	2,4	1,8	2,1	1,8	2,9	2	2,3
<b>81 a 90</b>	1,8	1,7	1,9	2,4	1,5	2,3	2,1	2,7	2,5	2,1
<b>91 a 100</b>	1,9	2	1,7	2,1	2	2,2	2,2	2,5	2	1,9
<b>Média</b>	<b>1,95</b>	<b>%m/m</b>								

Sendo: Desvio Padrão da Umidade :  $0.40223 \text{ (kg água.kg}^{-1} \text{ grânulo umido)}$ .

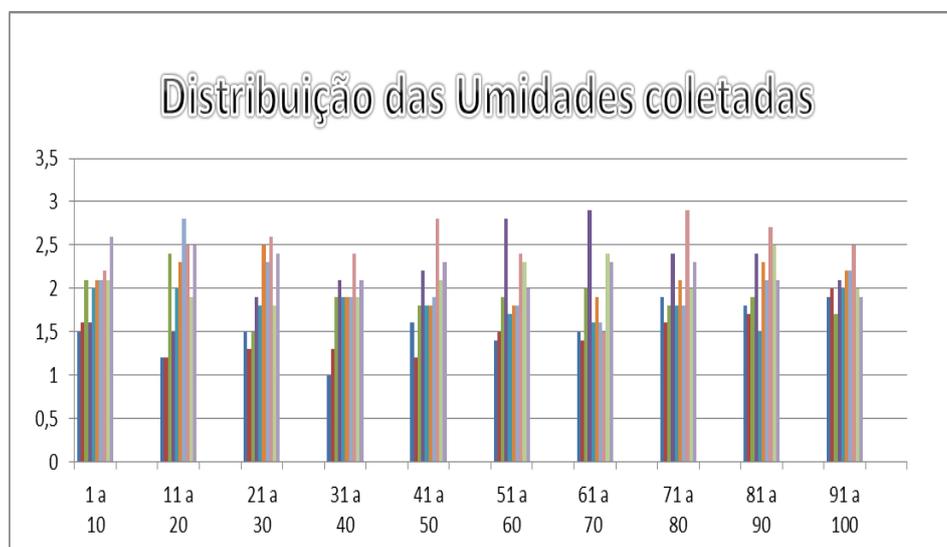


Figura 5.4 - Resultados de Umidade dos Grânulos Saída do Secador (Autor, 2020).

Na próxima etapa conhecendo melhor o comportamento dos grânulos dentro do secador foram realizadas coletas por câmara e assim ficaria evidenciada a perda de umidade durante toda etapa de secagem em leito fluidizado, ver a Tabela 5.5.

Tabela 5.5 – Resultados de teor de umidade na saída de cada câmara. (Autor,2020).

#### ANÁLISE DE UMIDADE DOS GRÂNULOS POR CÂMARA de SECAGEM

Porção de 10 grânulos - Representatividade KarlFischer (%m/m)

											Média %m/m
01 - (76,38 C°)	8,1	8,8	8,5	8,5	8,2	8,9	9,1	9,5	8,4	8,1	8,5
02 - (53,59 C°)	6,8	6,9	7,5	8	7,9	7,5	6,8	7,4	8,3	6,9	7,45
03 - (64,43 C°)	4,9	5,6	5,8	5,4	5,9	6	5,7	5,4	5,5	6	5,65
04 - (35,20 C°)	2,5	3,5	3,8	4	3,9	4,5	2,9	3,4	3,5	3,4	3,5
05 - (32,83 C°)	1,9	2	2,1	2,2	1,8	2,5	2,1	1,9	2,8	2,2	2,1

Desvio Padrão na Câmara 01 : 0,46022 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

Desvio Padrão na Câmara 02 : 0,54365 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

Desvio Padrão na Câmara 03 : 0,33928 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

Desvio Padrão na Câmara 04 : 0,56411 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

Desvio Padrão na Câmara 05 : 0,71686 (kg água.kg<sup>-1</sup> grânulo umido).

Os desvios padrões crescentes refletem o resultado da distribuição do tempo de residência nas câmaras. isto será reatado a seguir. Além disso as umidades são menores ao final da secagem.

Para determinar o tempo em que as partículas são transportadas de uma seção a outra se efetuou uma marcação nos grânulos com um corante azul (ver a Figura 5.5) e com auxílio de um cronômetro os tempos de residência dos mesmos foram mensurados. Na entrada de cada câmara existe uma iluminação independente de LED e um visor. Foram feitas filmagens para acompanhar o escoamento dos grânulos.



Figura 5.5 - Pintura dos grânulos para identificação. (Autor, 2020).

Através do visor posicionado na lateral da câmara foi realizada a cronometria de passagem do grânulo. Foram realizados 10 experimentos por câmara e representados na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Estudo de tempo de transposição por câmara. (Autor,2020).

<i>TEMPO DE PASSAGEM DOS GRÂNULOS POR CÂMARA</i>										Média (Segundos)
<b>Câmara 01</b>	1590	1485	1520	1698	1428	1397	1368	1470	1569	<b>1485</b>
<b>Câmara 02</b>	665	675	725	712	598	695	845	675	712	<b>695</b>
<b>Câmara 03</b>	185	245	196	278	294	250	197	230	210	<b>230</b>
<b>Câmara 04</b>	45	55	60	67	52	49	75	64	70	<b>60</b>
<b>Câmara 05</b>	21	25	24	23	28	21	24	21	20	<b>23</b>
<b>TOTAL</b>										<b>2493</b>

Desvio Padrão Tempo por Câmara 01 : 104,12586 s.

Desvio Padrão Tempo por Câmara 02 : 65,9939 s.

Desvio Padrão Tempo por Câmara 03 : 38,19359 s.

Desvio Padrão Tempo por Câmara 04 : 10,14889 s.

Desvio Padrão Tempo por Câmara 05 : 2,54951 s.

Tabela 5.7 Intervalo das Partículas na Câmara 01.

<b>Intervalo (s)</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>\Delta T_i</math> (s)</b>
<b>1300-1400</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>100</b>

<b>1400-1500</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>100</b>
<b>1500-1600</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>100</b>
<b>1600-1700</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>100</b>

Tabela 5.8 Intervalo das partículas na câmara 02.

<b>Intervalo</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>\Delta T_i</math> (s)</b>
<b>500-600</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>100</b>
<b>600-700</b>	<b>4</b>	<b>44,4</b>	<b>100</b>
<b>700-800</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>100</b>
<b>800-900</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>100</b>

Tabela 5.9 Intervalo das partículas na câmara 03.

<b>Intervalo</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>\Delta T_i</math> (s)</b>
<b>185-210</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>25</b>
<b>210-235</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>25</b>
<b>235-260</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>25</b>
<b>260-285</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>25</b>
<b>285-310</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>25</b>
<b>310-335</b>	<b>0</b>	<b>0,0</b>	<b>25</b>

Tabela 5.10 Intervalo das partículas na câmaras 04.

<b>Intervalo</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>\Delta T_i</math> (s)</b>
<b>40-50</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>10</b>
<b>50-60</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>10</b>
<b>60-70</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>10</b>
<b>70-80</b>	<b>2</b>	<b>22,2</b>	<b>10</b>

Tabela 5.11 Intervalo das partículas na câmara 05.

<b>Intervalo</b>	<b>Número de partículas</b>	<b>C (%)</b>	<b><math>\Delta T_i</math> (s)</b>
<b>20,0-22,5</b>	<b>4</b>	<b>44,4</b>	<b>2,5</b>
<b>22,5-25,0</b>	<b>3</b>	<b>33,3</b>	<b>2,5</b>
<b>25,0-27,5</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>2,5</b>
<b>27,5-30,0</b>	<b>1</b>	<b>11,1</b>	<b>2,5</b>

Para a Câmara 1, aplica-se a modelagem da sistemática a seguir (KUNII e LEVENPIEL, 1991). Dados para modelagem conforme extração e tratamento na Tabela 5.7,

$$Q = \sum C \cdot \Delta T_1 \quad (02).$$

$$Q = (22,2 + 33,3 + 33,3 + 11,1) \cdot 100 = 9990 \text{ s}$$

$$E_1 = \frac{P}{Q} \quad (03)$$

$$t_m = \Delta T_1 [\sum t_i \cdot E_i] \quad (04)$$

sendo:  $E_i = dF(t)/dt$

$$t_m = 100 \left[ \frac{22,2}{9990} \cdot 1350 + \frac{33,3}{9990} \cdot 1450 + \frac{33,3}{9990} \cdot 1550 + \frac{11,1}{9990} \cdot 1650 \right]$$

$$t_m = 1483 \text{ s}$$

Calculando  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ , tem-se os resultados da Tabela 5.12.

Tabela 5.12 F (ti/tm) e ti/tm.

Média	Intervalo	Número de partículas	C (%)	$\Delta T_i$ (s)
1350	1300-1400	2	22,2	100
1450	1400-1500	3	33,3	100
1550	1500-1600	3	33,3	100
1650	1600-1700	1	11,1	100

Calculando  $(t/t_m)$  “acumulativo” em função do  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Tabela 5.13  $F(t/t_m)$  x  $(t_i/t_m)$  t Câmara / t Médio

$F(t/t_m)$	$(t_i/t_m)$ t Câmara / t Médio
0,222	0,91
0,555	0,98
0,888	1,04
0,999	1,11

Para que se possa ter uma visão mais clara do comportamento da partícula deve-se realizar uma análise gráfica. Assim conforme os dados da Tabela 5.13 foi realizada uma representação gráfica conforme Figura a 5.6, sendo  $F(t)$  a fração em massa das partículas que permanecem-no equipamento por um tempo  $\leq t$ . Na Figura 5.7 faz-se a representação de  $P$  em função do tempo médio.

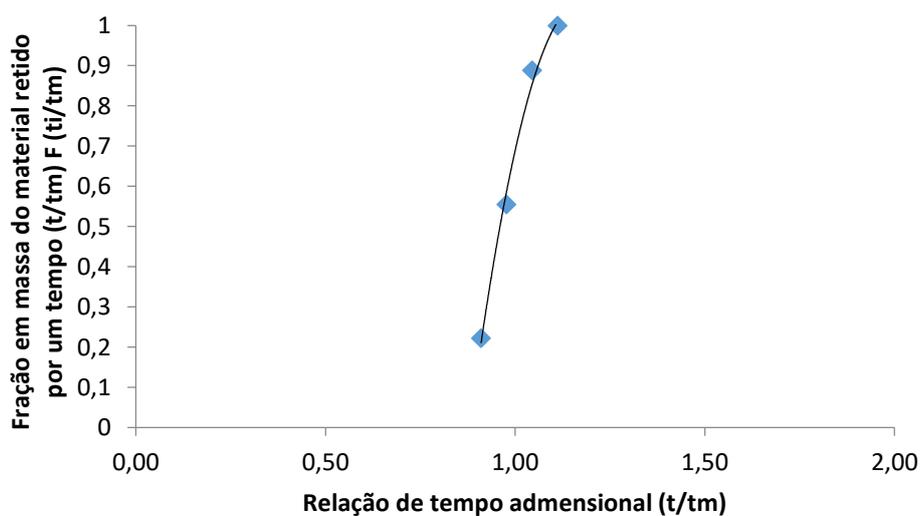


Figura 5.6  $(t/t_m)$  x  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Comparando o comportamento no gráfico é muito próximo do escoamento pistonado. Existe mistura na vertical mas na horizontal as partículas de entrada não vão diretamente para saída.

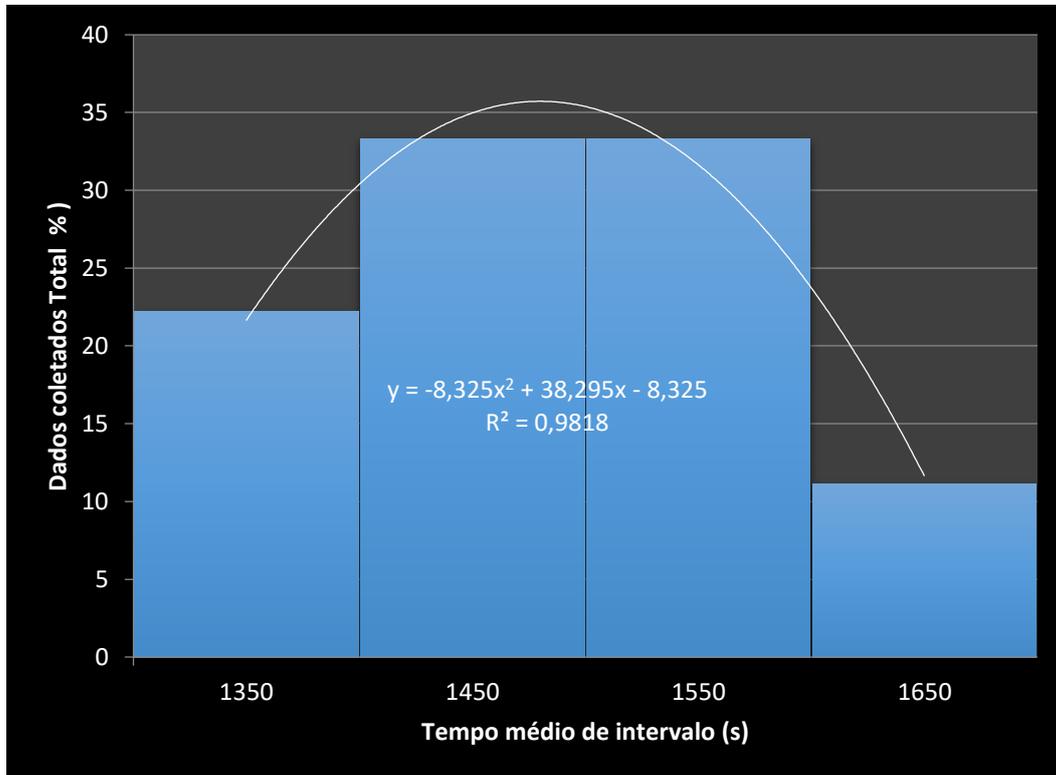


Figura 5.7 - Distribuição do t(s) x C(%) Câmara 01

Para a câmara 2, aplica-se a modelagem dos dados conforme cálculos 2,3 e 4 e extração e tratamento na Tabela 5.8.

$$Q = \sum C \cdot \Delta T_1$$

$$Q = (11,1 + 44,4 + 33,3 + 11,1) \cdot 100 = 9990 \text{ s}$$

$$Q = 9990 \text{ s.}$$

$$E_1 = \frac{P}{Q}$$

$$t_m = \Delta T_1 \left[ \sum t_i \cdot E_i \right]$$

$$t_m = 100 \left[ \frac{11,1}{9990} \cdot 550 + \frac{44,4}{9990} \cdot 650 + \frac{33,3}{9990} \cdot 750 + \frac{11,1}{9990} \cdot 850 \right]$$

$$t_m = 694 \text{ s}$$

Calculando  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ , tem-se:

Tabela 5.14 -  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ ,

Média	Intervalo	Número de partículas	C (%)	$\Delta T_i$ (s)
550	500-600	1	11,1	100
650	600-700	4	44,4	100
750	700-800	3	33,3	100
850	800-900	1	11,1	100

Calculando  $(t/t_m)$  “acumulativo” em função do  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Tabela 5.15  $(t/t_m)$  x  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

$F(t/t_m)$	$(t_i/t_m)$ T Câmara / T Médio
0,111	0,79
0,555	0,94
0,888	1,08
0,999	1,22

Para que se possa ter uma visão mais clara do comportamento da partícula deve-se realizar uma análise gráfica. Assim conforme os dados da Tabela 5.15 foi realizada uma representação gráfica conforme Figura a 5.8

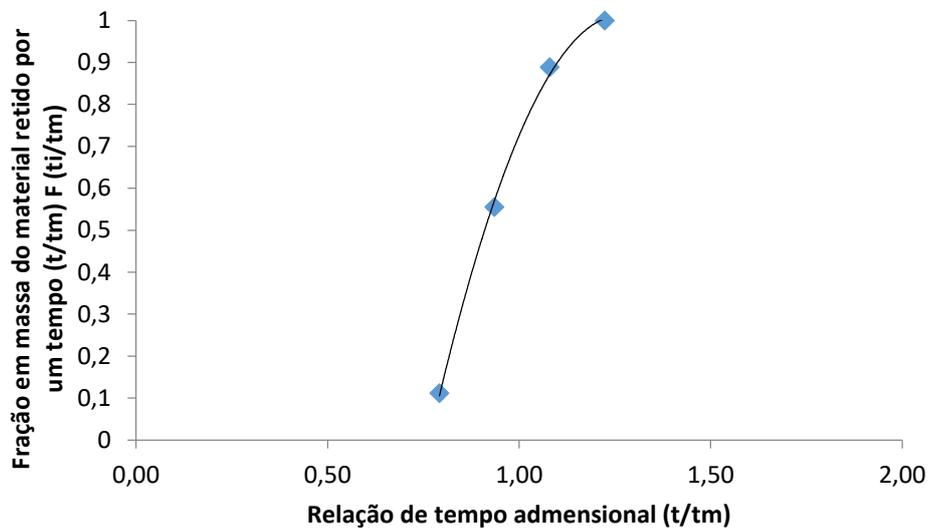


Figura 5.8  $t/t_m$  x  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

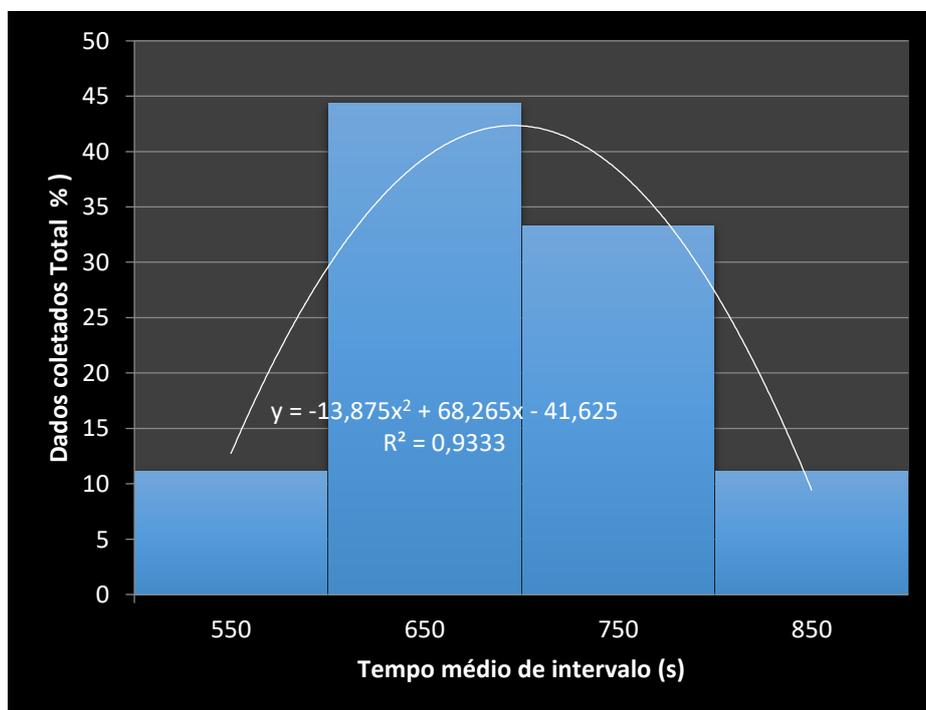


Figura 5.9 – Distribuição do T(s) x C(%) câmara 02

Para a Câmara 3, aplica-se a modelagem dos dados conforme extração e tratamento na Tabela 5.9.

$$Q = \sum C \cdot \Delta T_1$$

$$Q = (33,3 + 22,2 + 22,2 + 11,1 + 11,1) \cdot 25 = 2497,5 \text{ s}$$

$$E_1 = \frac{P}{Q}$$

$$t_m = \Delta T_1 \left[ \sum t_i \cdot E_i \right]$$

$$t_m = 25 \left[ \frac{33,3}{2497,5} \cdot 197,5 + \frac{22,2}{2497,5} \cdot 222,5 + \frac{22,2}{2497,5} \cdot 247,5 + \frac{11,1}{2497,5} \cdot 272,5 + \frac{11,1}{2497,5} \cdot 297,5 \right]$$

$$t_m = 234 \text{ s}$$

Calculando  $F (t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ , tem-se:

Tabela 5.16 F (ti/tm) e ti/tm,

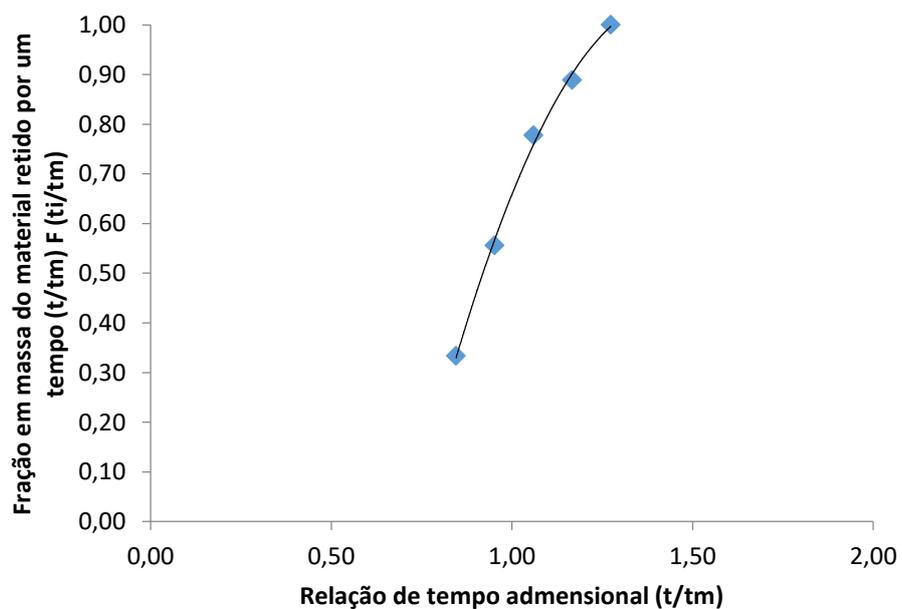
Média	Intervalo	Número de partículas	C (%)	$\Delta T_i$ (s)
197,5	185-210	3	33,3	25
222,5	210-235	2	22,2	25
247,5	235-260	2	22,2	25
272,5	260-285	1	11,1	25
297,5	285-310	1	11,1	25

Calculando  $(t/t_m)$  “acumulativo” em função do  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Tabela 5.17 -  $(t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$ 

$F(t/t_m)$	$(t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$
0,33	0,85
0,56	0,95
0,78	1,06
0,89	1,17
1,00	1,27

Para que se possa ter uma visão mais clara do comportamento da partícula deve-se realizar uma análise gráfica. Assim conforme os dados da Tabela 5.17 foram realizados uma representação gráfica conforme Figura 5.10. :

Figura 5.10 -  $t/t_m) \times (t_i/t_m) T \text{ Câmara} / T \text{ Médio}$

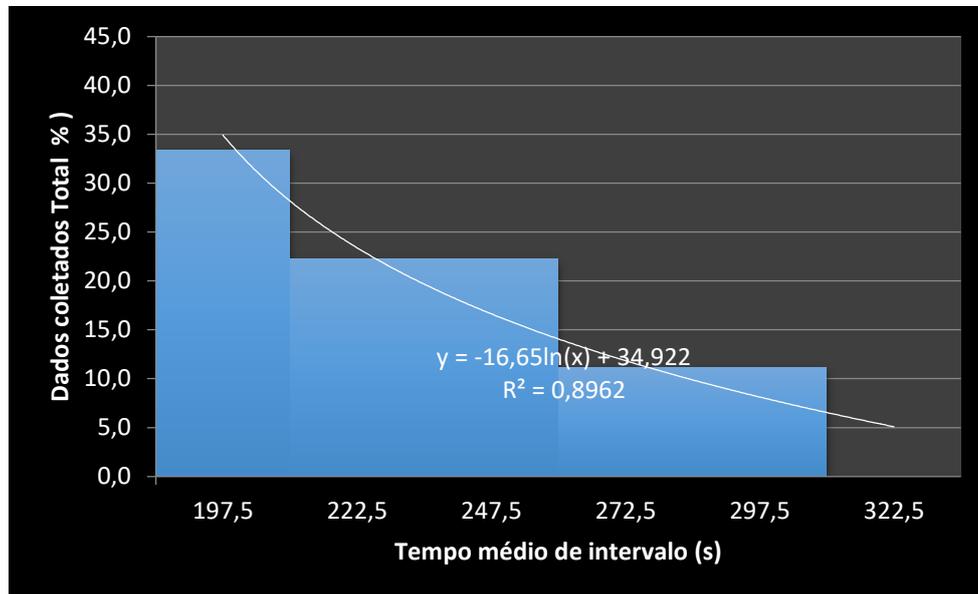


Figura 5.11 – Distribuição do T(s) x C(%) câmara 03.

Para a Câmara 4, aplica-se a modelagem dos dados conforme extração e tratamento na Tabela 5.10.

$$Q = \sum C \cdot \Delta T_1$$

$$Q = (22,2 + 22,2 + 33,3 + 22,2) \cdot 10 = 999 \text{ s}$$

$$E_1 = \frac{P}{Q}$$

$$t_m = \Delta T_1 \left[ \sum t_i \cdot E_i \right]$$

$$t_m = 10 \left[ \frac{22,2}{999} \cdot 45 + \frac{22,2}{999} \cdot 55 + \frac{33,3}{999} \cdot 65 + \frac{22,2}{999} \cdot 75 \right]$$

$$t_m = 61,0 \text{ s}$$

Calculando  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ , tem-se:

Tabela 5.18 -  $F(t_i/t_m)$  e  $(t_i/t_m)$ .

Média	Intervalo	Número de partículas	C (%)	$\Delta T_i$ (s)
45	40-50	2	22,2	10
55	50-60	2	22,2	10
65	60-70	3	33,3	10
75	70-80	2	22,2	10

Calculando  $(t/t_m)$  “acumulativo” em função do  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Tabela 5.19 -  $(t/t_m)$  X  $(t_i/t_m)$  T câmara / T Médio

$F(t/t_m)$	$(t_i/t_m)$ T Câmara / T Médio
0,222	0,74
0,444	0,91
0,777	1,07
0,999	1,24

Para que se possa ter uma visão mais clara do comportamento da partícula deve realizar uma análise gráfica. Assim conforme os dados da Tabela 5.19 foi realizada uma representação gráfica conforme Figura a 5.12 a seguir:

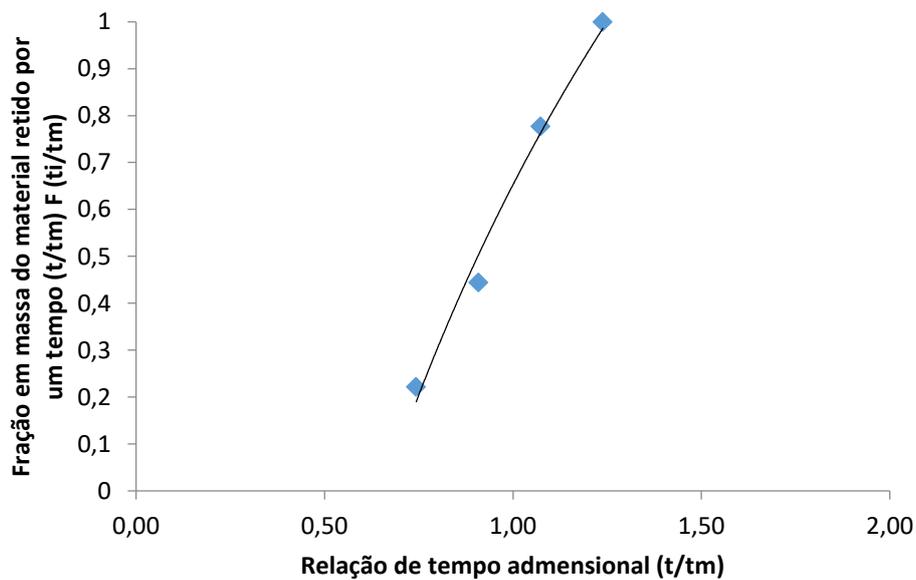


Figura 5.12 -  $t/t_m$  x  $(t_i/t_m) T_{\text{Câmara}} / T_{\text{Médio}}$

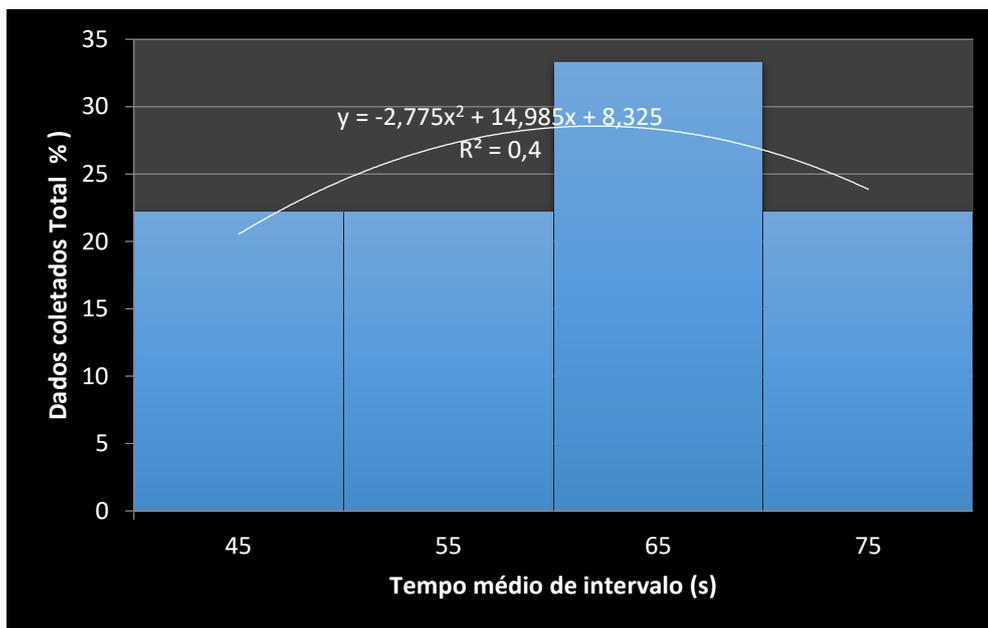


Figura 5.13 – Distribuição do  $t(s)$  x  $C(\%)$  câmara 04.

Para a Câmara 5, aplica-se a modelagem dos dados conforme extração e tratamento na Tabela 5.11.

$$Q = \sum C \cdot \Delta T_1$$

$$Q = (44,4 + 33,3 + 11,1 + 11,1) \cdot 2,5 = 250 \text{ s}$$

$$E_1 = \frac{P}{Q}$$

$$t_m = \Delta T_1 \left[ \sum t_i \cdot E_i \right]$$

$$t_m = 2,5 \left[ \frac{44,4}{250} \cdot 21,25 + \frac{33,3}{250} \cdot 23,75 + \frac{11,1}{250} \cdot 26,25 + \frac{11,1}{250} \cdot 28,75 \right]$$

$$t_m = 23,0 \text{ s}$$

Calculando  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ , tem-se:

Tabela 5.20 -  $F(t_i/t_m)$  e  $t_i/t_m$ .

Média	Intervalo	Número de partículas	C (%)	$\Delta T_i$ (s)
21,25	20,0-22,5	4	44,4	2,5
23,75	22,5-25,0	3	33,3	2,5
26,25	25,0-27,5	1	11,1	2,5
28,75	27,5-30,0	1	11,1	2,5

Calculando  $(t/t_m)$  “acumulativo” em função do  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T Médio

Tabela 5.21 -  $(t/t_m)$  X  $(t_i/t_m)$  T Câmara / T médio

$F(t/t_m)$ (esse é cumulativo)	$(t_i/t_m)$ T Câmara / T Médio
0,444	0,91

0,777	1,01
0,888	1,12
0,999	1,22

Para que se possa ter uma visão mais clara do comportamento da partícula devemos realizar uma análise gráfica. Assim conforme os dados da Tabela 5.21 foram realizados uma representação gráfica conforme Figura a 5.14. :

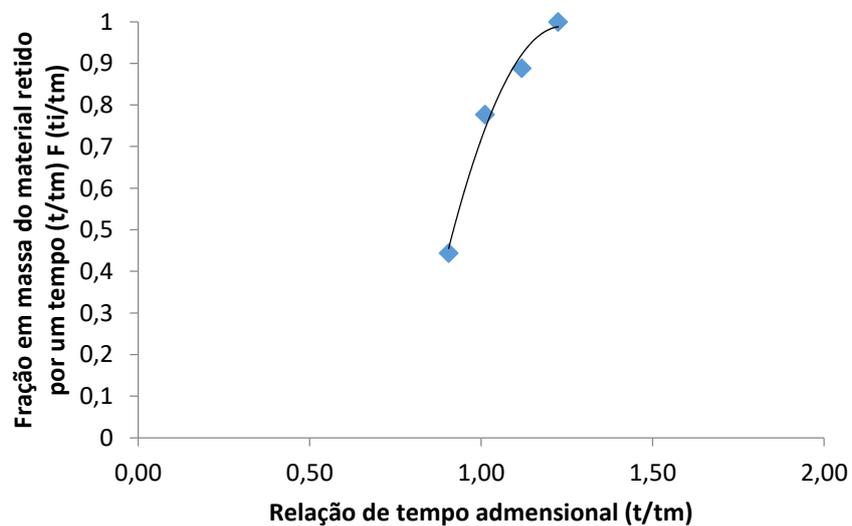


Figura 5.14 -  $t/t_m$  x  $(t_i/t_m) T_{\text{Câmara}} / T_{\text{Médio}}$

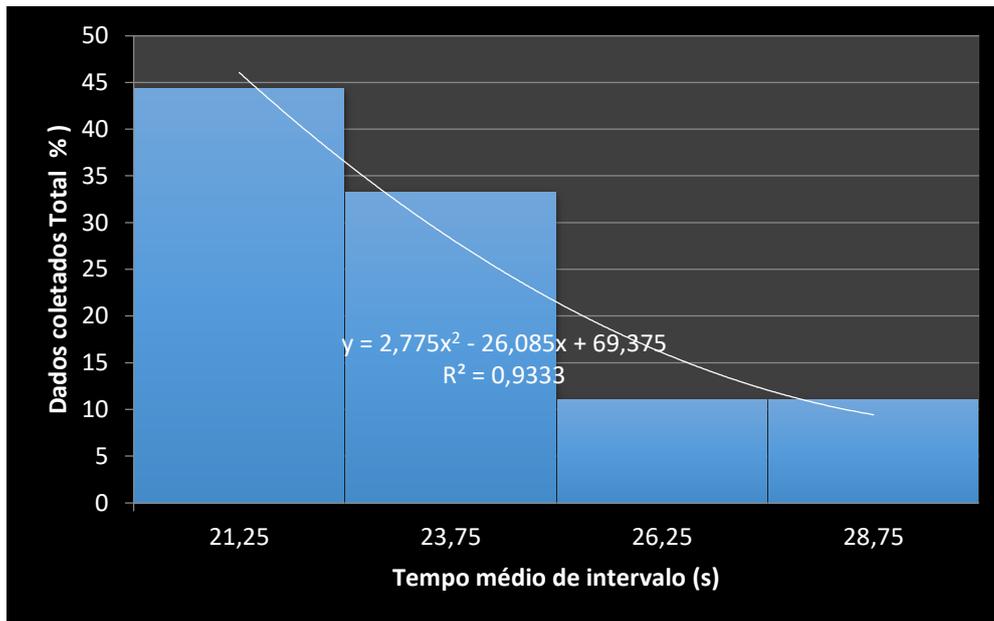


Figura 5.15 – Distribuição do t(s) x C(%) Câmara 05.

Um estudo usando um leito fluidizado horizontal em escala reduzida foi desenvolvido por CHEN et al, 2017. O secador em leito fluidizado com três divisoras possibilitou a geração de quatro câmaras. O leito tinha altura de 0,4 m e seção transversal de 1,0 m por 0,2 m. O secador foi ensaiado com partículas de alumina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, com tamanho médio de 1,8 mm, classificada como “D” por Geldard, as partículas do estudo atual também tem a mesma classificação “D”. Na modelagem de CHEN et. al, 2017 considerou-se mistura perfeita na direção vertical e deslocamento no sentido horizontal. Partes dos resultados experimentais são disponibilizadas nas Figuras 5.16 e 5.17 a seguir.

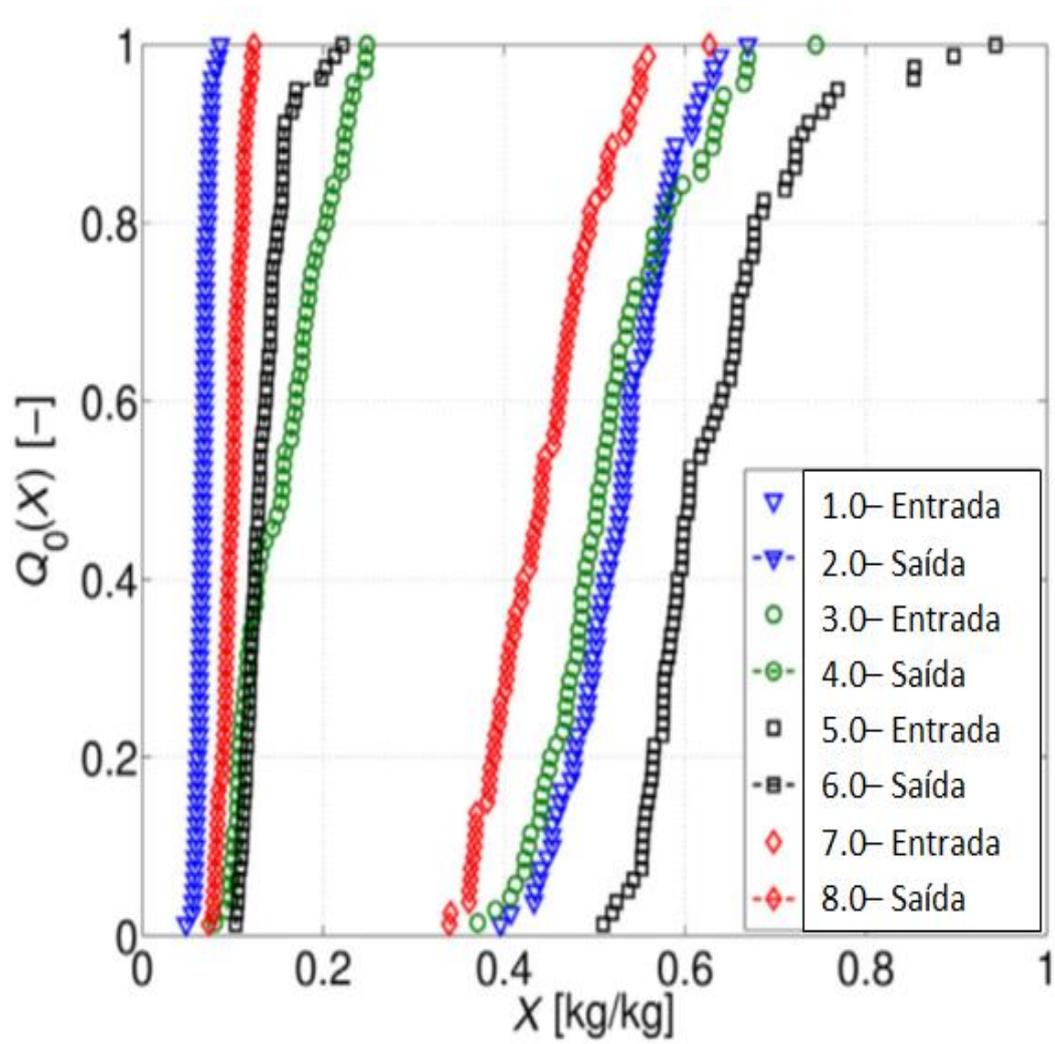


Figura 5.16 Distribuições do teor de umidade das partículas medidas na entrada e na saída para todos os experimentos.  $Q_0(X)$  é o teor de umidade cumulativa normalizado das partículas.

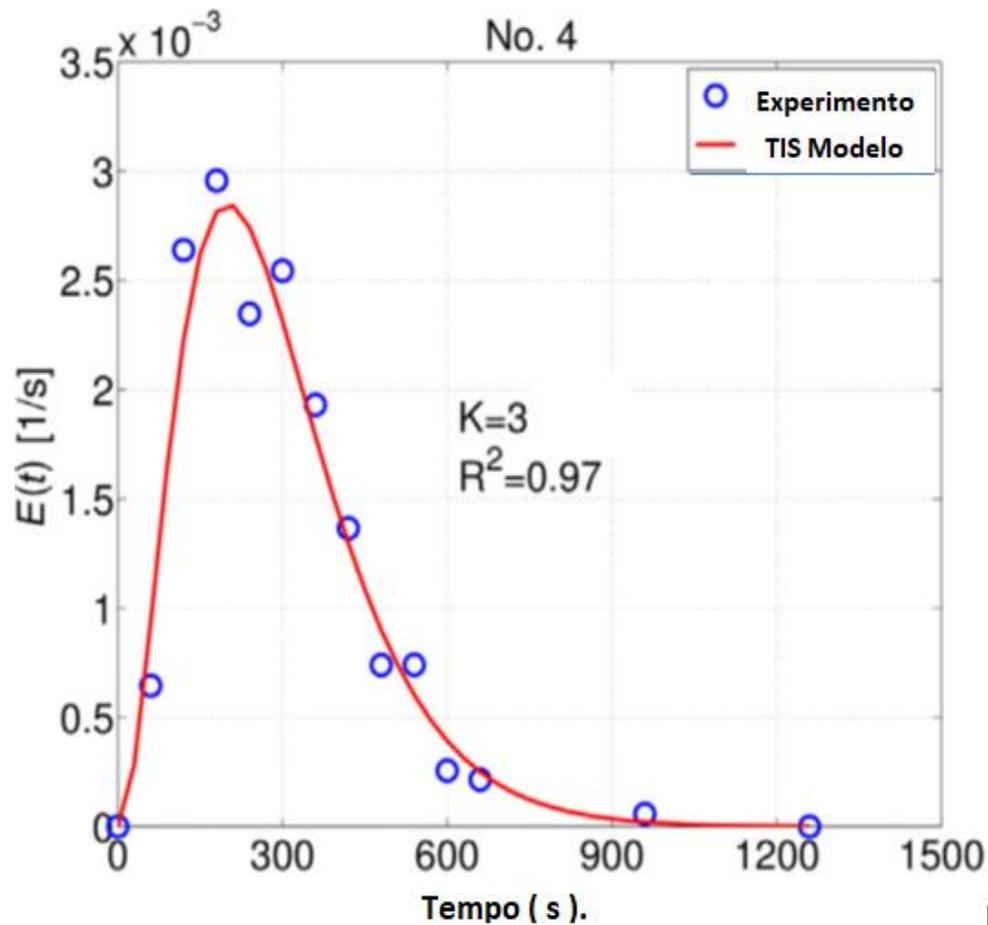


Figura 5.17 - Comparação de resultados numéricos para modelos tanque em série (TIS) e dados experimentais de distribuição de tempo de residência.  $E(t)$  saída das partículas.

Esse resultado é similar ao estudo atual de secagem de grânulos dispersivos. A umidade do material seco apresenta pouca dispersão como apresentado.

Conclui-se que o secador industrial segue o comportamento preconizado pelo estudo em escala reduzida (CHEN et al, 2017).

Após a realização do tratamento dos dados em relação aos tempos de fluidização foram correlacionadas as umidades, ver a Figura 5.18

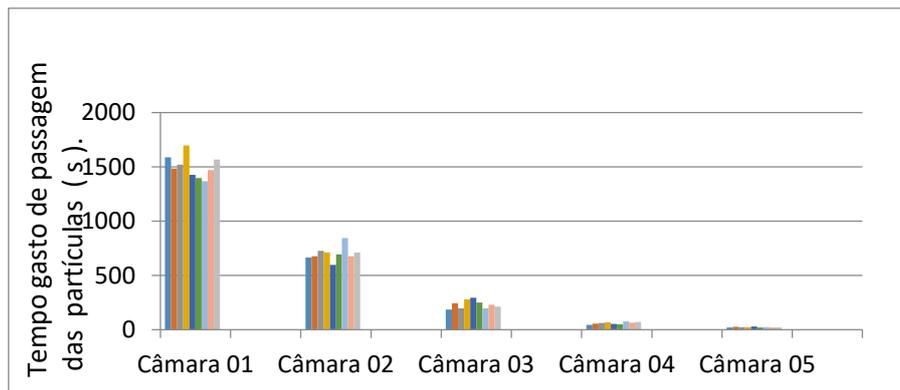


Figura 5.18 - Estudo de tempo de transposição por câmara. (Autor, 2020).

Após os experimentos realizados, os tempos de transporte do grânulo, a perda de umidade durante a secagem e seu tamanho, podem representar graficamente com dados da Tabela 5.22, a umidade média dos grânulos em função do tempo médio de permanência nas câmaras.

Tabela 5.22 - Dados de tempo durante a passagem e umidade obtida . (Autor,2020).

	Tempo Médio (s)	Umidade Média (%m/m)
<b>Câmara 01</b>	1485	8,5
<b>Câmara 02</b>	695	7,45
<b>Câmara 03</b>	230	5,65
<b>Câmara 04</b>	60	3,5
<b>Câmara 05</b>	23	2,1

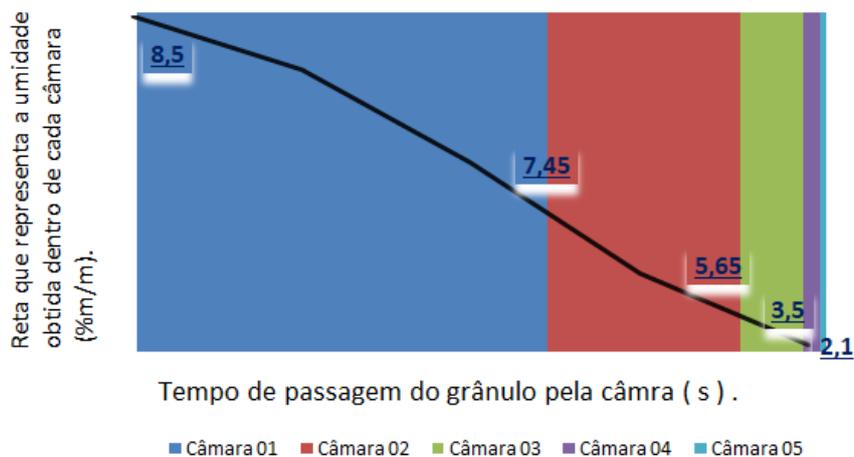


Figura 5.19 - Dados de tempo de transporte durante a passagem pelas câmaras e umidade obtida na saída de cada câmara (Autor, 2020).

### 5.3 Parametrização dos Instrumentos do processo de secagem

Durante toda etapa da secagem é necessário controlar a temperatura do ar de secagem. No trabalho atual foi utilizado um processo com alto controle de temperatura conforme sistema demonstrado. No instrumento da Figura 5.20 e 5.21 tem-se uma visão do controle de temperatura na entrada e indicador da saída. O aquecimento do ar é efetuado com a energia gerada por queima de óleo BPF de baixo ponto de fulgor. Os gases na saída retornam ao queimador evitando assim perda de energia, o que consiste em menor consumo.



Figura 5.20 - Imagem do Instrumento de controle de temperatura. (Autor, 2020).

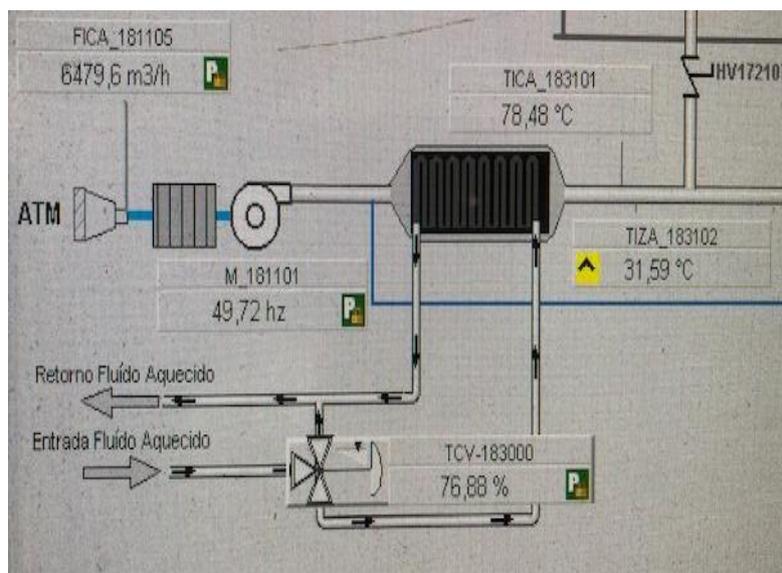


Figura 5.21 – Esquema do sistema de automação no supervisório para o controle de temperatura do ar (Autor, 2020).

## 6 CONCLUSÃO

De acordo com o objetivo proposto neste projeto, os resultados possibilitaram entender o comportamento dos grânulos em escoamento no secador. A umidade de entrada dos grânulos de 8,55 (bu) se reduziu para 2,1% (bu) na saída do secador. Os tempos de escoamento têm uma ligação direta com a produtividade sem que afete a qualidade do produto acabado e sua eficiência na aplicação.

O comportamento dos grânulos na primeira câmara de entrada, sendo, denominada de câmara 01 de leito fluidizado, corresponde ao comportamento com baixo grau de mistura, tendendo ao escoamento pistonado conforme Figura 6.1 - Função  $F(t/t_m)$  Conforme diferentes modelos de escoamento dos sólidos (Kunii e Levenspiel, 1991). Isto significa que existe pouca dispersão das partículas ao escoarem pela primeira câmara do leito fluidizado. A consequência é que isto tem reflexos na qualidade devendo ocorrer também pouca variação de umidade das partículas ao abandonarem o leito. Este mesmo comportamento é observado entre as câmaras 2 e 3. Nas câmaras 4 e 5 devido à perda mássica de umidade o grânulo já tem sua velocidade aumentada consideravelmente, contudo o comportamento se mantém.

Com os dados analíticos de umidade coletadas em todas as etapas de secagem ficou claro e representativo o comportamento do material. Durante o escoamento do

grânulo na primeira câmara a perda de umidade é menor, mesmo que o tempo gasto para o escoamento tenha sido maior. Fica muito claro o escoamento pistonado com baixo grau de mistura. Com a perda progressiva de umidade no leito de secagem aumenta a intensidade de mistura e conseqüentemente a velocidade de escoamento dos grânulos.

Para ter-se uma classificação do secador na indústria podemos afirmar que o mesmo é representado pela Figura 6.2 - Leito fluidizado horizontal usado no estudo (CHEN et al., 2017). O material após a etapa de extrusão, segue diretamente pela entrada superior do secador na primeira câmara com temperatura entre 55e 65° tendo o movimento dos grânulos efetuado em função da admissão de ar na parte inferior da câmara. Assim conforme a perda de umidade vai acontecendo, o material escoo e a mistura é efetuada na direção vertical. As placas internas que separam as câmaras internamente servem de barreira física no auxílio e na condução dos grânulos e do tempo de residência. No final da secagem para determinar a quantidade de produto de saída do secador, tem-se uma válvula rotativa onde diretamente do supervisor o operador controla sua taxa de abertura.

Portanto, este estudo possibilitou o entendimento do comportamento das relações entre umidade, escoamento e movimento dos grânulos, produtividade e qualidade final do produto. Entendendo o comportamento do secador pode-se selecionar definir os melhores parâmetros para o corpo operacional e ter uma melhor performance do equipamento, visando ganhos de produtividade, diminuindo o custo operacional e evitando riscos á qualidade do produto. .

## REFERÊNCIAS

- ANVISA. **Agência nacional de vigilância sanitária**. Disponível em: <https://portal.anvisa.gov.br/>. Acesso em: 12 Jun. 2020d.
- FINZER, J. R. D. **Desenvolvimento de um secador de leito vibro-Jorrado**. Tese. Campinas, SP: UNICAMP: 258p. 1989
- IBAMA. **Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis**. Disponível em : <https://www.gov.br/ibama/pt-br>. Acesso em 20 Ago. 2020d.
- K. CHEN et al. / Particuology. **Experimental study and modeling of particle drying in a continuously-operated horizontal fluidized bed**, 34 (2017) 134–146p
- KUNII, D.; LEVENSPIEL, O. **Fluidization engineering**. 2°. Washington: Butterworth-Heinemann, 491p. 1991.
- MAPA. **Terminologia de Formulações de Agrotóxicos ABNT NBR 12697/2004**. MS Excel. TIPOS-DE-FORMULAÇÕES-DE-AGROTÓXICOS-E-AFINIS.XLS. Brasília, DF: MAPA-Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Planilha: Secretaria de Defesa Agropecuária-SDA
- MATUO, T. **Técnicas de Aplicação de Defensivos Agrícolas**. Jaboticabal-SP: FUNEP: 139 p. 1990.
- MACMULLIN, R., & WEBER, M. (1935). **The theory of short-circuiting in continuous-flow mixing vessels** in series and kinetics of chemical reactions in such systems. Transactions of American Institute of Chemical Engineers, 31(2), 409–458p.
- NONHEBEL, M.A., Moss, A.A.H. **Drying of solids in the chemical industry**. London: Butterworth & Co., 1971, 301 p.
- PATUSSI, C.; BÜNDCHEN, M. **Avaliação in situ da genotoxicidade de triazinas utilizando o bioensaio Trad-SHM de Tradescantia clone 4430**. Manguinhos, RJ.: Ciência & Saúde Coletiva 2012.
- SUAVE, S. **Modernização do Sistema de Geração de Energia Térmica para o Secados de leito vibro-fluidizado**. Uberaba, MG: UNIUBE: 2017.
- SFREDO, M. A. **Estudo da Dispersão na Secagem de Frutos de Café em Secador de Bandejas Vibradas**. 2006. 319 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química)-Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.

STRUMILLO, C.; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**, 448p.  
Switzerland: Gordon and Breach Science Publishers 1986.