

UNIVERSIDADE SANTA CECÍLIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LUCAS BERNARDO MONTEIRO

**INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE NO COMPORTAMENTO DA ATOMIZAÇÃO DE
UM SPRAY DRYER DE DISCO ROTATIVO**

SANTOS/SP

2016

LUCAS BERNARDO MONTEIRO

**INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE NO COMPORTAMENTO DA ATOMIZAÇÃO DE
UM SPRAY DRYER DE DISCO ROTATIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Marlene Silva de Moraes e coorientação do Prof.^o Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

SANTOS/SP

2016

LUCAS BERNARDO MONTEIRO

**INFLUÊNCIA DA VISCOSIDADE NO COMPORTAMENTO DA ATOMIZAÇÃO DE
UM SPRAY DRYER DE DISCO ROTATIVO**

Dissertação apresentada à Universidade Santa Cecília como parte dos requisitos para obtenção de título de mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, sob a orientação da Prof^a. Dr^a. Marlene Silva de Moraes e coorientação do Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Junior

Prof.^o Dr. Aldo Ramos Santos

Prof.^a Dr.^a Marlene Silva de Moraes

Prof.^o Dr. Ardson dos Santos Vianna Júnior

SANTOS/SP

2016

Autorizo a reprodução parcial ou total deste trabalho, por qualquer que seja o processo, exclusivamente para fins acadêmicos e científicos.

Bernardo Monteiro, Lucas.

Influência da viscosidade no comportamento da atomização de um *spray dryer* de disco rotativo / Lucas Bernardo Monteiro - 2016. 85p.

Orientador: Marlene Silva de Moraes.

Coorientador: Deovaldo de Moraes Júnior.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Santa Cecília, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Santos, SP, 2016.

1. *Spray dryer*. 2. Viscosidade. 3. Disco
4. Atomização. 5. *Patternation*. I. Moraes, Marlene Silva de,
orient. II. Moraes Júnior, Deovaldo, coorient.
III. Influência da viscosidade no comportamento da
atomização de um *spray dryer* de disco rotativo.

Elaborada pelo SIBi – Sistema Integrado de Bibliotecas – Unisanta

DEDICATÓRIA

Dedico:

Aos meus pais, Ana Fátima Bernardo da Silva Monteiro e Carlos Alberto Monteiro, por todo o apoio nos momentos em que mais precisei e por, como pais, terem me educado e feito de mim uma pessoa íntegra e justa.

Aos meus avós maternos, Elza Martins (in memoriam) e Antônio Bernardo da Silva (in memoriam), e paternos, Nadir Alcedo e Albino Monteiro (in memoriam), por todo o carinho e também educação que me deram.

Aos meus familiares: irmã Jéssica Bernardo Monteiro, tios Rosana Bernardo Beltran e Francisco Beltran Neto e primo Júlio Bernardo Beltran pela ajuda e momentos de descontração.

Aos deuses, principalmente Freyja, por me concederem a força necessária que humildemente peço com o intuito de superar todos os desafios a mim impostos diariamente, os quais enfrento com coragem, honra, dignidade e cabeça erguida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Marlene Silva de Moraes que sempre me apoiou e deu forças, não somente como orientadora, mas como professora, amiga e segunda mãe.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Deovaldo de Moraes Júnior por sempre acreditar em mim e me incentivar e apoiar ao longo do início de minha caminhada acadêmica, como professor, amigo e um pai para mim e por principalmente nunca ter desistido e me apoiado perante os problemas que surgiram ao longo desta mesma caminhada.

Aos professores da Universidade Santa Cecília, com destaque aos professores Aldo Ramos Santos, Luiz Renato Bastos Lia, Sérgio Ferreira, Paulo Roberto Canton, Cláudio Barone Huss, Paulo Henrique, Delmiro Dantello Galego, Flávio Nelson Pereira, Rafael Urbaneja, Luiz Carlos Bertevello, Dorotéa Vilanova e Luiz Henrique Schiavon por todo o conhecimento que me foi passado e por serem um exemplo de profissionais e seres humanos.

Aos técnicos Volnei de Lemos, Gilmar Alcântara, Irineu Penha da Ressureição, Vitor Dias de Paula e Álvaro Luiz Moreira Conrado por toda ajuda prestada com conselhos, com a amizade e nos serviços solicitados que sempre foram realizados com primor.

Aos amigos e amigas Alessandro de Matos Barbosa, Pedro Prado Pellegrino, Luciana Lopes Oliveira, Giuliana D'Orazio, Kauana Martins Iglesias, Amanda de Souza, Nelize Maria de Almeida Coelho, Vitor da Silva Rosa, Bruna de Souza Perez, Lucia Avilla, Cristiane Marquinez de Araújo, Igor Paiva Sansão, Rodrigo de Abreu Costa, Kátia Cristina, Nayara Mota Oliveira Souza e Gabriela Reis Dias pelos fortes laços e incondicional apoio nos momentos em que mais necessitei, mostrando-se verdadeiras pessoas dignas de serem chamados de amigos.

A todos os estagiários do Laboratório de Operações Unitárias por toda a ajuda direta e indireta que sempre me deram, em especial a estagiária Amanda Vasco Fernandes por todo auxílio na hora dos experimentos.

A todos os que foram e serão meus alunos que, por mais breve que seja suas presenças em minha caminhada. É através dela que a cada dia não apenas leciono, mas também aprendo algo, me tornando um ser humano melhor.

À Universidade Santa Cecília pela oportunidade de desenvolver minha pesquisa em seu programa de mestrado e por ceder suas instalações para a realização dos experimentos.

Há três métodos para ganhar sabedoria: primeiro, por reflexão, que é o mais nobre; segundo, por imitação, que é o mais fácil; e terceiro, por experiência, que é o mais amargo.

Confúcio

RESUMO

A secagem é uma operação unitária que tem como finalidade de remover a umidade presente em um sólido. Esse procedimento pode ser realizado por diversos tipos de equipamento tais como secador de bandejas, secador de tambor rotativo, secador por atomização *spray dryer*, entre outros. Na secagem por atomização é importante que o produto não chegue à parede da câmara ainda úmido, uma vez que isso pode acarretar em uma incrustação, alterando a qualidade do produto, e em eventuais perdas e contaminações. O presente trabalho teve por objetivo quantificar o comportamento da atomização em função da viscosidade da alimentação em um equipamento do tipo *spray dryer* de disco rotativo, utilizando como fluido água pura e solução de sacarose a 50% em massa. Os resultados permitiram concluir que a melhor distribuição foi obtida com a solução de açúcar, disco de diâmetro externo de 50,10 mm, rotação de 31.000 rpm, vazão de $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ com alcance de 684 mm. Os experimentos permitiram o desenvolvimento de uma equação empírica para o cálculo do alcance máximo da partícula atomizada em função das variáveis estudadas.

Palavras chave: *Spray dryer*. Viscosidade. Disco rotativo. Atomização. *Patternation*.

ABSTRACT

Drying is a unit operation which consist of removing the moisture from a solid. This procedure can be developed by different equipment like tray dryer, rotary drum dryer, spray dryer, and others. During the spray drying it's important that the humid product don't reach the wall since it can result in losses and contamination. The present work had as objective to study the viscosity influence on the atomization behavior in a rotary disc spray dryer using water and 50% mass base sucrose solution. The results allowed to conclude that the better distribution was with the sugar solution, 50,10 mm diameter disk, 31.000 rpm, mass flow of $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$ and maximum atomization range of 684 mm. The experiments allowed the development of an empirical equation to obtain the maximum range from an atomized particle in function of the studied variables.

Keywords: Spray dryer. Viscosity. Rotary disc. Atomization. Patteration.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Efeito da capilaridade..... | 20 |
| Figura 2 - Curva de secagem..... | 21 |
| Figura 3 - <i>Spray dryer</i> da unidade SENAI “Mário Amato”, Diadema/SP. Suspensão de Cerâmica..... | 22 |
| Figura 4 - Tipos de fluxos em um <i>spray dryer</i> . Sendo: (a) e (b) concorrentes, (c) contracorrente e (d) e (e) misto..... | 23 |
| Figura 5 - Vista interna da câmara de secagem de um sistema de alimentação por “lança” em um <i>spray dryer</i> – unidade SENAI “Mário Amato”, Diadema/SP. Suspensão de Cerâmica..... | 24 |
| Figura 6 - Sistema de atomização por bico pressurizado..... | 27 |
| Figura 7 - Sistema de atomização por bico duplo-fluido..... | 28 |
| Figura 8 - Sistema de atomização por disco rotativo..... | 29 |
| Figura 9 - Sistema de atomização por pulso (sônico) de combustível. 1) Ar de combustível; 2) válvula rotativa; 3) câmara de combustível; 4) alimentação de combustível; 5) piloto; 6) tailpipe (parte do sistema responsável pela vibração sônica); 7) zona de atomização; 8) entrada de ar; 9) alimentação do fluido e 10) câmara de secagem..... | 30 |
| Figura 10 - Comparativo de partículas secas em um processo de atomização, a) partícula seca e oca e b) partícula seca com depressão..... | 32 |
| Figura 11 - Equipamento do tipo <i>spray dryer</i> utilizado nos experimentos..... | 34 |
| Figura 12 - Esboço do sistema utilizado. 1) Tanque de alimentação; 2) bomba peristáltica; 3) tubo de alimentação; 4) Motor; 5) voluta; 6) tampo de acrílico com diâmetro de 920 mm; 7) disco atomizador; 8) suporte de madeira em formato de estrela com oito pontas e 9) estrutura metálica móvel com altura total de 1850 mm..... | 35 |
| Figura 13 - Detalhes do sistema de alimentação composto por: A) Reservatório com volume de 1,8 litros; B) bomba peristáltica de 4 roletes e C) controlador de vazão da bomba peristáltica..... | 36 |
| Figura 14 - Discos atomizadores utilizados nos experimentos: A) Disco com diâmetro externo de 50,20 mm e 16 orifícios de 3,6 mm e B) Disco com diâmetro externo de 30,10 mm e 16 orifícios de 3,6 mm. Escala em cm na base das fotos..... | 36 |

| | |
|---|----|
| Figura 15 - Esboço em vista de planta do suporte de madeira e seu posicionamento em relação..... | 39 |
| ao disco atomizador (círculo central) e o sentido de rotação do disco. | 39 |
| Figura 16 - Sistema de coleta dos dados. | 39 |
| Figura 17 - Coletor utilizado nos experimentos, com dimensões de 2,8 mm x 51,15 mm x 39,75 mm..... | 40 |
| Figura 18 - Material adsorvente empregado e posição dos cortes realizados. | 40 |
| Figura 19 - Balança utilizada nos experimentos..... | 41 |
| Figura 20 - Tacômetro utilizado para medir a rotação dos experimentos..... | 42 |
| Figura 21 - Mapa do posicionamento de cada coletor. A alimentação do disco foi feita por um tubo de 3 mm de diâmetro próximo ao centro, na direção leste. O ponto próximo ao centro indica a localização da alimentação. A seta indica o sentido de rotação do disco atomizador. | 43 |
| Figura 22 - Comportamento do experimento 4: Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹ | 44 |
| Figura 23 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹) e b) 3 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 1,34 g.s ⁻¹)..... | 45 |
| Figura 24 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹) e b) 12 (Solução de Açúcar 50% em massa; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹). | 45 |
| Figura 25 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹) e b) 8 (Água; 50,1 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹)..... | 46 |
| Figura 26 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹) e b) 2 (Água; 30,2 mm; 31000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹)..... | 46 |
| Figura 27 - Comportamento do experimento 14: Solução de açúcar 50% em massa; 50,1 mm; 31000 rpm e 0,55 g.s ⁻¹ . a) Uniformidade na distribuição e b) ponto de gotejamento da tampa..... | 47 |
| Figura 28 – Menor desvio padrão. Experimento 14: solução de açúcar, disco de 50,10 mm, rotação de 31000 rpm e vazão de 0,55 g.s ⁻¹ | 48 |
| Figura 29 - Gráfico de Pareto..... | 49 |
| Figura A-1 - Experimento 1. | 57 |
| Figura A-2 - Duplicata do experimento 1..... | 58 |
| Figura A-3 - Experimento 2. | 59 |

| | |
|--|----|
| Figura A-4 - Duplicata do experimento 2..... | 60 |
| Figura A-5 - Experimento 3. | 61 |
| Figura A-6 - Duplicata do experimento 3..... | 62 |
| Figura A-7 - Experimento 4. | 63 |
| Figura A-8 - Duplicata do experimento 4..... | 64 |
| Figura A-9 - Experimento 5. | 65 |
| Figura A-10 - Duplicata do experimento 5..... | 66 |
| Figura A-11 - Experimento 6. | 67 |
| Figura A-12 - Duplicata do experimento 6..... | 68 |
| Figura A-13 - Experimento 7. | 69 |
| Figura A-14 - Duplicata do experimento 7..... | 70 |
| Figura A-15 - Experimento 8. | 71 |
| Figura A-16 - Duplicata do experimento 8..... | 72 |
| Figura A-17 - Experimento 9. | 73 |
| Figura A-18 - Duplicata do experimento 9..... | 74 |
| Figura A-19 - Experimento 10. | 75 |
| Figura A-20 - Duplicata do experimento 10..... | 76 |
| Figura A-21 - Experimento 11. | 77 |
| Figura A-22 - Duplicata do experimento 11..... | 78 |
| Figura A-23- Experimento 12. | 79 |
| Figura A-24 - Duplicata do experimento 12..... | 80 |
| Figura A-25 - Experimento 13. | 81 |
| Figura A-26 - Duplicata do experimento 13..... | 82 |
| Figura A-27 - Experimento 14. | 83 |
| Figura A-28 - Duplicata do experimento 14..... | 84 |
| Figura A-29 - Experimento 15. | 85 |
| Figura A-30 - Duplicata do experimento 15..... | 86 |
| Figura A-31 - Experimento 16. | 87 |
| Figura A-32 - Duplicata do experimento 16..... | 88 |
| Figura B-1 – Experimento 1 e duplicata. | 89 |
| Figura B-2 – Experimento 2 e duplicata. | 89 |
| Figura B-3 – Experimento 3 e duplicata. | 90 |
| Figura B-4 – Experimento 4 e duplicata. | 90 |

| | |
|--|----|
| Figura B-5 – Esperimento 5 e duplicata. | 90 |
| Figura B-6 – Esperimento 6 e duplicata. | 91 |
| Figura B-7 – Esperimento 7 e duplicata. | 91 |
| Figura B-8 – Esperimento 8 e duplicata. | 91 |
| Figura B-9 – Esperimento 9 e duplicata. | 92 |
| Figura B-10 – Esperimento 10 e duplicata. | 92 |
| Figura B-11 – Esperimento 11 e duplicata. | 92 |
| Figura B-12 – Esperimento 12 e duplicata. | 93 |
| Figura B-13 – Esperimento 13 e duplicata. | 93 |
| Figura B-14 – Esperimento 14 e duplicata. | 93 |
| Figura B-15 – Esperimento 15 e duplicata. | 94 |
| Figura B-16 – Esperimento 16 e duplicata. | 94 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Intervalo de diâmetro das gotas por sistema de atomização (adaptado de ROSA et al., 2003). | 31 |
| Tabela 2 - Planejamento experimental 2 ⁴ | 37 |
| Tabela C-1 – Desvio padrão para cada experimento em cada anel..... | 96 |

LISTA DE SÍMBOLOS

| | |
|-------|-------------------------------|
| V | Volume |
| D | Diâmetro |
| H | Altura |
| A | Alcance |
| μ | Viscosidade dinâmica absoluta |
| n | Rotação |
| m' | Vazão mássica |

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 15 |
| 1.1. Generalidades..... | 15 |
| 1.2. Justificativa..... | 16 |
| 2. OBJETIVO..... | 17 |
| 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 18 |
| 3.1. Secagem | 18 |
| 3.1.1. Transferência de calor no processo de secagem | 19 |
| 3.1.2. Mecanismos da transferência de calor | 19 |
| 3.1.3. Transferência de Massa | 20 |
| 3.2. <i>Spray Dryer</i> | 22 |
| 3.3. Atomização | 25 |
| 3.3.1. Bico pressurizado | 26 |
| 3.3.2. Bocal Duplo Fluido..... | 27 |
| 3.3.3. Disco rotativo | 28 |
| 3.3.4. Outros sistemas de atomização..... | 29 |
| 3.3.5. Dimensão da Gota..... | 31 |
| 3.3.6. Comportamento da Atomização, volume da câmara de secagem..... | 32 |
| 4. MATERIAL E MÉTODO | 34 |
| 5. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 42 |
| 6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES..... | 51 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 52 |
| APÊNDICE A – Massa Adsorvida..... | 56 |
| APÊNDICE B – Distribuição da Névoa..... | 89 |
| APÊNDICE C – Massa Adsorvida..... | 95 |

1. INTRODUÇÃO

1.1. Generalidades

A operação de secagem é empregada desde os primórdios da civilização em função da necessidade de se manter alimentos estocados por longos períodos de tempo. Ganhou destaque industrial com o surgimento das primeiras olarias.

A secagem é um processo no qual a umidade é retirada do produto a ser seco pelos fenômenos simultâneos de transferência de calor e massa. O primeiro dá-se com a injeção de energia no sistema, de modo a auxiliar o desprendimento da água pelo método da evaporação. Já o segundo só é possível a partir do momento em que o ar de secagem não esteja completamente saturado com água. Desse modo, a água presente no material desloca-se do meio mais concentrado para o menos concentrado (tendo em vista que o meio secante tenha umidade inferior a 100%). O fluido secante pode ser um ou mais gases e o líquido um ou mais solventes.

Esse tipo de processo é importante uma vez que com a remoção da água presente em meios sólidos (principalmente alimentos), pode-se aumentar o tempo de vida do produto, além de facilitar seu armazenamento. Os micro-organismos não são ativos com umidades abaixo de 10% em peso (GEANKOPLIS, 2008).

A principal desvantagem dessa operação é a elevada demanda de energia, agravada pelas perdas por transmissão de calor através das paredes do equipamento e pelo fluido secante na saída do processo.

O *spray dryer* é um equipamento amplamente utilizado para a obtenção direta de produtos na forma de um pó com teor de umidade igual ou inferior a 15% (ANVISA). O material pulverizado em uma câmara aquecida é seco em aproximadamente 25 segundos (GREEN & PERRY, 2007). Porém, em contrapartida, é um dos equipamentos que mais consome energia dentre todos capazes de realizar a secagem.

Outro grande problema dessa operação está na carência de dados e equações na literatura para o dimensionamento de uma câmara de secagem. Esse parâmetro é de grande importância, uma vez que define a capacidade de produção e, se inadequado ao produto, pode acarretar agregação às paredes, causando perda de eficiência e problemas ao longo do processo.

1.2. Justificativa

Os poucos dados na literatura acerca da atomização de fluidos viscosos, aliado à escassez e ao fechamento das equações de projeto para este tipo de sistema, são os fatores de maior importância para este trabalho.

Masters (2002) em seu livro que contempla exclusivamente os secadores por atomização (*spray dryers*) apresenta correlações para o dimensionamento do volume de uma câmara de secagem. Green & Perry (2007) também fornecem uma correlação similar com uma diferença no valor do volume calculado. Utilizando-se correlações algébricas de volumes de cilindro e cone truncado, observa-se que a equação recomendada por Masters (2002) aproxima-se do valor real com desvio inferior a 1%. Mesmo assim esta se apresenta muito restrita, uma vez que é apenas para câmaras de secagem na qual o diâmetro da parte cilíndrica se encontra amarrado às outras medidas e a parte cônica com angulação obrigatória de 60°.

Essa observação indica que as diferenças e imprecisões podem surgir nas literaturas acerca desta temática. Além do mais, pesquisas em artigos acadêmicos revelaram a existência de muitos estudos focados nas otimizações para produtos específicos, porém estudos dos parâmetros de projeto voltados à atomização são raros no meio científico.

2. OBJETIVO

O presente trabalho teve por objetivo principal desenvolver um método para quantificar a influência da viscosidade da alimentação no comportamento da atomização em um equipamento do tipo *spray dryer* de disco rotativo. O objetivo secundário foi determinar, em função da rotação, viscosidade, diâmetro do disco, a distância máxima da água e de uma solução de açúcar a 50% em massa pulverizadas pelo disco rotativo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Secagem

A secagem consiste na remoção de um líquido, geralmente água, que está retido em um material sólido. Pode também ser definida como a remoção da água retida em um sólido molhado para um meio secante gasoso não saturado (FOUST et al., 1982).

Esse processo opera simultaneamente com dois fenômenos de transporte muito aplicados às engenharias: a) transferência de massa, tendo em vista que o fluxo ocorrerá do meio mais concentrado para o menos concentrado, podendo-se, assim, concluir que se o fluido de secagem estiver com 100% de umidade, a secagem será ineficiente e b) transferência de calor, visando fornecer energia ao sistema para auxiliar o desprendimento da água presente no produto pela evaporação (GREEN & PERRY, 2007).

Atualmente esta é uma operação usada nas indústrias de tijolos e cerâmicas, porém pode ser encontrada com maior frequência no setor de alimentos e na cocção ou desidratação de produtos. O mercado dispõe de diversos tipos de equipamentos como secadores do tipo tambor rotativo, leito fluidizado, transportador de correia, rotativo com passagem de vapor nos tubos ou em jaqueta, *flash dryer*, secador de bandejas e *spray dryer*. (MUJUNDAR, 2006).

Um fator importante, comum a todos os tipos de equipamento, é a quantidade de energia consumida, uma vez que há a necessidade de se aumentar a temperatura do fluido secante quase que instantaneamente em alguns equipamentos, além da necessidade de se manter a temperatura em um determinado valor de modo a se garantir uma secagem adequada ao longo do processo (PREE, 2009).

Equipamentos que operam em regime de batelada, com um fluido de aquecimento à temperatura constante, é visível um rápido aumento da temperatura do material até a temperatura de volatilização. No caso de equipamentos adiabáticos, a temperatura do ponto de bolha encontra-se próxima à temperatura de bulbo úmido, sendo inicialmente esta a temperatura do processo, e ao final esta assumirá a temperatura do sólido, o qual será superior à temperatura de vaporização (McCABE et al., 2005).

3.1.1. Transferência de calor no processo de secagem

Kern (1987) cita que a transmissão de calor é uma das ciências da termodinâmica a qual visa quantificar a energia em trânsito de um corpo quente outro corpo frio. Dessa maneira, sendo possível observar que quando um quilograma água é evaporada ou condensada, a quantidade de energia envolvida no processo é a mesma. Porém haverá alteração nas taxas de transferência de calor em cada um dos processos.

Durante o processo de secagem, o material deverá receber calor latente de vaporização o suficiente para que a água evapore. Isso somente acontecerá se o produto a ser seco estiver em uma temperatura inferior à do fluido de secagem (MUJUMDAR, 2006).

3.1.2. Mecanismos da transferência de calor

Calor pode ser transportado ao produto através de três mecanismos distintos: condução, convecção e radiação (KERN, 1987).

A condução ocorre através da transferência de calor de partículas mais energéticas de uma substância para partículas adjacentes que contenham menos energia, sendo estas do mesmo tipo de material, ou não, no caso de sólidos. Para líquidos ou gases, esta se deve à colisão e difusão proveniente dos movimentos aleatórios das moléculas. Ou seja, a condução pode ocorrer em qualquer um dos três estados físicos da matéria, desde que imóvel (ÇENGEL & GHAJAR, 2011).

O processo de convecção ocorre na interface sólido/fluido, envolvendo efeitos combinados de condução e movimentação de fluidos, ou seja, o calor só é transferido por este mecanismo, uma vez que o líquido ou o gás estejam em movimento. Caso contrário, será um processo de condução (INCROPERA et al., 2008).

Por fim a radiação é o único fenômeno o qual não necessita de um meio para transmitir energia. O Sol, por exemplo, envia para a Terra calor na forma de ondas eletromagnéticas, que se locomovem na velocidade da luz e não sofrem atenuações por causa do vácuo (ÇENGEL & GHAJAR, 2011).

Mujumdar (2006) comenta que durante um processo de secagem, o produto está exposto a todos os mecanismos de transferência de calor, destacando assim que

os dados mais precisos só poderão ser obtidos a partir de coletas experimentais, uma vez que há um grau de complexidade e imprecisão nas equações desenvolvidas para estimativas do tempo de secagem.

3.1.3. Transferência de Massa

A transferência de massa é resultante da diferença ou gradiente de concentração. É a movimentação, a difusão de uma substância de uma região de alta concentração para outra de baixa concentração desse produto (TREYBAL, 1980).

O processo de secagem pode ocorrer através de diferentes mecanismos, de acordo com o material a ser seco. Sólidos fibrosos, gelatinosos ou coloides tendem a apresentar o fenômeno da difusão, no qual a umidade percorre em direção à superfície em virtude da difusão molecular, podendo expressar a velocidade desse processo a partir da Lei de Fick (FOUST et al., 1982).

No caso de materiais porosos ou granulosos, o fenômeno é conhecido por capilaridade (Figura 1), no qual a água, por diferença de pressão hidrostática, percorre os espaços abertos entre as partículas do material em direção à superfície do mesmo (FOUST et al., 1982).

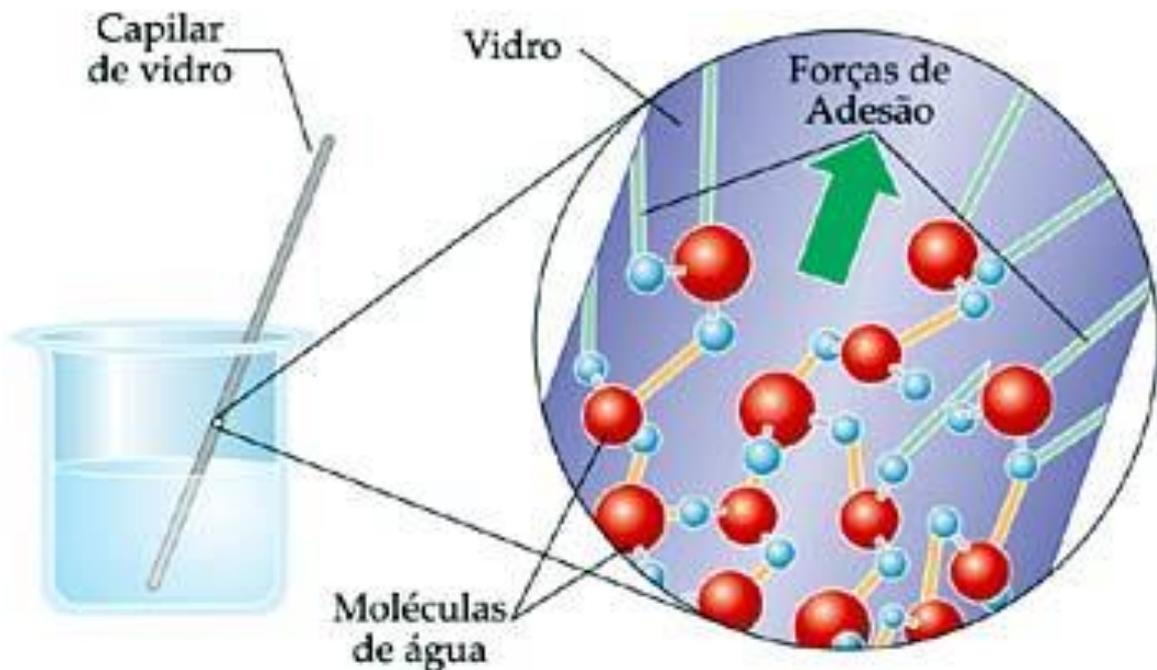


Figura 1 - Efeito da capilaridade.

Acesso: <http://interna.coceducacao.com.br>

A Figura 2 apresenta uma curva típica de secagem e o método de identificação de cada fenômeno. O trecho do ponto A ou A' até B representa o começo do processo de secagem. De B a C é a etapa de taxa constante, ou seja, remoção da água superficial do sólido. Neste estágio a temperatura do sólido é igual a temperatura de bulbo úmido do fluido secante. No ponto C surge a primeira região seca na superfície do sólido (umidade crítica) o qual se estende ao ponto E (umidade de equilíbrio) que representa o momento em que a secagem do material se encerra para aquela determinada condição do fluido desumidificante utilizado. Este momento pode ter como predominância o fenômeno da capilaridade (curva azul) ou da difusão (curva vermelha). O material também pode se comportar com ambos os fenômenos, tendo normalmente um comportamento de capilaridade (ponto C ao D) e em seguida finalizando o processo no fenômeno da difusão (ponto D ao E) (SINHA & DE, 2012).

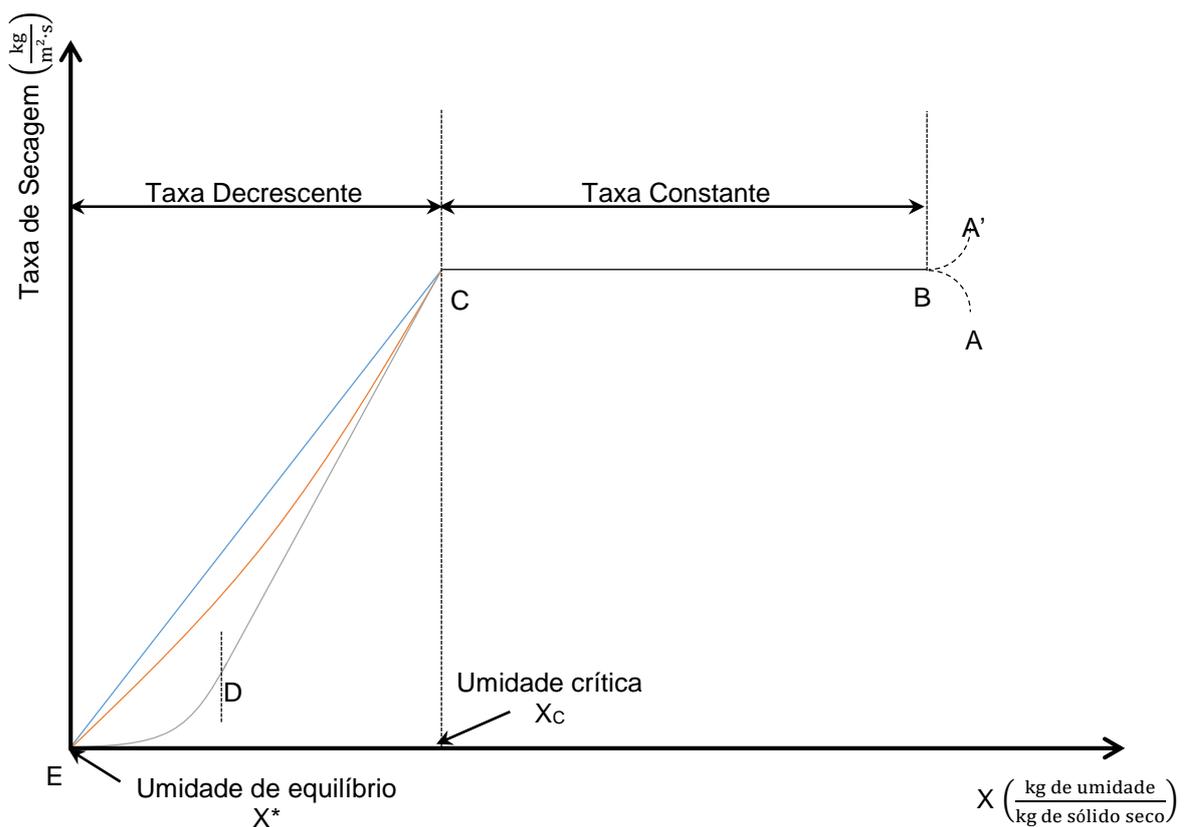


Figura 2 - Curva de secagem.

3.2. *Spray Dryer*

O *spray dryer* (Figura 3) que pode ser traduzido como secador por atomização é um equipamento que consiste de uma câmara oca, a qual recebe a solução a ser seca a partir de um dispositivo atomizador. As gotículas com o material a ser seco entram em contato com o fluido quente e com baixa umidade, sendo retiradas no fundo do equipamento em forma de pó com teor de umidade que pode ser inferior a 15% (ANVISA).



Figura 3 - *Spray dryer* da unidade SENAI “Mário Amato”, Diadema/SP. Suspensão de Cerâmica.

Esse tipo de equipamento tem uma ampla faixa de aplicação, podendo ser utilizado para a secagem de diversos produtos como café, leite, detergente, corante, pesticida, polímero, suspensão cerâmica, plasma de sangue, entre outros (FOUST et al., 1982).

O princípio básico de operação do *spray dryer* está na maximização da área de transferência de calor e de massa da solução, através da nebulização na câmara de

secagem (ROSA et al., 2003). Uma das maiores vantagens dessa operação unitária esta no baixo tempo de residência do material no interior da câmara, que é da ordem de aproximadamente 25 segundos contados a partir do momento que o material deixa o atomizador (GREEN & PERRY, 2007). Em contrapartida, apresenta um baixo rendimento, levando-se em conta que boa parte do material, principalmente ao início do processo, fica retido nas paredes do equipamento e, mais adiante, devido às baixas taxas de recuperação do ciclone (GOULA & ADAMAPOULOS, 2003). Outro problema é a operação com partículas amorfas e instáveis que podem facilitar a adsorção da umidade presente no ar. (LANGRISH, 2009)

Esse equipamento opera atomizando soluções, pastas ou suspensões, em uma câmara. Para realizar o processo de secagem, podem ser utilizados três tipos diferentes de atomizadores: bocal a pressão, bico duplo-fluido ou disco atomizador (MASTERS, 2002).

Dependendo do sistema utilizado para se promover a aspersão do produto, a câmara deverá apresentar um formato específico e o sentido do escoamento em seu interior poderá ser diferente também. Os perfis mais comuns são: o fluxo concorrente, o contracorrente ou o misto, conforme apresentado na Figura 4 (GREEN & PERRY, 2007).

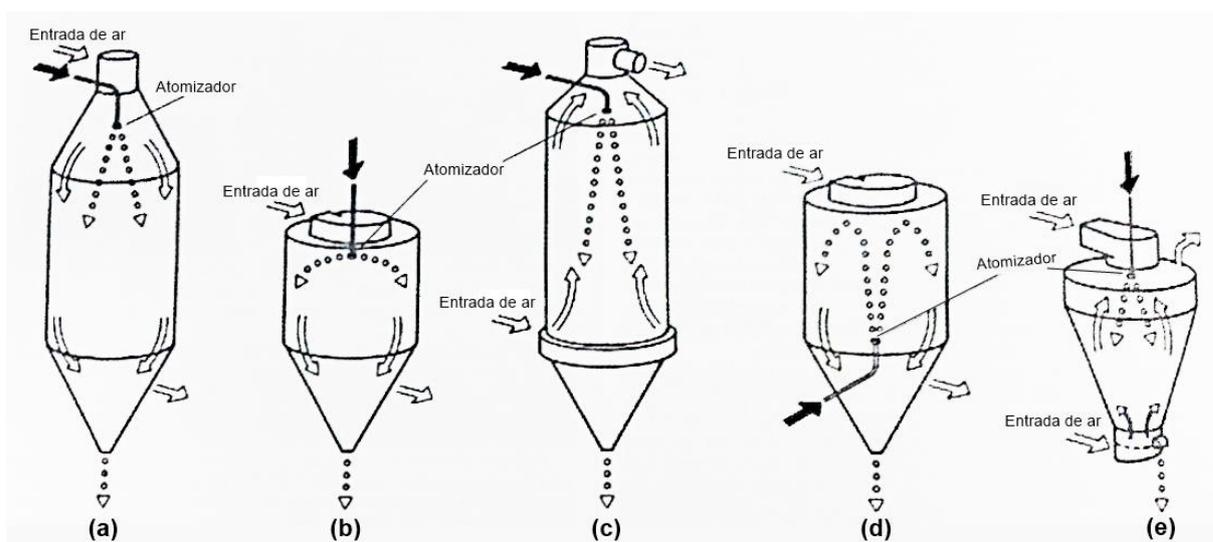


Figura 4 - Tipos de fluxos em um *spray dryer*. Sendo: (a) e (b) concorrentes, (c) contracorrente e (d) e (e) misto.

Fonte: GREEN & PERRY, 2007

O fluxo concorrente ocorre quando a entrada de ar e do produto estão no mesmo sentido. A entrada de ambos ocorre na parte superior do equipamento. O fluxo contracorrente ocorre quando as entradas encontram-se em pontos opostos no equipamento, ou seja, a alimentação entra na parte superior e sai na inferior, e o ar de secagem entra na inferior e sai pela parte superior do equipamento. O fluxo misto é caracterizado pela alimentação entrando na parte inferior do equipamento por exemplo, através de uma “lança” (Figura 5) e o ar na superior, porém ambas as saídas ocorrem na parte de baixo do *spray dryer*. Desse modo, quando a solução entra, ela primeiramente sobe (contracorrente) e desce junto com o fluido de secagem (concorrente) (MASTERS, 2002).



Figura 5 - Vista interna da câmara de secagem de um sistema de alimentação por “lança” em um *spray dryer* – unidade SENAI “Mário Amato”, Diadema/SP. Suspensão de Cerâmica.

Um dos maiores problemas do *spray dryer* é o alto consumo de energia, visto que a energia fornecida deve ser suficiente para promover a evaporação da umidade do produto (PREE, 2009).

Essa problemática vem sendo otimizada desde que as primeiras barreiras surgiram, fossem estas econômicas ou tecnológicas (MERCER, 1986; AERE, 1986). Diversos tipos de sistemas foram estudados. É comum o emprego de um trocador de calor para reaproveitar a energia que deixa o equipamento com o ar de saída (Energy Technology Support Unit, 1986). Esse tipo de abordagem tornou-se uma prática comum em empresas que apresentam este tipo de equipamento, não apenas pela redução do consumo energético para aquecimento do ar de secagem, como no quesito ambiental com a redução da emissão na queima de combustível (VELIĆ et al., 2003).

O material a ser seco é de grande importância durante o processo de secagem. Suas propriedades, como viscosidade e densidade, podem influenciar na quantidade de energia necessária para a atomização do produto e na quantidade de energia necessária para promover a remoção da água (DAGGUPATI et al., 2010).

Branan (2005) afirma que, para o projeto final deste tipo de equipamento, ensaios em uma unidade piloto devem ser realizados. Tal informação caracteriza a falta de equacionamento para o dimensionamento de um *spray dryer*.

3.3. Atomização

O processo de atomização não consiste exclusivamente da produção de gotículas através da quebra da tensão do líquido, mas também, a partir deste processo, garantir a uniformização da mistura de um líquido em um meio gasoso. Este processo é utilizado em diversas situações, sendo encontrado desde a utilização de combustível de foguete, passando por um sistema de combustão em caldeira, resfriamento evaporativo, irrigação agrícola, *spray drying*, entre outros (LEFEBVRE, 1989; GÜNTHER & WIRTH, 2013).

A atomização vem sendo amplamente estudada ao longo dos anos com raros estudos na escala industrial, acarretando no desenvolvimento de inúmeras teorias com embasamento experimental (MASTERS, 2002).

Devido às forças que agem na formação das gotículas neste equipamento aliado ao sistema atomizador, é possível analisar uma correlação simples entre os supracitados parâmetros no processo de quebra de tensão do líquido. No entanto, no caso do *spray dryer*, por se tratar de um sistema mais complexo, aproximações teóricas mostram-se ineficientes e inadequadas neste tipo de estudo (MASTERS, 2002).

De acordo com Foust et al. (1982) a etapa de atomização da secagem pode ser realizada por vários sistemas de bicos aspersores, dando ênfase ao bico pressurizado, o bico duplo-fluido e o disco rotativo.

3.3.1. Bico pressurizado

No sistema de atomização a pressão, ou bocal a pressão, ou bico pressurizado (Figura 6), a solução a ser atomizada atravessa um pequeno orifício, acarretando em uma pressão operacional na faixa de 100 a 600 kgf.cm⁻², podendo atingir a casa dos milhares de toneladas força por centímetro quadrado para fluidos viscosos, e com uma vazão máxima de 100 l.h⁻¹, acarretando na necessidade de mais bicos para operar com vazões maiores (ROSA et al., 2003; FOUST et al., 1982).

A principal vantagem desse sistema encontra-se na uniformidade no diâmetro das gotas; em contra partida, as desvantagens estão em não ser um bom sistema para soluções com sólidos suspensos e sua limitação na vazão (FOUST et al., 1982).

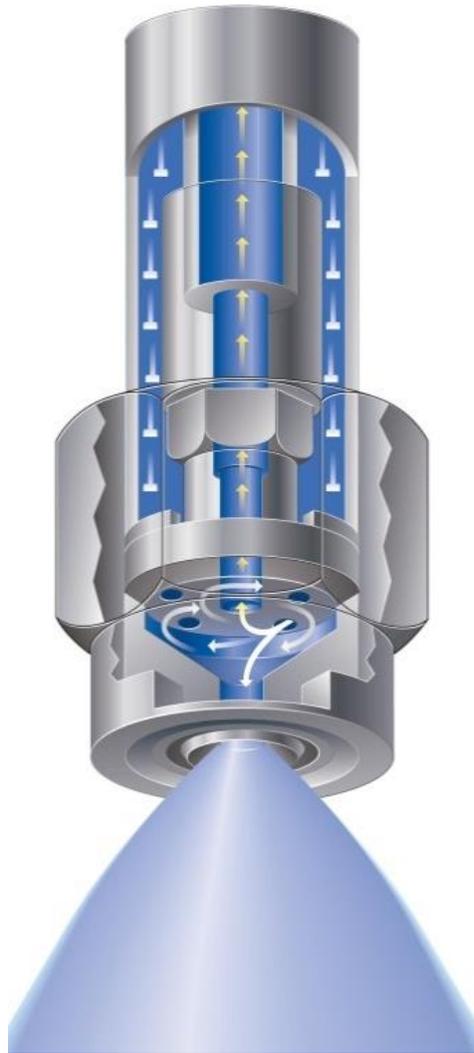


Figura 6 - Sistema de atomização por bico pressurizado.

Acesso: <http://tinyurl.com/gl2edan>

3.3.2. Bocal Duplo Fluido

O bico duplo fluido (Figura 7) é um sistema de atomização que opera a partir do arraste da solução por um fluido gasoso, normalmente ar comprimido, através de um orifício de pequeno diâmetro (MASTERS, 2002).

Dentre os sistemas principais supracitados, o sistema bi fluido é o que apresenta a maior demanda energética. Em contrapartida, é o sistema que apresenta o maior grau de controle de uniformidade e tamanho da partícula, além da possibilidade de trabalhar com vazões na ordem de $1 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ (ROSA et al., 2003).

Assim como o sistema pressurizado, sua principal desvantagem está no caso da solução apresentar materiais particulados suspensos, o que pode acarretar em

abrasão ou entupimento do orifício, no entanto, sua maior vantagem é o controle do parâmetro da gota e na capacidade de se operar com cabeças de atomização, em sistemas que contenham mais de um atomizador deste tipo acoplado no mesmo ponto (FOUST et al., 1982; ROSA et al., 2003).

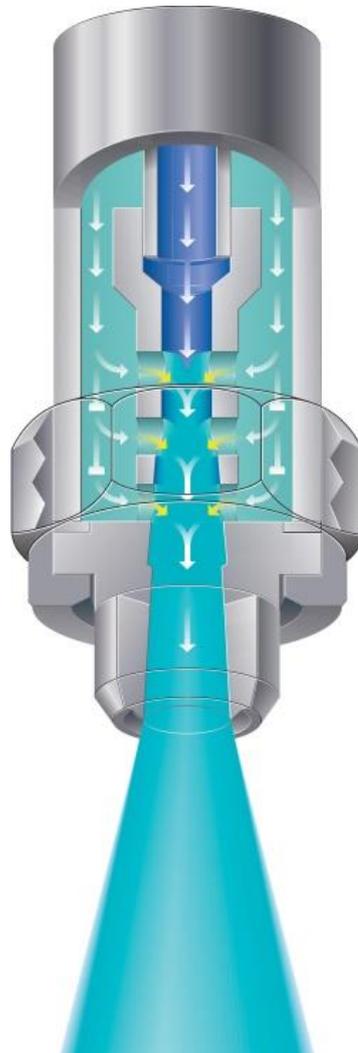


Figura 7 - Sistema de atomização por bico duplo-fluido.

Acesso: <http://tinyurl.com/jqq5l9p>

3.3.3. Disco rotativo

O princípio construtivo básico de um sistema de atomização por disco rotativo (Figura 8) consiste simplesmente de um eixo de motor com um disco anexado à sua extremidade. A capacidade de pulverização e o tamanho das gotículas é definido pela rotação deste disco (ROSA et al., 2003).

A rotação e velocidade periférica *tip speed* do disco são fatores de grande importância para o tamanho do material particulado final. Algumas literaturas especializadas indicam que um bom valor dessa velocidade varia entre 75 a 200 m.s⁻¹, com uma rotação aproximada de 20.000 rpm (BRANAN, 2005).

Uma das principais peculiaridades deste sistema está na possibilidade de se operar com uma quantidade quase infinita de configurações distintas de discos rotativos (ROSA et al., 2003).

Quanto às vantagens, a atomização por centrifugação aceita operações com altas vazões e de produtos que apresentem sólidos suspensos em sua composição. Sua principal desvantagem se dá pelo fato de não haver controle ou uniformidade no tamanho das gotas produzidas por este sistema (FOUST et al., 1982).



Figura 8 - Sistema de atomização por disco rotativo.

Acesso: <http://www.swri.org>

3.3.4. Outros sistemas de atomização

Os três sistemas apresentados nos itens anteriores são os mais usuais nas indústrias, no entanto, existem outros modelos com usos mais específicos e não

amplamente difundidos. Um exemplo é o atomizador sônico (Figura 9), o qual é utilizado para fluidos de alta viscosidade, longas cadeias carbônicas e comportamento não newtoniano. Esse sistema opera causando uma intensa vibração de alta frequência em um ponto específico do equipamento, através do auxílio de cristais piezoelétricos de cerâmica (MASTERS, 2002).

Outro sistema estudado opera a partir de uma atomização com auxílio de um gás em um sistema híbrido de bocal duplo-fluido e disco atomizador, com o intuito de se obter partículas de baixo diâmetro de materiais, como por exemplo, vidro fundido (CZISCH & FRITSCHING, 2007).

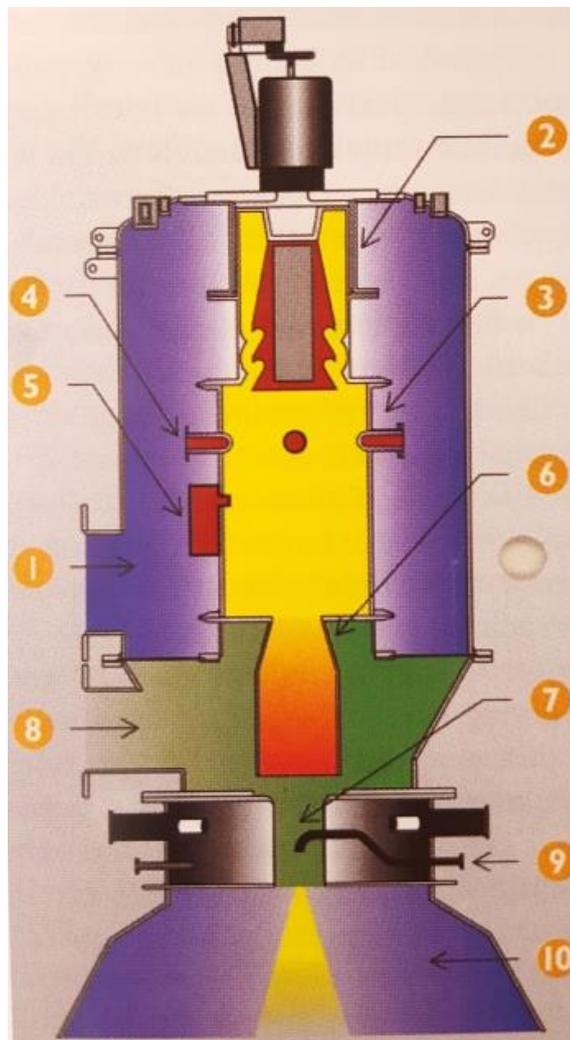


Figura 9 - Sistema de atomização por pulso (sônico) de combustão. 1) Ar de combustão; 2) válvula rotativa; 3) câmara de combustão; 4) alimentação de combustível; 5) piloto; 6) tailpipe (parte do sistema responsável pela vibração sônica); 7) zona de atomização; 8) entrada de ar; 9) alimentação do fluido e 10) câmara de secagem.

Fonte: MASTERS, 2002.

3.3.5. Dimensão da Gota

A medição do tamanho das gotas tem se apresentado como um dos parâmetros com maior dificuldade de ser determinado quantitativamente (SANTANGELO, 2010).

Babinsky & Sojka (2002) e Ju et al. (2015) apresentam a importância do tamanho da partícula quando se trata de atomização de combustível líquido.

Sistemas de atomização e sua influência na dimensão das gotas também tem sido amplamente utilizado em gerador de névoa, com o intuito de supressão de incêndio, instalado em local fixo (galpões, indústrias, residências, entre outros) ou em sistema móvel como aviões e navios. Muito destes casos tem sido testados e acrescentados às literaturas, baseados em experimentos conduzidos pela Marinha Americana (SANTANGELO, 2010; NDUZIBU et al., 1988; ADIGA et al., 2007 e MAWHINNEY, 2016).

A Tabela 1 apresenta os diferentes intervalos de diâmetro da partícula para cada tipo de sistema de atomização.

Tabela 1 - Intervalo de diâmetro das gotas por sistema de atomização (adaptado de ROSA et al., 2003).

| Sistema de atomização | Diâmetro da gota (µm) |
|------------------------------|------------------------------|
| Pressurizado | 10 ~ 800 |
| Duplo fluido | 5 ~300 |
| Rotativo | 1 ~600 |

Estudos realizados por Mezhericher et al. (2009) demonstram que a caracterização do comportamento de uma gota no interior de um *spray dryer* é algo numericamente complexo, tendo em vista que deve-se considerar parâmetros como as taxas e comportamento da secagem na gota e as turbulências associadas à câmara de secagem do equipamento que acarretarão no arraste das partículas.

Outro parâmetro de grande importância nesta etapa está na morfologia final da partícula. De grande importância para, por exemplo, a indústria de cerâmica. O formato da partícula é influenciado pelo diâmetro e pelo processo de secagem desta. Quando exposta a taxas elevadas e/ou irregulares de evaporação, o grânulo poderá

ao final apresentar algum tipo de deformação, conforme demonstrado na Figura 10 (NISHIURA et al., 2010).

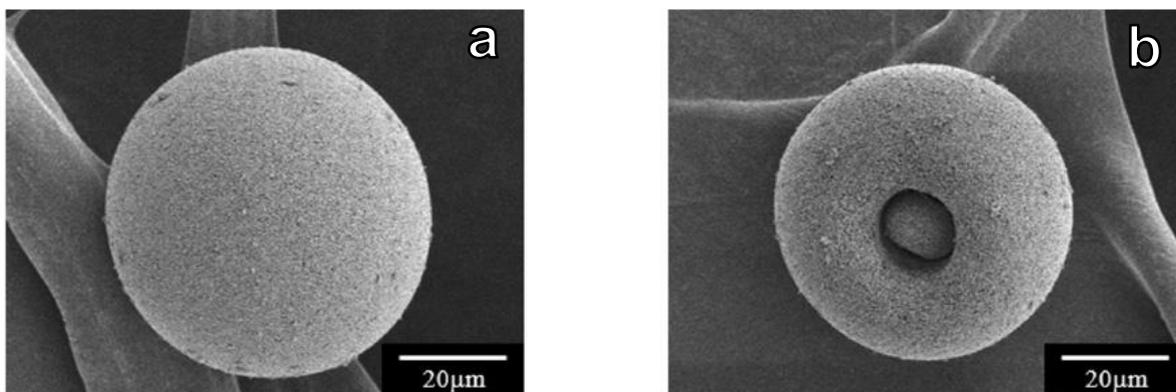


Figura 10 - Comparativo de partículas secas em um processo de atomização, a) partícula seca e oca e b) partícula seca com depressão.

Fonte: (NISHIURA et al., 2010)

3.3.6. Comportamento da Atomização, volume da câmara de secagem

Outro parâmetro importante a se observar acerca da atomização é o seu comportamento assim que deixa o sistema de aspersão. Neste momento as gotas começarão a viajar no interior da câmara, onde entrarão em contato com o ar quente e seco, promovendo assim sua secagem e posterior obtenção do produto na forma de pó (MASTERS, 2002).

Nesta etapa é importante que o material ainda úmido não atinja as paredes da câmara, tendo em vista que caso isto ocorra, haverá incrustação do produto, o que pode ocasionar em perdas de eficiência do equipamento além dos riscos de contaminação do material (GOULA & ADAMAPOULOS, 2007).

Um método de se evitar este fato é através do correto dimensionamento da câmara de secagem. No entanto, este parâmetro também está amarrado ao alcance máximo da gota após atomizada, uma vez que caso seja realizado um subdimensionamento da câmara de secagem, isto acarretará no acúmulo de produto ainda com água em sua composição nas paredes do equipamento. Outro problema está no superdimensionamento da mesma, resultando em elevados custos energéticos (GREEN & PERRY, 2007).

Masters (2002) e Green & Perry (2007) apresentam correlações matemáticas para o dimensionamento da câmara de secagem de um *spray dryer*. Ambas as referências consideram em seus cálculos a dimensão do diâmetro do cilindro igual à sua altura e também à altura da parte cônica. Ambos também amarram esta última a uma angulação de 60°.

As equações 1 e 2 são recomendadas, respectivamente, por Masters (2002) e Green & Perry (2007). A equação 03 apresenta as correlações geométricas de cálculo de volume, obtidas em Megyesy (2004).

$$V=0,7854 \cdot D^2 \cdot (D+0,2866 \cdot D) \quad (1)$$

em que

V é o volume da câmara, em m³;

D é o diâmetro, em m.

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \left(D + \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot D \right) \quad (2)$$

$$V = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot H + \frac{\pi \cdot D^2 \cdot H}{12} \quad (3)$$

sendo

H a altura, em m.

A partir dessas equações, é possível observar que, para um equipamento em escala piloto, com diâmetro de 1 m, a equação 1 apresentará um valor de 1,01 m³, ao passo que as equações 2 e 3 fornecem, respectivamente, os valores de 1,47 m³ e 1,04 m³. Em pequenas escalas, essa diferença de aproximadamente 40% dos valores obtidos por Masters (2002) e Green & Perry (2007) ainda é pequena; no entanto, aumentado o diâmetro para 5 m, obtém-se, respectivamente os valores de 126,31 m³, 183,75 m³ e 130,90 m³, tornando assim o uso da equação 2 inviável. Além da discrepância de valores, as equações não contemplam a distância percorrida pelo fluido a partir do atomizador que é função, dentre outros fatores, do material a ser seco e do tipo, dimensões e rotação do disco pulverizador.

4. MATERIAL E MÉTODO

Na realização dos experimentos foi utilizada uma unidade *spray dryer* instalada no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade Santa Cecília, localizada em Santos, São Paulo, Brasil. A Figura 11 apresenta o equipamento e a Figura 12 um esboço do sistema de coleta de dados em vista frontal.



Figura 11 - Equipamento do tipo *spray dryer* utilizado nos experimentos.

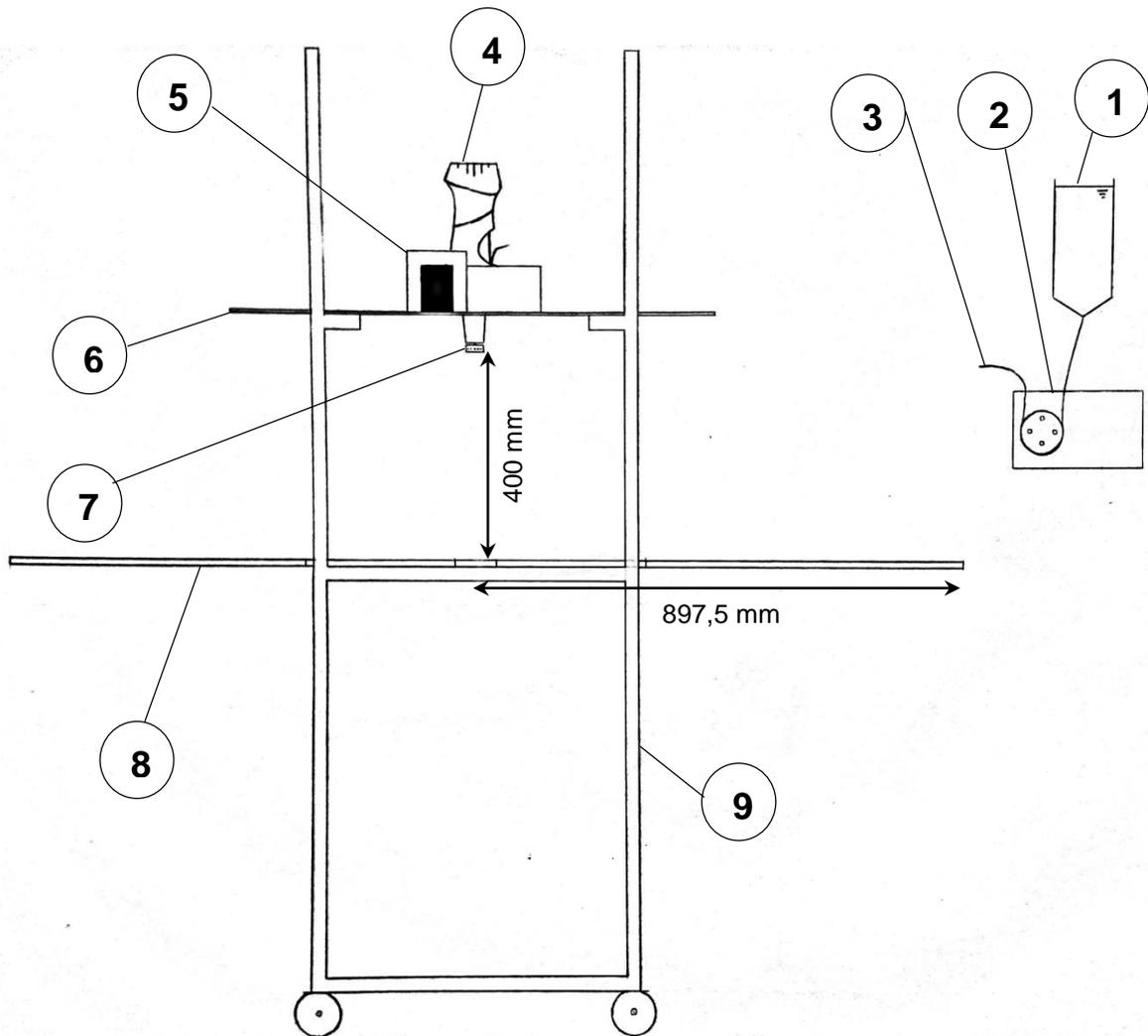


Figura 12 - Esboço do sistema utilizado. 1) Tanque de alimentação; 2) bomba peristáltica; 3) tubo de alimentação; 4) Motor; 5) voluta; 6) tampo de acrílico com diâmetro de 920 mm; 7) disco atomizador; 8) suporte de madeira em formato de estrela com oito pontas e 9) estrutura metálica móvel com altura total de 1850 mm.

O sistema de alimentação era composto por um reservatório com altura total de 230 mm na parte cilíndrica mais 35 mm na seção cônica com diâmetro interno aproximado de 100 mm e volume útil de 1,8 litros, uma bomba peristáltica com controlador de vazão e sistema de pré-aquecimento do fluido a ser seco (Figura 13)

A atomização foi realizada por um motor de tupia da marca BOSCH modelo GKF 600 Professional. O eixo foi adaptado permitindo a utilização de tipos diferentes de discos para estudo de condições operacionais diversificadas.

Os discos utilizados nos experimentos foram de 30,20 mm e 50,10 mm de diâmetro externo médio, ambos contendo 16 orifícios redondos com diâmetro médio de 3,60 mm (Figura 14).

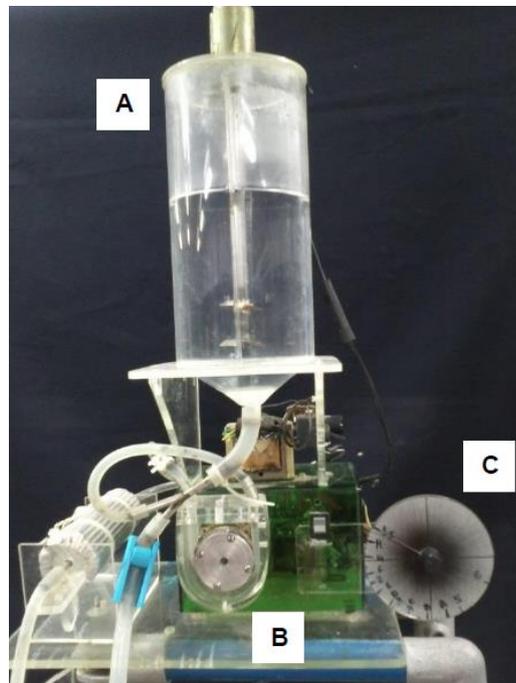


Figura 13 - Detalhes do sistema de alimentação composto por: A) Reservatório com volume de 1,8 litros; B) bomba peristáltica de 4 roletes e C) controlador de vazão da bomba peristáltica.

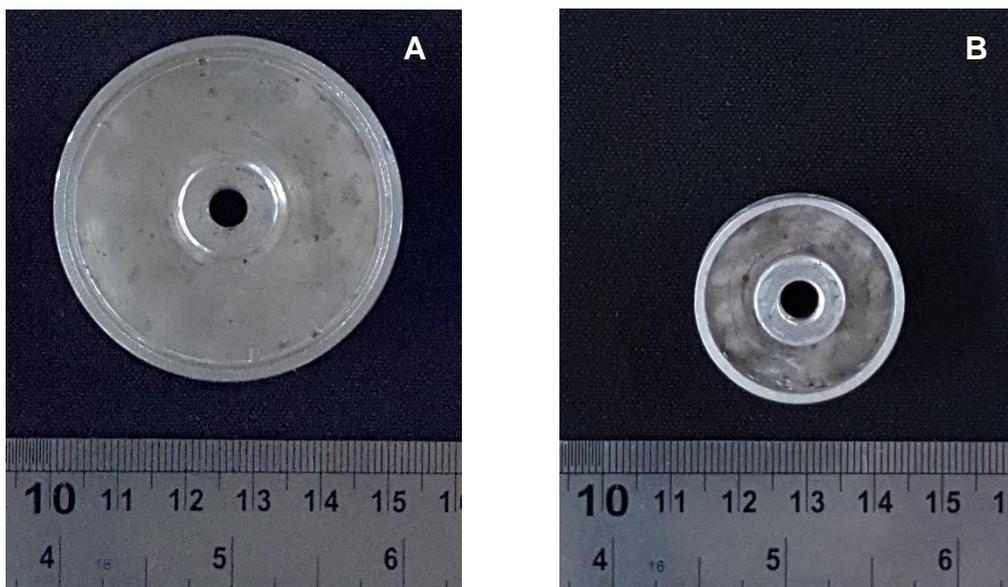


Figura 14 - Discos atomizadores utilizados nos experimentos: A) Disco com diâmetro externo de 50,20 mm e 16 orifícios de 3,6 mm e B) Disco com diâmetro externo de 30,10 mm e 16 orifícios de 3,6 mm. Escala em cm na base das fotos.

Um planejamento experimental 2^4 foi proposto, resultando em 16 ensaios realizados, conforme apresentado na Tabela 2, todos realizados em duplicatas, totalizando assim 5184 pesagens totais no experimento. O nível 2 (base) é referente a duas vazões, duas rotações, dois fluidos e dois discos com o expoente 4 das variáveis mencionadas (vazão, rotação, fluido e disco).

Tabela 2 - Planejamento experimental 2^4 .

| Experimento | Fluido | Disco (mm) | Rotação (rpm) | Vazão (g.s ⁻¹) | v _p (m.s ⁻¹) |
|-------------|---|------------|---------------|----------------------------|-------------------------------------|
| 1 | Água (1 cP) | 30,2 | 31000 | 1,34 | 49,02 |
| 2 | | | | 0,55 | |
| 3 | | | 17000 | 1,34 | 26,88 |
| 4 | | | | 0,55 | |
| 5 | | 50,1 | 31000 | 1,34 | 81,32 |
| 6 | | | | 0,55 | |
| 7 | | | 17000 | 1,34 | 44,59 |
| 8 | | | | 0,55 | |
| 9 | Solução de açúcar 50% em massa (35,31 cP) | 30,2 | 31000 | 1,34 | 49,02 |
| 10 | | | | 0,55 | |
| 11 | | | 17000 | 1,34 | 26,88 |
| 12 | | | | 0,55 | |
| 13 | | 50,1 | 31000 | 1,34 | 81,32 |
| 14 | | | | 0,55 | |
| 15 | | | 17000 | 1,34 | 44,59 |
| 16 | | | | 0,55 | |

Um dos problemas amplamente observados durante as comprovações experimentais está no elevado número de ensaios que devem ser realizados de modo a se observar algum tipo de comportamento ou parâmetro. No intuito de se reduzir essas quantidades sem haver perda de precisão nos resultados a serem observados, pode-se empregar um planejamento fatorial (NETO et al, 2010).

As duplicatas dos experimentos realizados foram utilizadas com o intuito de se observar o comportamento das variáveis nos resultados obtidos em diferentes ocasiões. Caso os resultados se demonstrem constantes ao longo das replicações

teremos então uma estrutura de dados balanceada, a qual confirmará a idiosincrasia do fenômeno observado (DIGGLE, 1988; CROWDER & HAND, 1990).

Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente com o auxílio do Software Minitab, de modo a obter um gráfico de Pareto. Este consiste de uma representação gráfica das variáveis estudadas ao longo do processo e dos efeitos das mesmas no fenômeno observado ao longo do estudo. Sua aplicação também é válida quando se tratando de análises de possíveis causas e defeitos em processos (DORO, 2004; CORTIVO, 2005).

A velocidade periférica (*tip speed*), velocidade de saída do fluido do disco, foi obtida pela equação 4.

$$V_p = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{60} \quad (4)$$

sendo

v_p a velocidade periférica, em $m \cdot s^{-1}$

D o diâmetro externo do disco, em m

n a rotação do disco, em rpm

No intuito de obter-se as respostas acerca do comportamento da névoa de atomização, o tampo de acrílico, no qual se encontra o sistema de atomização com os discos demonstrados na Figura 14, foi acomodado em uma estrutura metálica. Abaixo deste foi posicionado um suporte de madeira em formato de estrela com oito pontas com diâmetro de 1795 mm e capacidade para oitenta e um coletores sendo 10 em cada direção (totalizando oitenta) mais um localizado no centro do sistema com espaçamento médio de 76 mm entre cada coletor, 400 mm abaixo do disco atomizador. A Figura 15 apresenta um esboço em vista de planta da estrutura de madeira e a Figura 16 o sistema montado por inteiro.

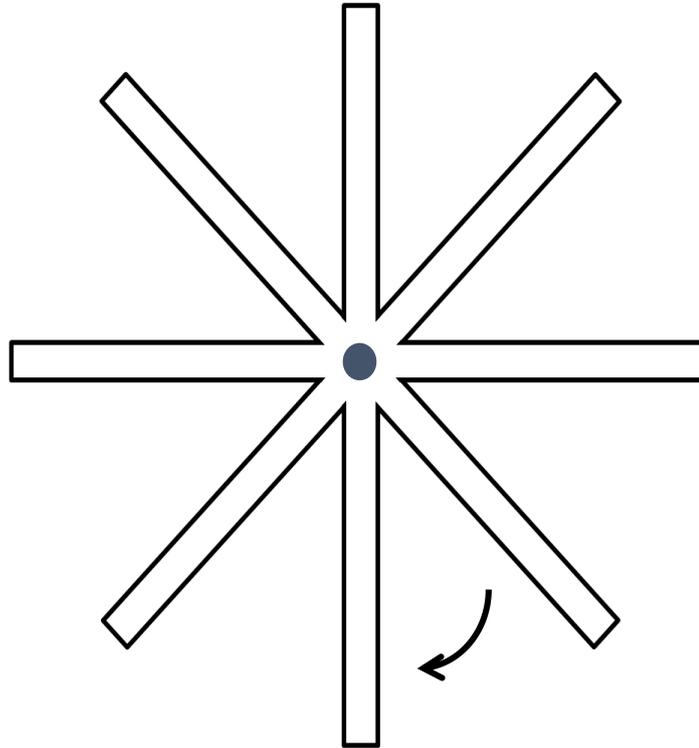


Figura 15 - Esboço em vista de planta do suporte de madeira e seu posicionamento em relação ao disco atomizador (círculo central) e o sentido de rotação do disco.

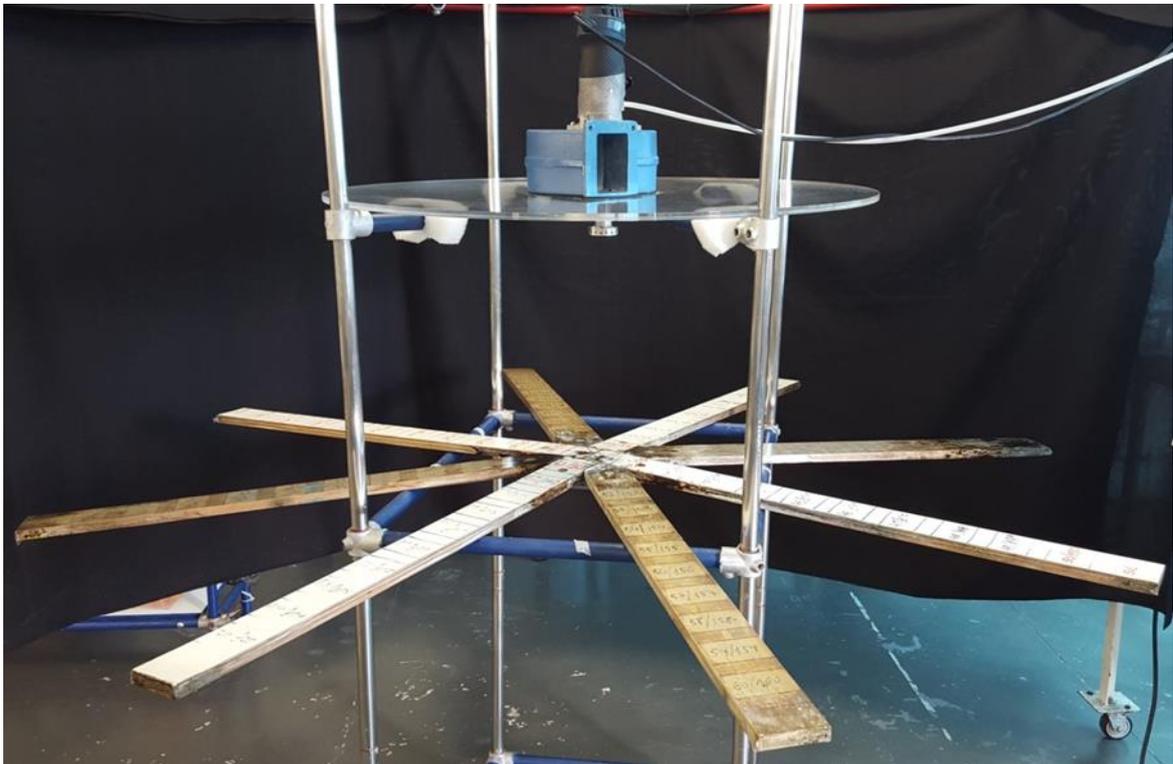


Figura 16 - Sistema de coleta dos dados.

Cada coletor consiste de uma placa de acrílico com dimensões médias de 2,8 mm x 51,15 mm x 39,75 mm. Para a obtenção da massa de fluido que alcançaria cada um dos oitenta e um pontos, utilizou-se absorvente íntimo feminino dividido em três partes (Figuras 17 e 18) o qual foi afixado em cada um dos coletores.

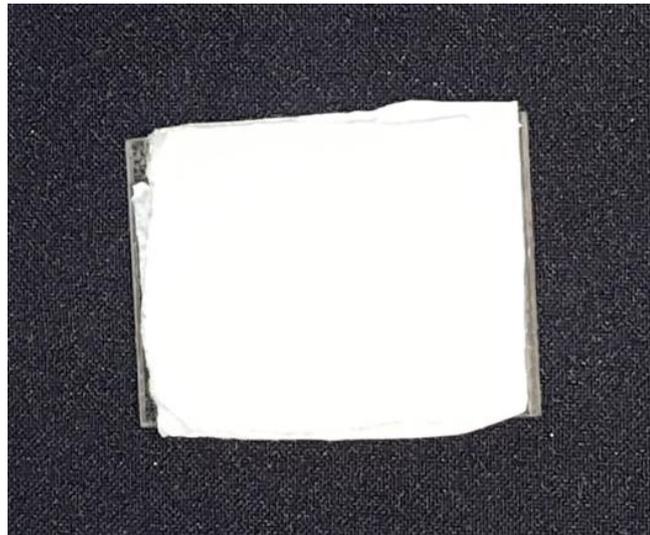


Figura 17 - Coletor utilizado nos experimentos, com dimensões de 2,8 mm x 51,15 mm x 39,75 mm.

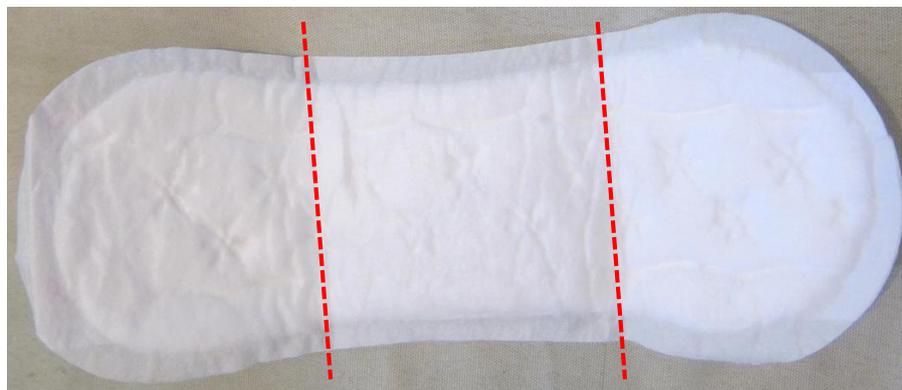


Figura 18 - Material adsorvente empregado e posição dos cortes realizados.

O procedimento experimental consistiu de:

- A) Calibrou-se a rotação da bomba peristáltica, marcando em seu controlador de vazão a posição desejada para os dois fluxos;
- B) Pesaram-se os coletores (material adsorvente) secos em balança analítica da marca Shimatzu modelo ATX224, com precisão de 0,0001 g (Figura 19).



Figura 19 - Balança utilizada nos experimentos.

- C) Distribuíram-se os 81 coletores em suas posições sobre o suporte de madeira;
- D) Com o auxílio de um tacômetro (Figura 20) ajustou-se a rotação do disco no valor desejado;



Figura 20 - Tacômetro utilizado para medir a rotação dos experimentos.

- E) A bomba peristáltica e o cronômetro foram acionados de forma concomitante;
- F) Após 10 minutos, desligou-se a bomba peristáltica e em seguida o motor do sistema de atomização;
- G) Os 81 coletores foram retirados do suporte de madeira e pesados, evitando-se o contato entre si de modo a não haver qualquer tipo de transferência de material entre estas;
- H) Após os ensaios com água os adsorventes eram secos, por no máximo três vezes, para reaproveitamento, em estufa com circulação de ar a 40 °C. Nos ensaios com solução de açúcar os adsorventes eram substituídos.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados coletados foram analisados com o auxílio do software Minitab® versão 17.1.0 para obtenção dos parâmetros significativos bem como uma equação empírica para o cálculo do alcance máximo atingido pelo produto atomizado. A visualização do comportamento da névoa pulverizada foi realizada no software Microsoft Office Excel 2010.

A Figura 21 demonstra o mapeamento dos coletores do aparato experimental bem como a posição de cada ponto de coleta nos gráficos. As massas de líquido adsorvidas nos coletores dos 16 experimentos e suas respectivas duplicatas conforme o posicionamento da Figura 21 estão quantificadas no Apêndice A.

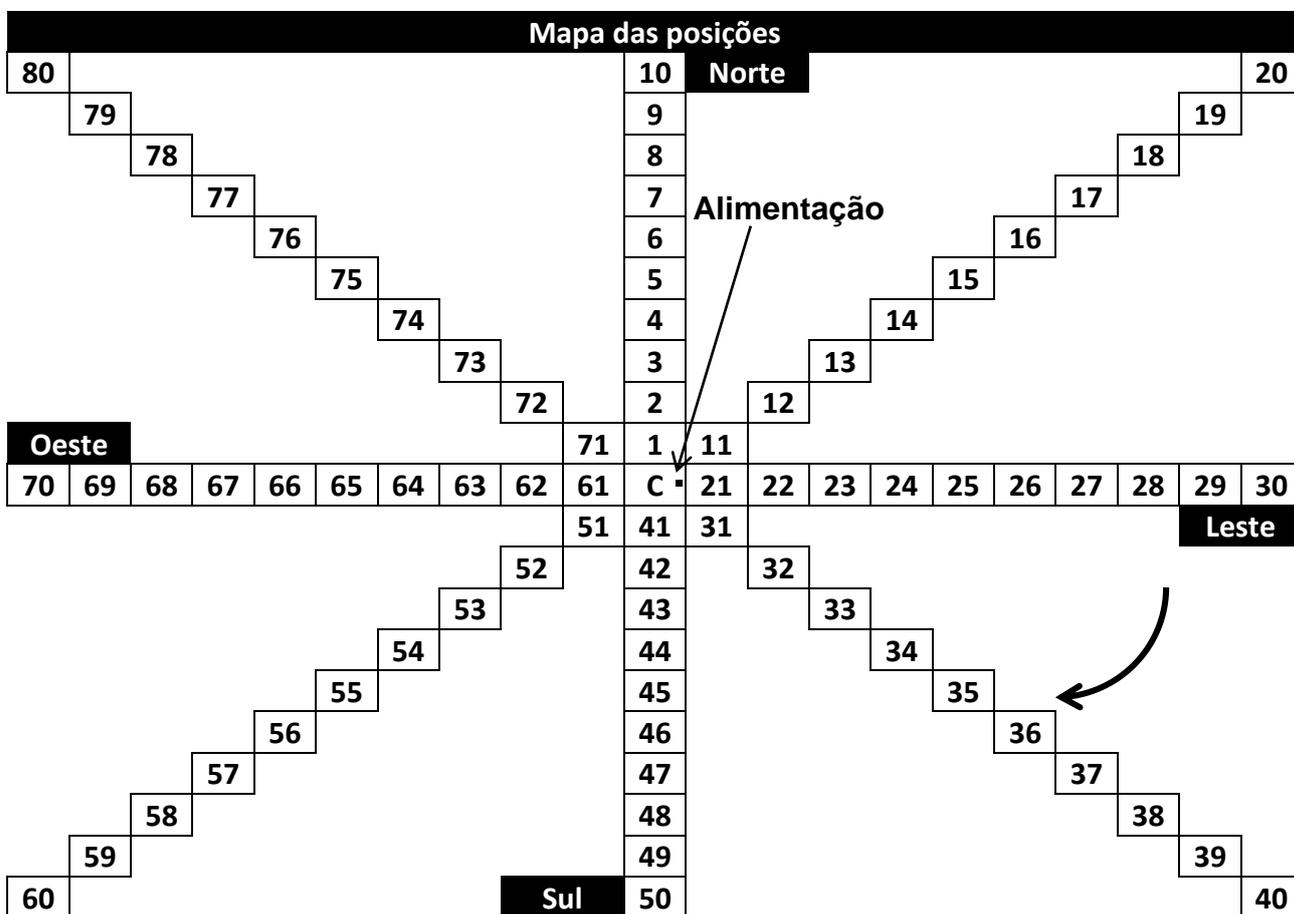


Figura 21 - Mapa do posicionamento de cada coletor. A alimentação do disco foi feita por um tubo de 3 mm de diâmetro próximo ao centro, na direção leste. O ponto próximo ao centro indica a localização da alimentação. A seta indica o sentido de rotação do disco atomizador.

Referente ao mapeamento apresentado, as Figuras de 22 a 26 apresentam as análises qualitativas comparativas do comportamento do material nebulizador pelo disco atomizador.

Adotou-se o experimento 4 (Figura 22) como referencial padrão nos comparativos devido a todas as suas condições estarem nos menores valores mensurados de cada uma das variáveis estudadas (diâmetro do rotor, rotação e vazão).

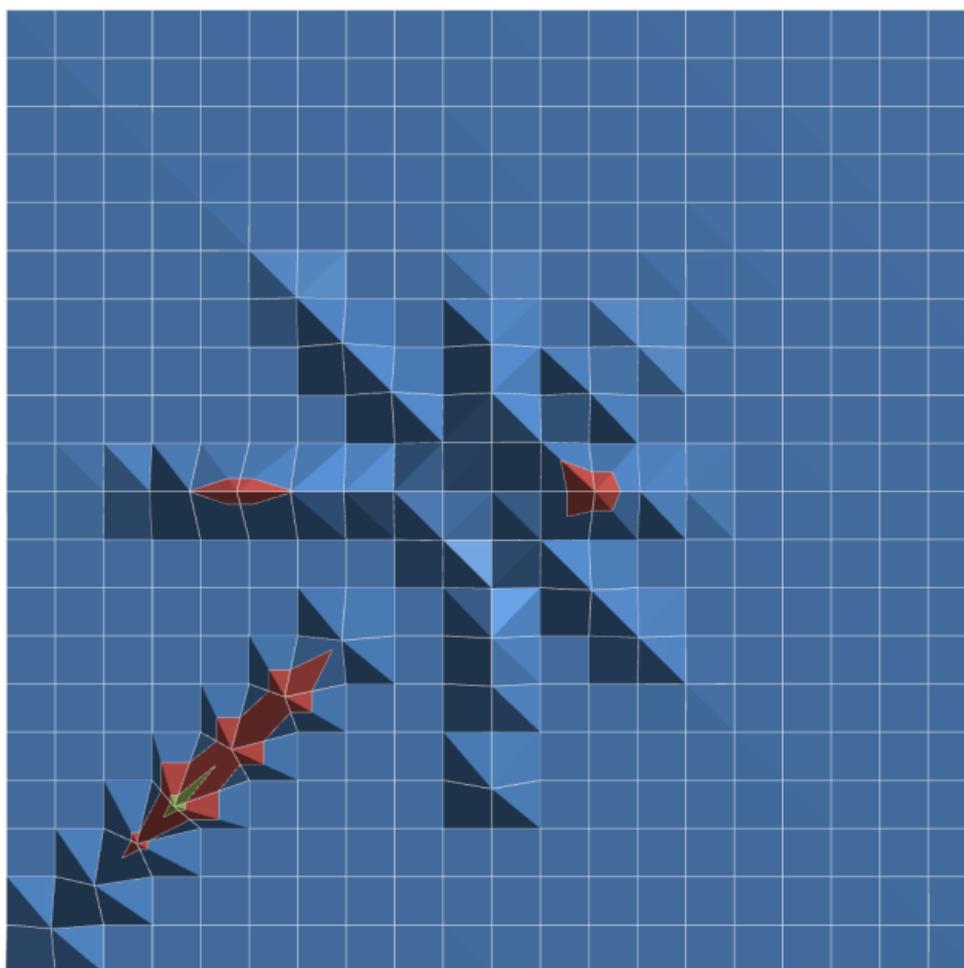


Figura 22 - Comportamento do experimento 4: Água; 30,2 mm; 17000 rpm e 0,55 g.s⁻¹.

Através do primeiro comparativo (Figura 22) é visível que a alteração da vazão de alimentação do sistema de atomização apresenta influência pouco significativa no comportamento da distribuição da atomização. Torna-se visível também que o alcance máximo sofre pouca influência em virtude da alteração dessa variável no processo.

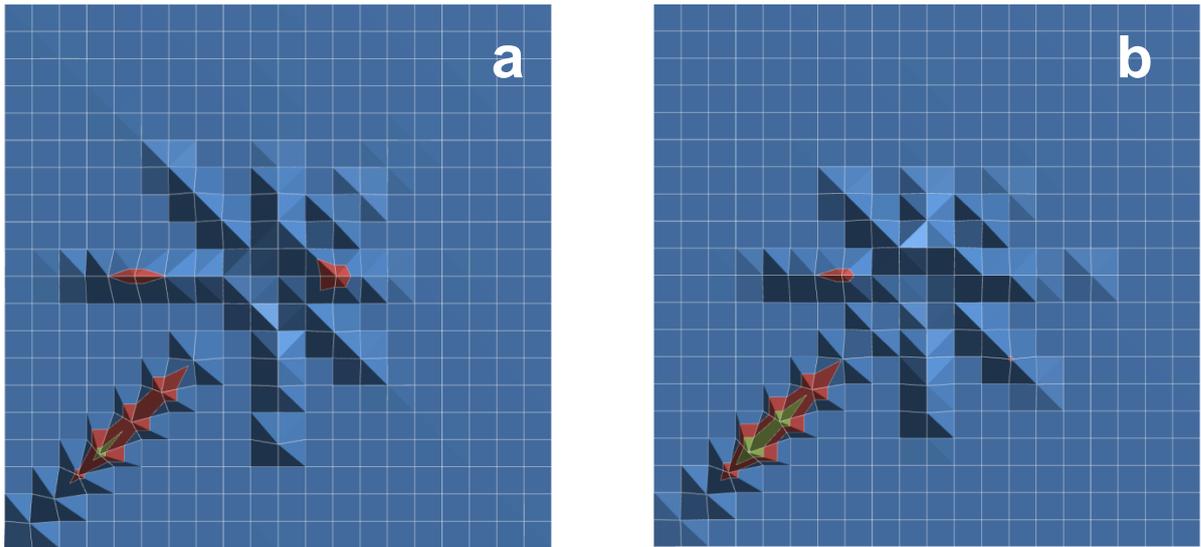


Figura 23 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) e b) 3 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e $1,34 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$).

Com o fluido de maior viscosidade, com a mesma rotação e mesmo disco a distância percorrida pelas gotas foi maior. O material nebulizador também apresentou modificação no comportamento de sua distribuição, sendo possível verificar uma maior concentração de massa no setor sudoeste para a água e setores sudoeste até noroeste para solução de açúcar (Figura 24). A alimentação por apenas um ponto, conforme a Figura 21 é, provavelmente, a responsável por essa distribuição não homogênea.

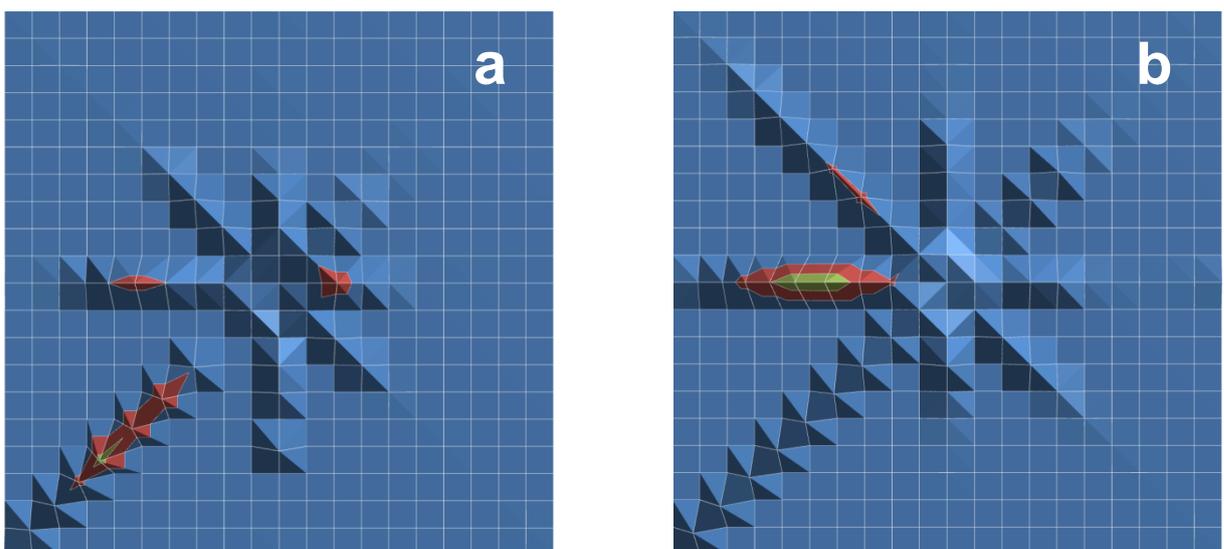


Figura 24 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) e b) 12 (Solução de Açúcar 50% em massa; 30,2 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$).

A variação do diâmetro do disco atomizador torna claro o impacto desta variável não apenas na maior distância percorrida pela gotícula de fluido como também a distribuição desta atomização pelo sistema estudado, tendo em vista que, no experimento 8, os setores oeste até nordeste apresentam grandes quantidades de material acumulado (Figura 25).

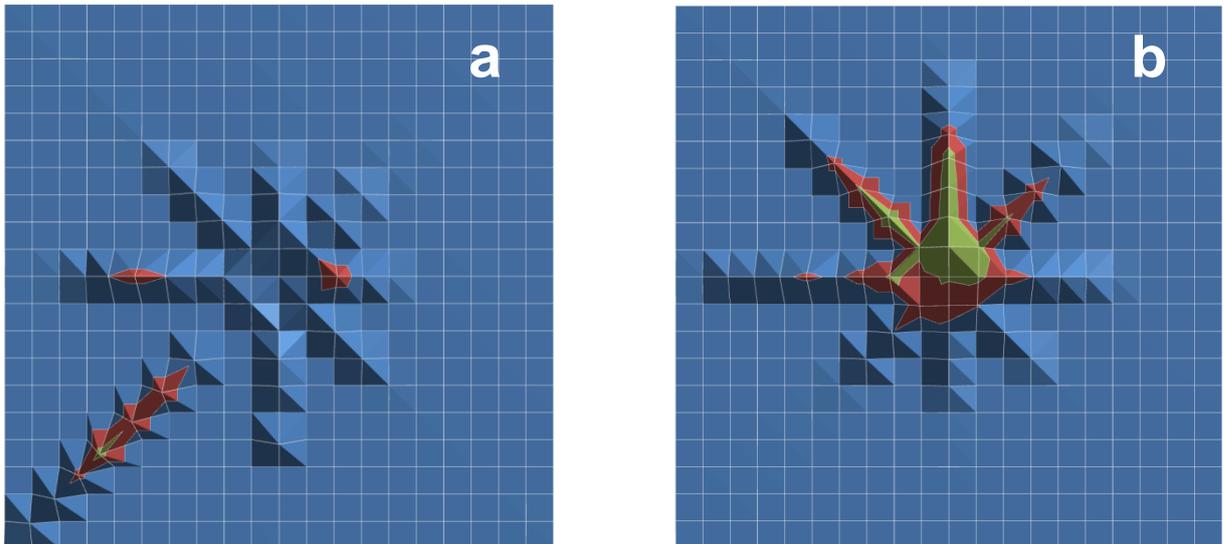


Figura 25 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) e b) 8 (Água; 50,1 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$).

A maior rotação provocou uma distribuição mais irregular do fluido (Figura 26).

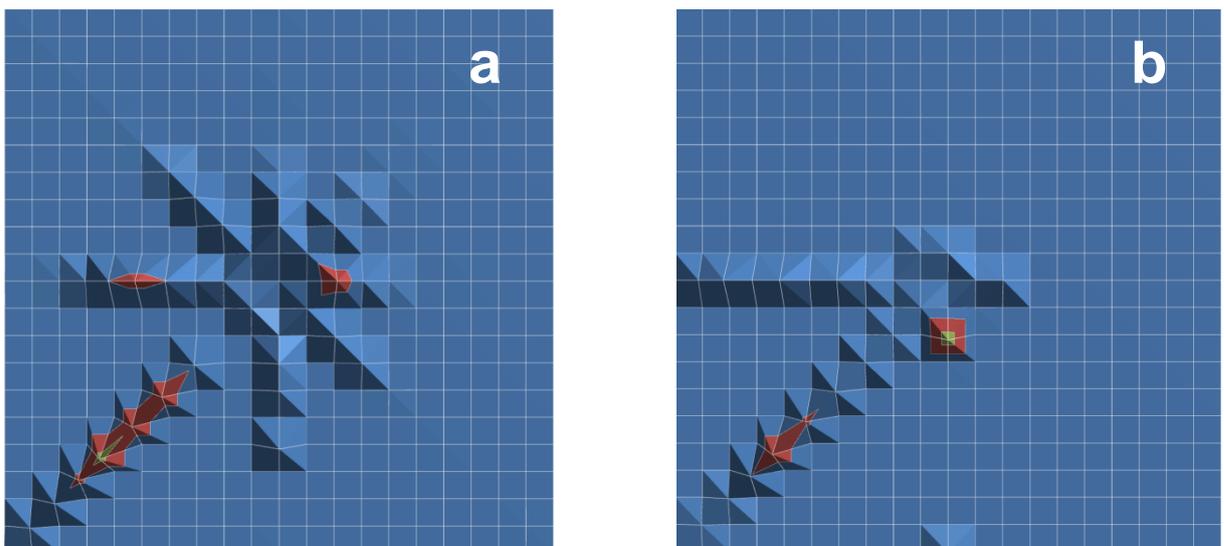


Figura 26 - Comportamento dos experimentos: a) 4 (Água; 30,2 mm; 17000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$) e b) 2 (Água; 30,2 mm; 31000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$).

Todas as análises qualitativas da distribuição da atomização no sistema foram realizadas tendo como referência a uniformidade da distribuição da massa ao longo da região observada.

Ao longo dos experimentos houve picos de massa isolados, sendo estes caracterizados pelo acúmulo de fluido na parte inferior do tampo de vidro onde o sistema de atomização se encontra instalado, resultando assim em gotejamentos de grande massa em alguns coletores. A Figura 27 apresenta os critérios e fenômenos discutidos.

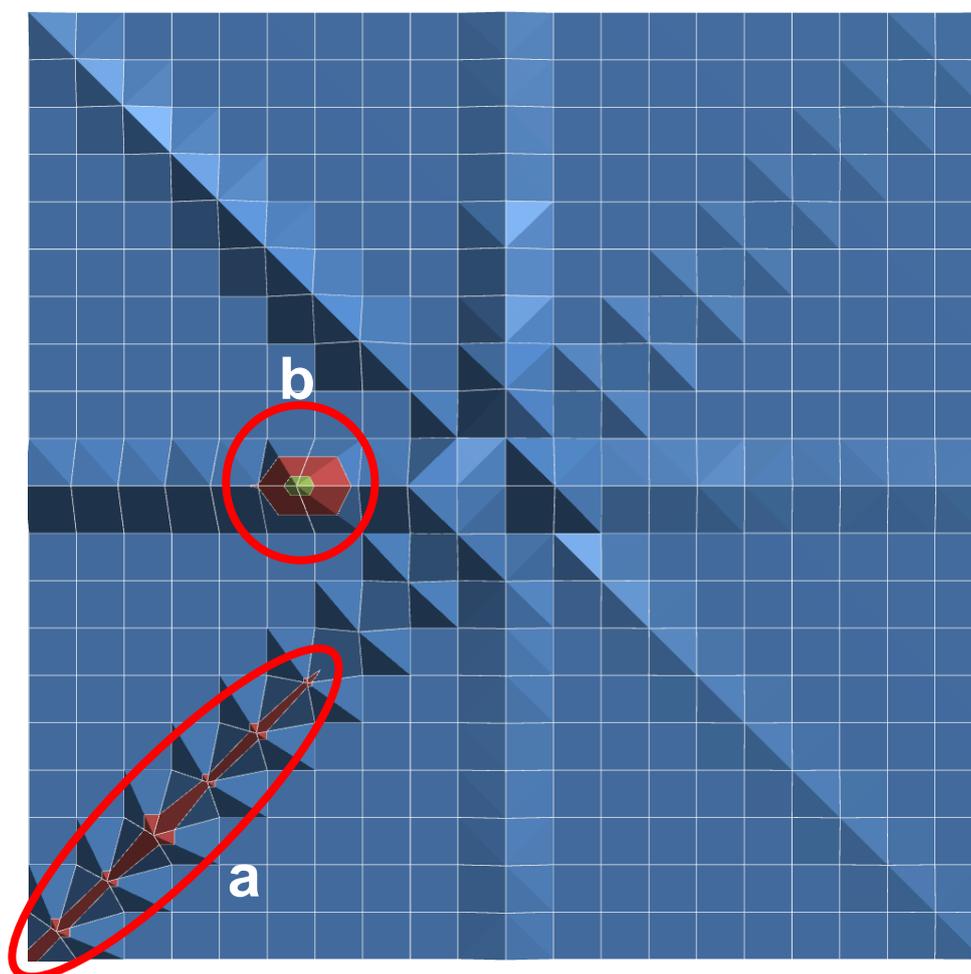


Figura 27 - Comportamento do experimento 14: Solução de açúcar 50% em massa; 50,1 mm; 31000 rpm e $0,55 \text{ g}\cdot\text{s}^{-1}$. a) Uniformidade na distribuição e b) ponto de gotejamento da tampa.

Observou-se também em todos os experimentos realizados que há um caminho preferencial ocorrendo no processo de atomização. Este fenômeno é caracterizado pelo acúmulo de massa unidirecional provocado provavelmente pela alimentação do disco em um ponto, comum nas unidades industriais.

O menor desvio padrão (Apêndice C), ou seja, a melhor distribuição, foi obtido no experimento 14 (Figura 28) referente à solução de açúcar com o disco de 50,10 mm, 31.000 rpm e vazão de 0,55 g.s⁻¹.

Na Figura 29 tem-se o gráfico de Pareto, obtido no Minitab, permitindo assim verificar quais os parâmetros que mais influenciam na maior distância percorrida pelo material.

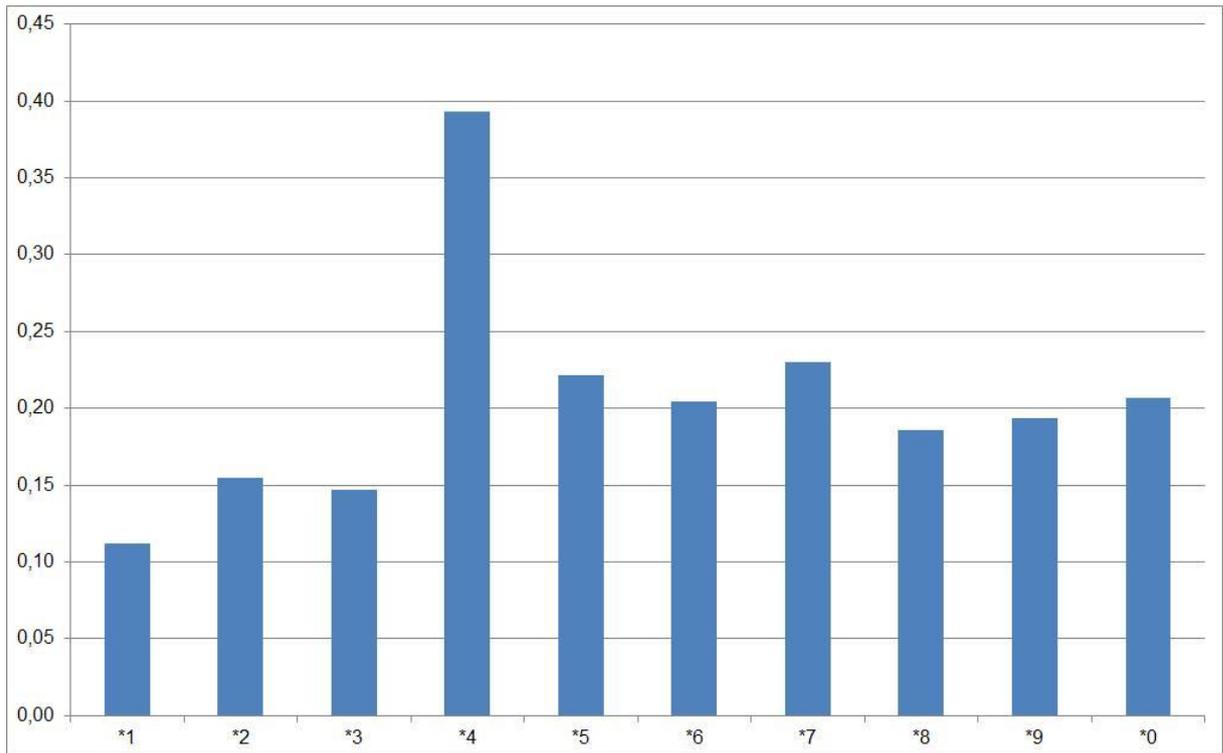


Figura 28 – Menor desvio padrão. Experimento 14: solução de açúcar, disco de 50,10 mm, rotação de 31000 rpm e vazão de 0,55 g.s⁻¹.

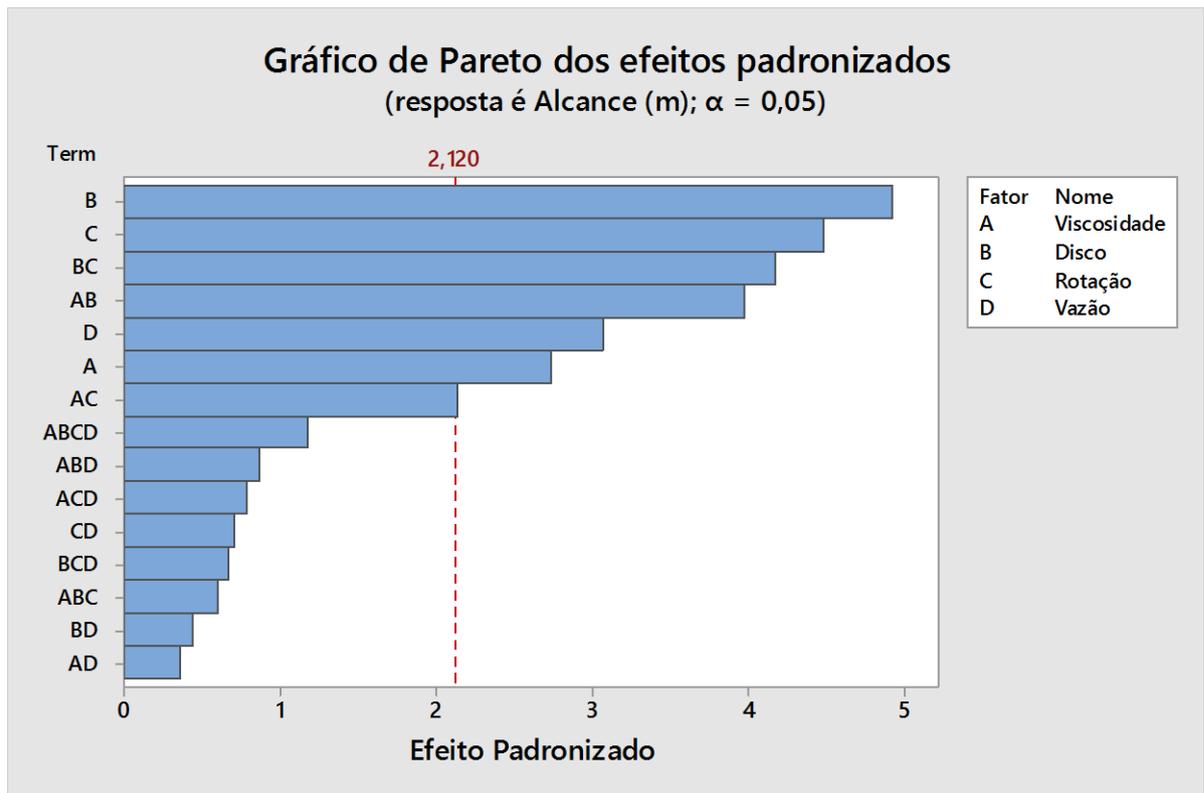


Figura 29 - Gráfico de Pareto.

Através da análise realizada, observa-se que os parâmetros os quais seus efeitos superem o valor crítico de T de Student com 95% de grau de confiança (2,120) são aqueles que de fato influenciaram na distância do fluido ao sair do disco atomizador.

Esse tipo de estudo confirma o que foi exposto na análise qualitativa da distribuição da atomização, uma vez que o diâmetro do disco utilizado no sistema apresenta uma maior influência no alcance máximo da partícula.

Com base no exposto pela supracitada Figura 24, foi possível desenvolver a equação 5 empírica, ou seja, válida somente dentro dos limites experimentais.

$$A = 1,714 - 0,499 \cdot \mu - 0,0435 \cdot D - 4,5 \times 10^{-5} \cdot n - 0,192 \cdot \dot{m} + 1,3 \times 10^{-3} \cdot \mu \cdot D + 10^{-6} \cdot \mu \cdot n + 10^{-6} \cdot D \cdot n \quad (5)$$

Válida para disco de 30,2 e 50,1 mm, viscosidade de 1 e 35,31 cP, rotação de 17000 e 31000 rpm e vazão de 0,55 e 1,34 g.s⁻¹.

sendo

A o alcance máximo, em m;

μ a viscosidade dinâmica absoluta do fluido, em cP;

D o diâmetro do disco atomizador, em mm;

n a rotação do disco atomizador, em rpm;

\dot{m} a vazão mássica de alimentação do sistema, em g/s.

Essa equação permite calcular qual deve ser o menor diâmetro de uma câmara de secagem de tipo *spray dryer* de disco rotativo, evitando-se assim o acúmulo de material ainda úmido nas paredes do equipamento.

O fato de ter-se adotado as maiores massas como os pontos limitantes do raio se dá pelo pressuposto de que a partir deste ponto, a quantidade de material particulado presente será menor e facilmente carregada pelo fluido secante utilizado no sistema o qual sempre ataca a névoa em ponto tangencial à circunferência formada por esta.

O método desenvolvido para as análises demonstrou-se eficiente para análises qualitativas e quantitativas da eficiência da distribuição do material ao longo dos diâmetros definidos.

Esse parâmetro pôde ser observado uma vez que permitiu a obtenção do equacionamento da nebulização que deixou o sistema bem como a observação visual do como esta se comportaria, por exemplo, no interior de uma câmara de secagem.

6. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O estudo permitiu as seguintes conclusões:

- a) A viscosidade e o diâmetro do disco atomizador apresentaram forte influência quanto ao comportamento e o alcance máximo de um fluido nebulizador.
- b) Análises fatoriais dos experimentos demonstraram que as 4 variáveis estudadas influenciam na distância máxima percorrida pela gotícula expelida pelo sistema nebulizador, bem como a interação entre diâmetro do disco, rotação e viscosidade. No caso da vazão, a interação desse parâmetro com os outros, apresentou influência não significativa no processo e, analisado individualmente e qualitativamente, demonstrou-se não relevante quanto à distribuição do material.
- c) A equação obtida permite, para as condições estudadas, quantificar o máximo espaço percorrido pela partícula e, conseqüentemente, o mínimo diâmetro que a câmara de secagem deve ter, de modo a evitar incrustação e contaminação das paredes desta com o material úmido.
- d) O método desenvolvido e aplicado possibilita quantificar e mapear o comportamento, a distribuição, o alcance e a concentração de massa em cada um dos raios definidos para o experimento.

Sugere-se para futuros estudos:

- a) Empregar um sistema de coleta sem vãos intermediários e com distribuição equidistante de todos os pontos de acomodação dos coletores;
- b) Utilizar um produto de maior viscosidade;
- c) Variar a distância na vertical entre o disco atomizador e o sistema de coleta;
- d) Verificar a influência de outras propriedades no sistema de atomização;
- e) Instalar pelo menos mais um ponto de alimentação da suspensão visando uma maior homogeneidade do material a ser seco;
- f) Inverter o sentido de rotação do motor;
- g) Instalar mais pontos de alimentação ao disco atomizador;
- h) Realizar testes com valores intermediários das variáveis estudadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J.; **Transferência de Calor e Massa: uma abordagem prática**. 4ª Ed., McGraw-Hill, 2011.

ADIGA, K.C.; HATCHES Jr., R.F.; SHEINSON, R.S.; WILLIAMS, F.W.; AYERS, S.; **A computational and experimental study of ultra fine water mist as a total flooding agent**. Fire Safety, 42, 2007.

AERE. H; **Heat recovery from a boiler exhaust to pre-heat air for a spray dryer, Heat Recovery Systems**. Volume 6, 1986.

ANVISA, **CNNPA nº12 de 1978**.

BABINSKY, E.; SOJKA, P. E.; **Modeling drop size distributions, Prog. Energy Combustion Science**. 28, 2002.

BRANAN, C.; **Rules of Thumb for Chemical Engineers**. 4th Ed., Gulf Professional Publishing, Oxford, UK, 2005.

CORTIVO, Z., D., **Aplicação do Controle Estatístico de Processo em Sequências Curtas de Produção e Análise Estatística de Processo Através do Planejamento Econômico**. Dissertação, Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2005.

CROWDER, M.J. ; HAND, D.J. **Analysis of repeated measures**. London: Chapman; Hall, 256p, 1990.

CZISCH, C.; FRITSCHING, U.; **Atomizer design for viscous-melt atomization**. Materials Science and Engineering A, 2007.

DAGGUPATI, V. N.; NATERER, G. F.; GABRIEL, K. S.; GRAVELSINS, R. J.; WANG, Z. L.; **Effects of atomization conditions and flow rates on spray drying for cupric chloride particle formation**. Hydrogen Energy, 2010.

DIGGLE, P.J. **An approach to the analysis of repeated measurements**. Biometrics, v.44, p.959-971, 1988.

DORO, M., M., **Sistemática para Implantação da Garantia da Qualidade em Empresas Montadoras de Placas de Circuito Impresso**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

ENERGY TECHNOLOGY SUPPORT UNIT, **Heat recovery from a spray dryer using a run-around coil system: A Demonstration Project at the Clayton Aniline Company Ltd**. Manchester, U.K.; Harwell; UK; 1986.

FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios das Operações Unitárias**. 2ª ed., Trad. De Horácio Macedo, Rio de Janeiro: Ed. Guanabara Dois, 1982.

GEANKOPOLIS, J. C.; **Transport process and separation process principles includes unit operations**. 4. Ed, Westford, Prentice Hall, 2008, 1026 p.

GOULA, A. M.; ADAMAPOULOS, K. G.; **Influence of Spray Drying Conditions on Residue Accumulation—Simulation Using CFD**. Drying Technology, 2007.

GREEN, D. W.; PERRY, R. H.; **Perry's chemical engineers' handbook**. 8th ed., New York, McGraw-Hill, 2007

GÜNTHER, A.; WIRTH, K. –E.; **Evaporation phenomena in superheated atomization and its impact on the generated spray**. International Journal of Heat and Mass Transfer, 64, 2013.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S.; **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**. 6ª Ed., Rio de Janeiro, LTC, 2008.

JU, D.; ZHANG, T.; XIAO, J.; QIAO, X.; HUANG, Z.; **Effect of droplet sizes on evaporation of a bi-component droplet at DME (dimethyl ether)/n-heptane-fueled engine conditions.** Energy, 86, 2015.

KERN, D.Q.; **Processos de Transmissão de Calor.** Editora Guanabara, Trad. De Adir M. Luiz Rio de Janeiro, 1987, 671 p.

LANGRISH, T.; **Applying Mass and Energy Balances to Spray Drying.** AIChE/CEP, Dezembro, 2009.

LEFEBVRE, A. H.; **Atomization and Sprays.** 1989.

MASTERS, K.; **Spray Drying in Practice.** SprayDryConsult International ApS, Denmark, 2002.

MAWHINNEY, J. R.; **Engineering Criteria for Water Mist Fire Suppression System.** National Research Council Canada, Disponível em < <http://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0023.pdf> > Acessado em 07/02/2016.

McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P.; **Unit Operations of Chemical Engineering.** 7th Ed., Mc-Graw-Hill, 2005, 1140 p.

MEGYESY, E. F.; **Pressure Vessel Handbook.** 13th Ed., Pressure Vessel Publishing Inc., 2004.

MERCER, A. C.; **Improving the energy efficiency of industrial spray dryers, Heat Recovery Systems.** Volume 6, 1986.

MEZHERICHER, M.; LEVY, A.; BORDE, I.; **Modeling of Droplet Drying in Spray Chambers Using 2D and 3D Computational Fluid Dynamics.** Drying Technology, 27, 2009.

MUJUMDAR, A. S.; **Handbook of Industrial Drying**. Mujumdar S. A. ed.. 3 ed, Lodz, CRC Press, 2006, 742p.

NISHIURA, D.; SHIMOSAKA, A.; SHIRAKAWA, Y.; HIDAKA, J.; **Simulation of Drying of Particulate Suspension in Spray-Drying Granulation Process**. Journal of Chemical Engineering of Japan, Vol. 43, 2010.

NDUZIBU, C. C.; ANANTH, R.; TATEM, P. A.; MOTEVALLI, V.; **On water mist fire suppression mechanisms in a gaseous diffusion flame**. Fire Safety Journal, 31, 1998.

NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos**. 4^a ed, Porto Alegre, Bookman, 2010.

PREE, J. L., **Building a better dryer**. Chemical Engineering, Dezembro 2009.

ROSA, E. D.; TSUKADA, M.; FREITAS, L. A. P. **Secagem por atomização na indústria alimentícia: Fundamentos e aplicações**. 2003, 12p.

SANTANGELO, P. E.; **Characterization of high-pressure water-mist spray: Experimental analysis of droplet size and dispersion**. Experimental and Thermal Fluid Science, 34, 2010.

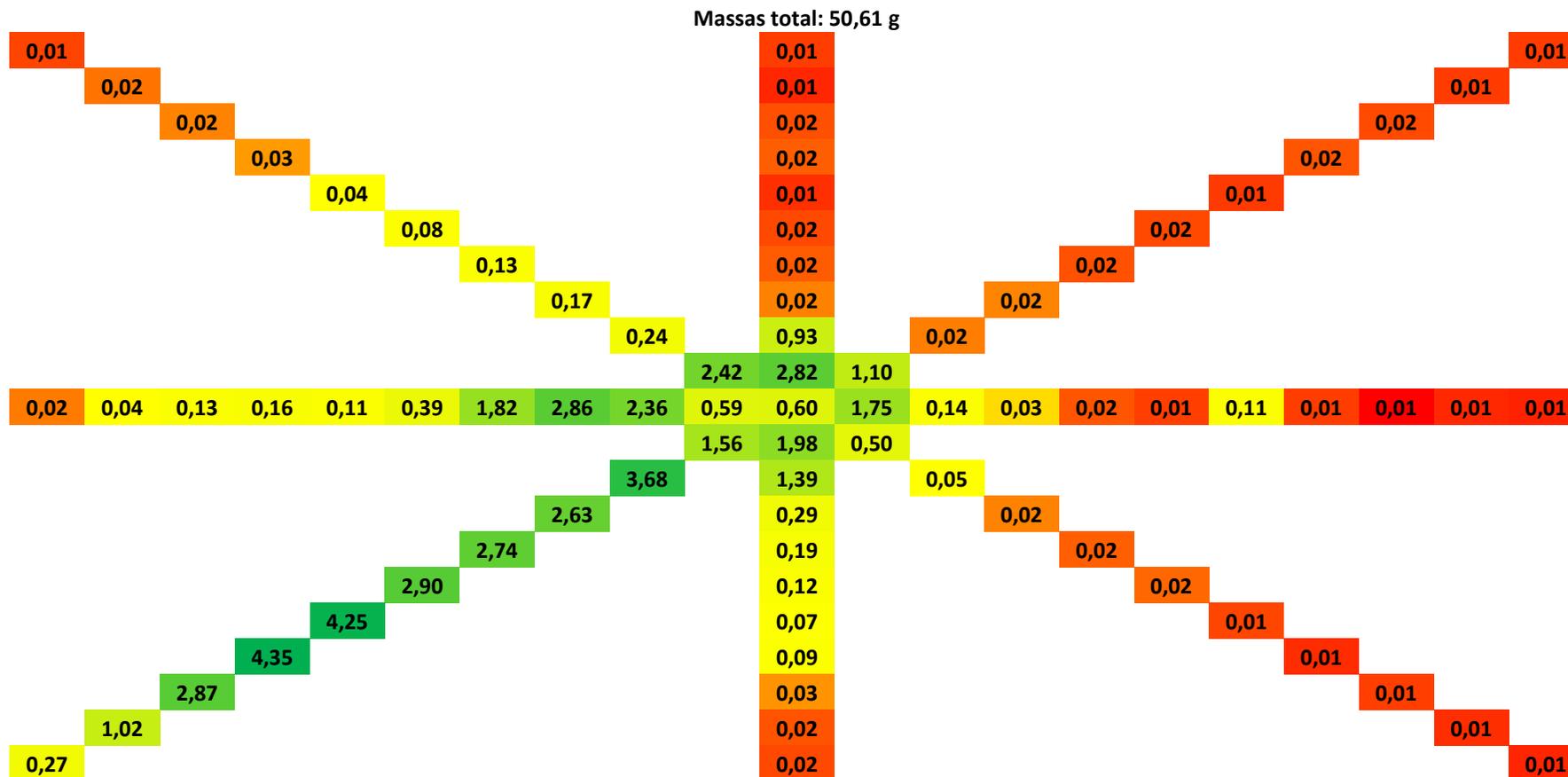
SINHA, A. P.; DE, P.; **Mass Transfer: Principles and operations**. PHI Learning Private Limited, New Delhi, 2012.

TREYBAL, R. E., **Mass transfer operations**. 3 ed., Singapore, McGraw-Hill, 1980.

VELIĆ, D.; BILIĆ, M.; TOMAS, S.; PLANINIĆ, M.; **Simulation, calculation and possibilities of energy saving in spray drying process**, Applied Thermal Engineering, volume 23, 2003.

APÊNDICE A – Massa Adsorvida

As Figuras A-1 até A-32 apresentam a quantidade de massa adsorvida em cada coletor durante os experimentos realizados.



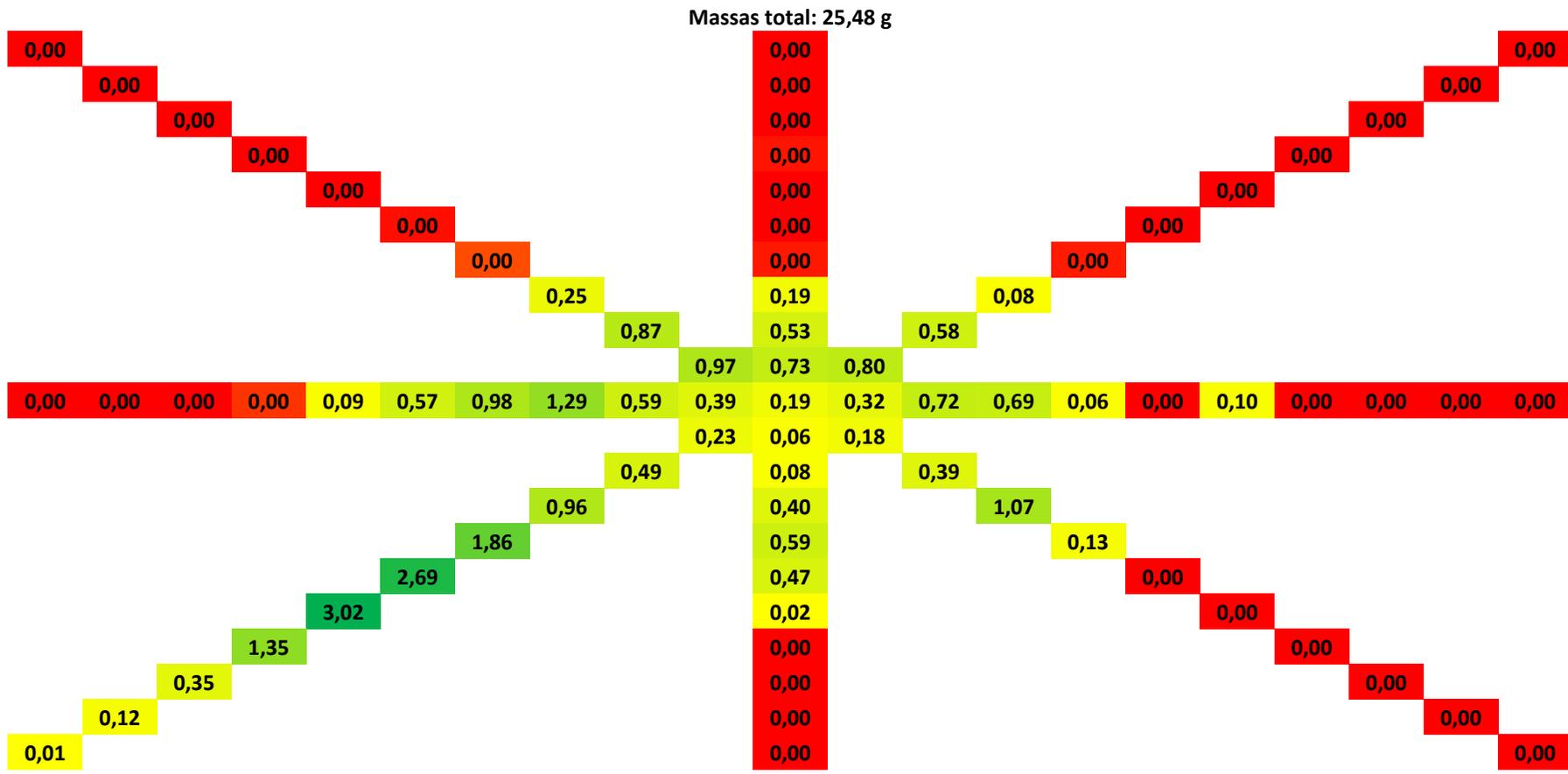


Figura A-6 - Duplicata do experimento 3.

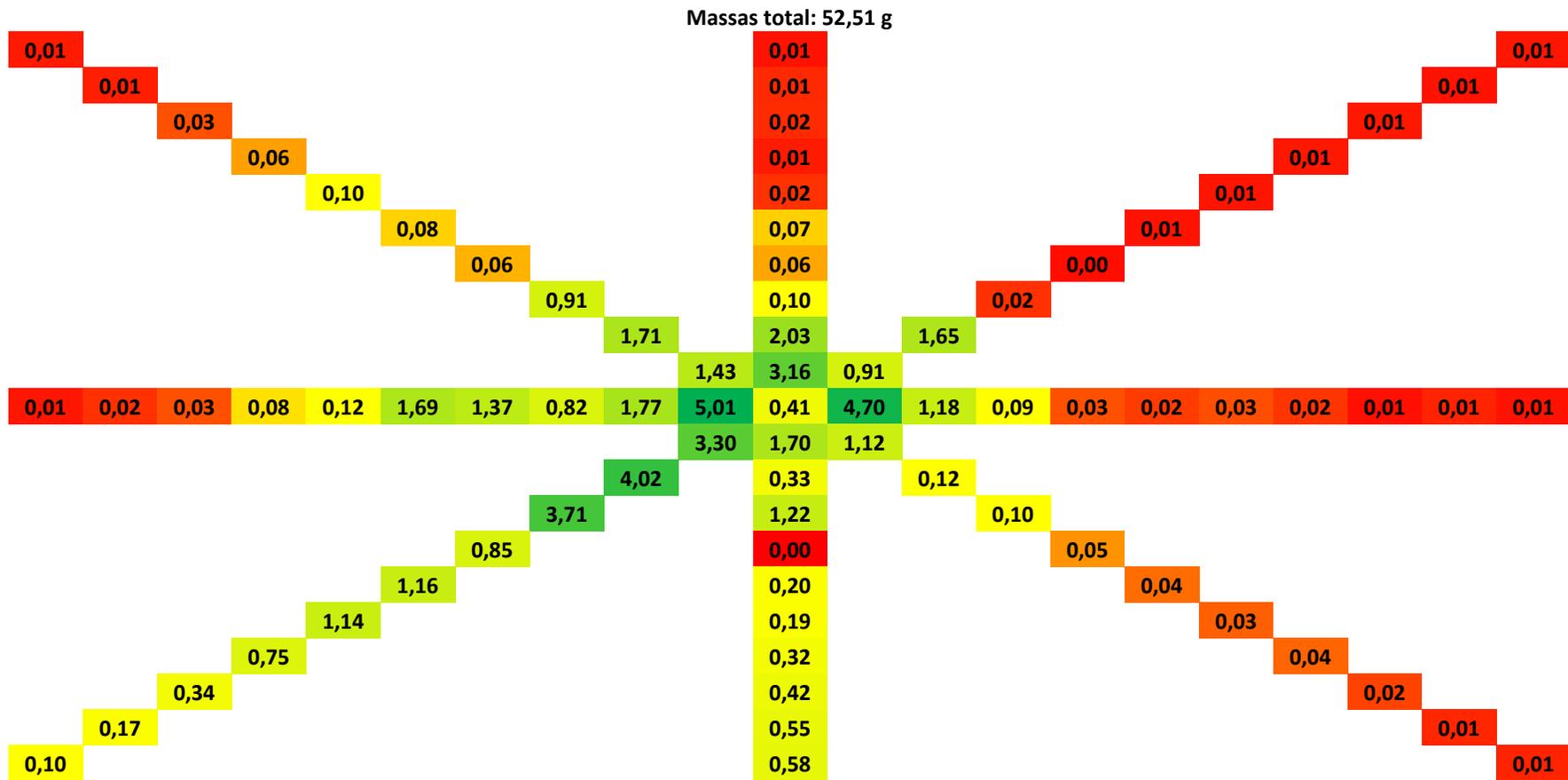


Figura A-9 - Experimento 5.

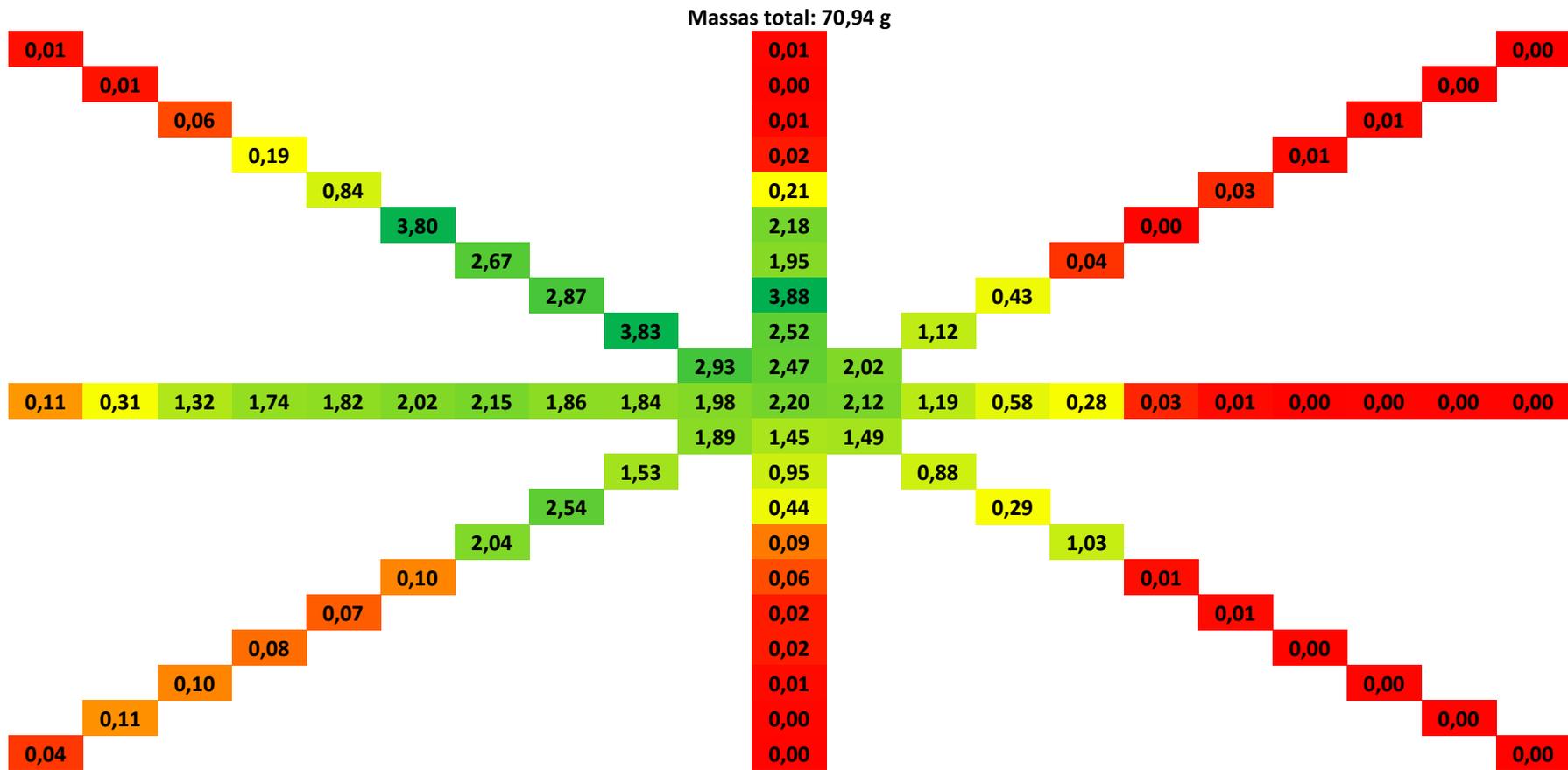


Figura A-13 - Experimento 7.

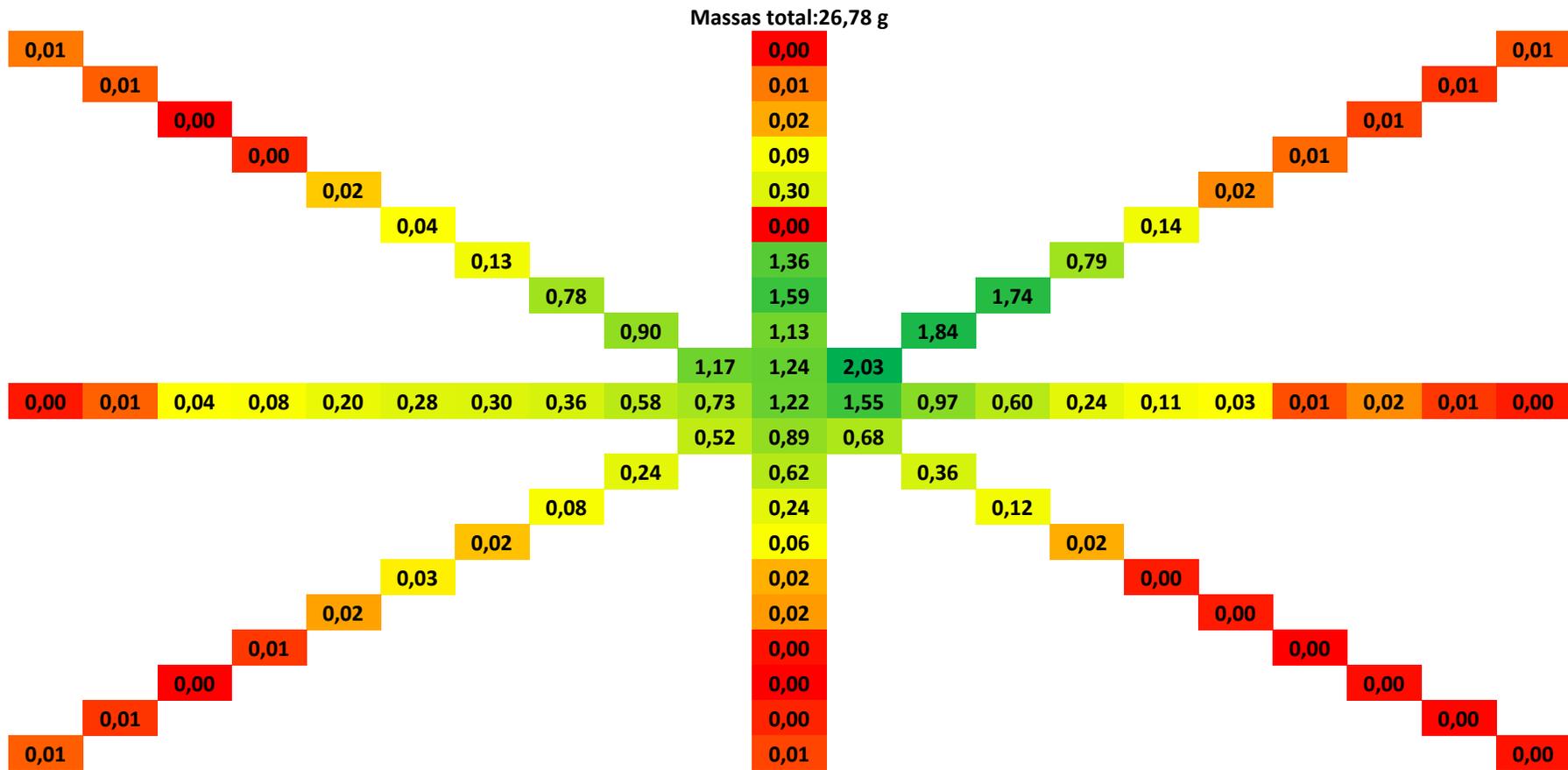


Figura A-15 - Experimento 8.

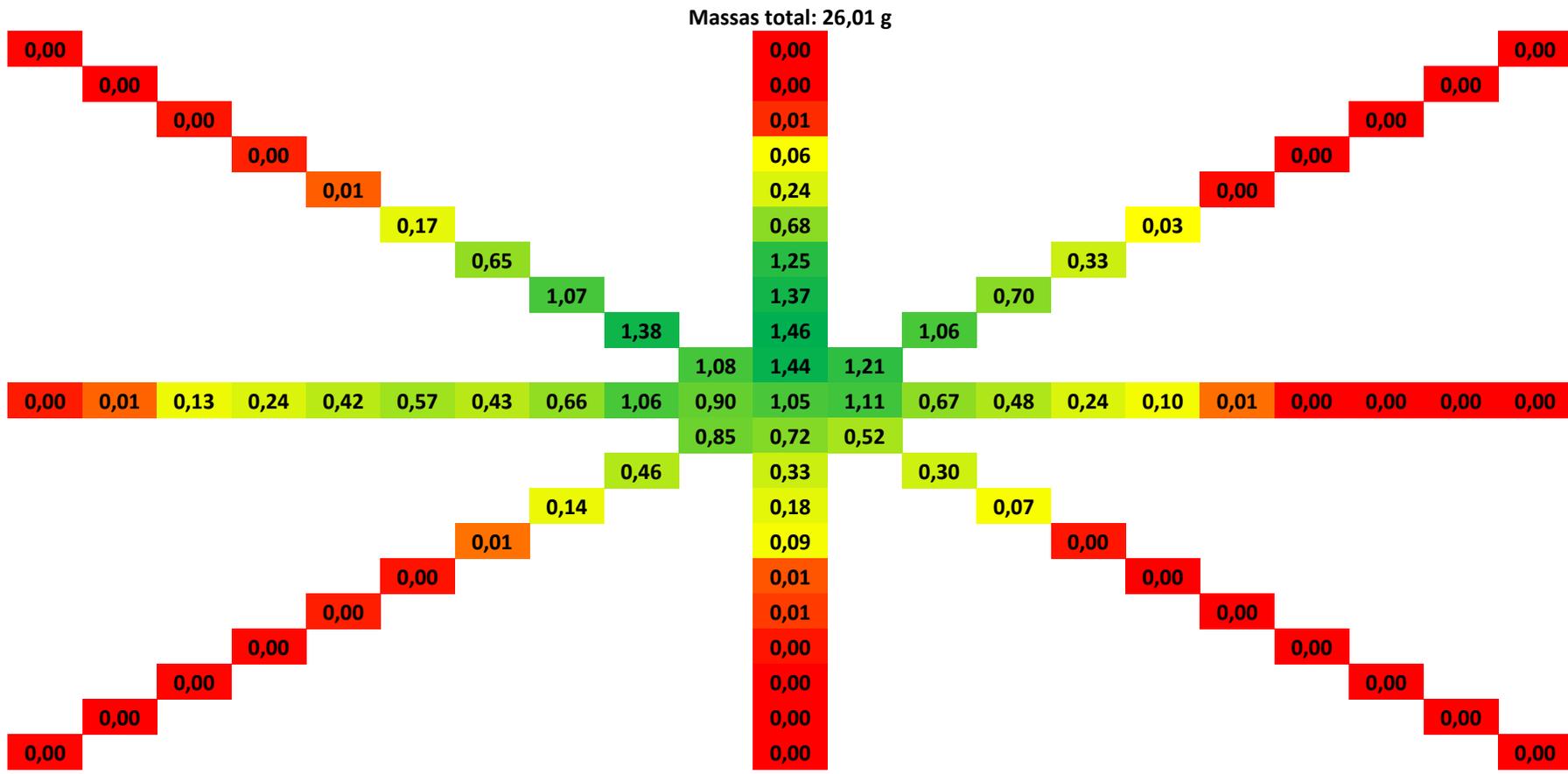


Figura A-16 - Duplicata do experimento 8.

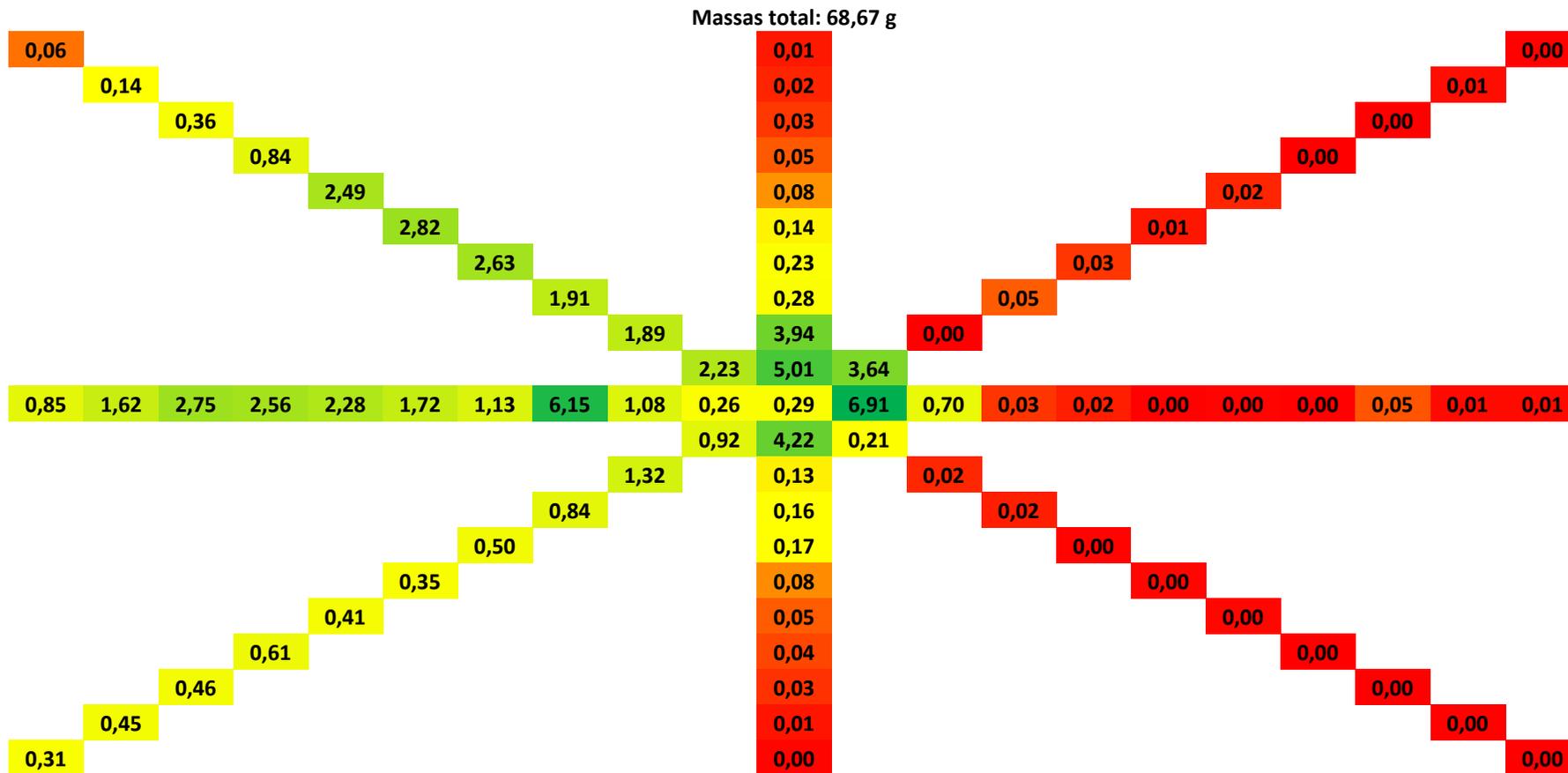


Figura A-18 - Duplicata do experimento 9.

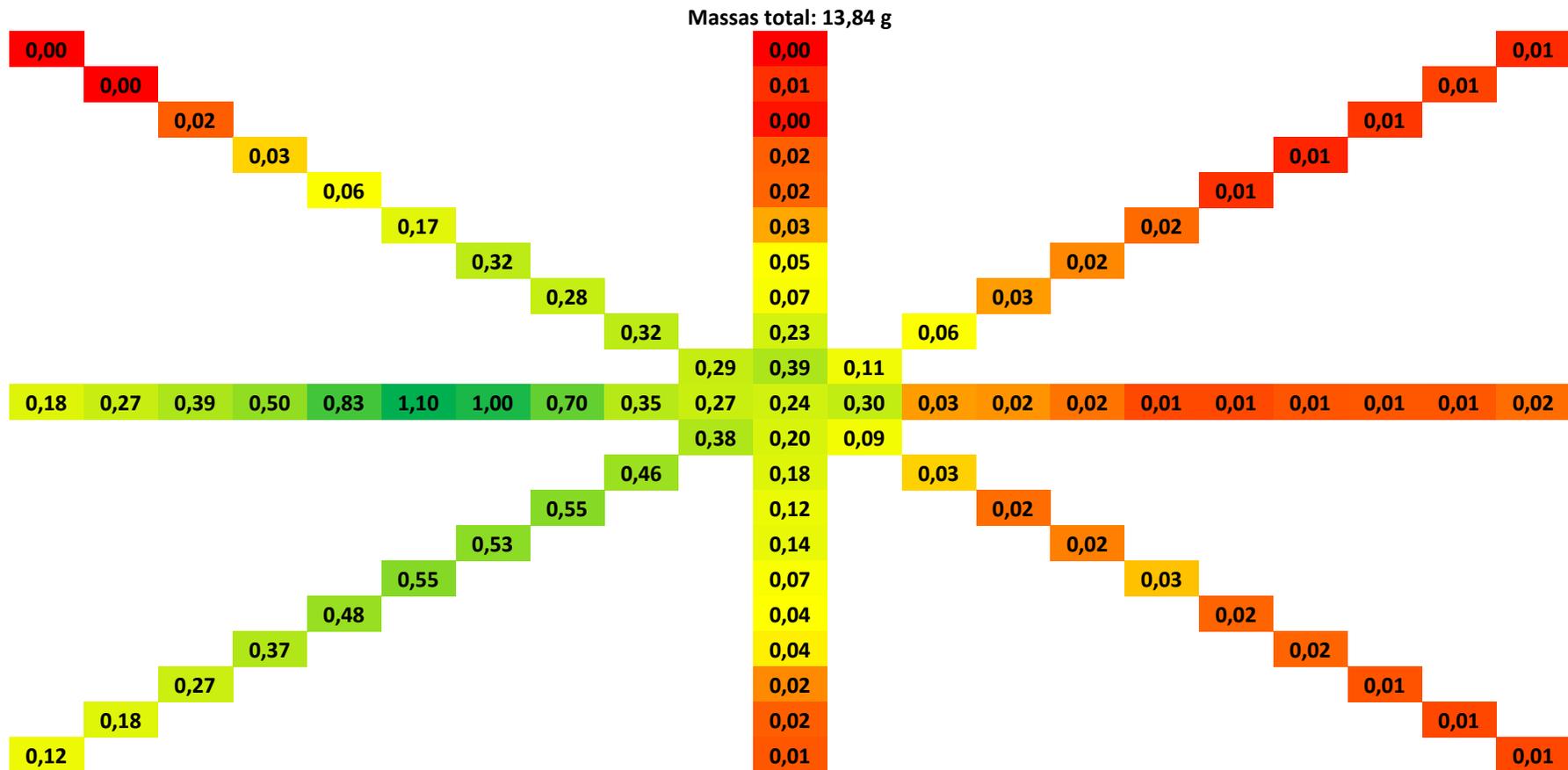


Figura A-20 - Duplicata do experimento 10.

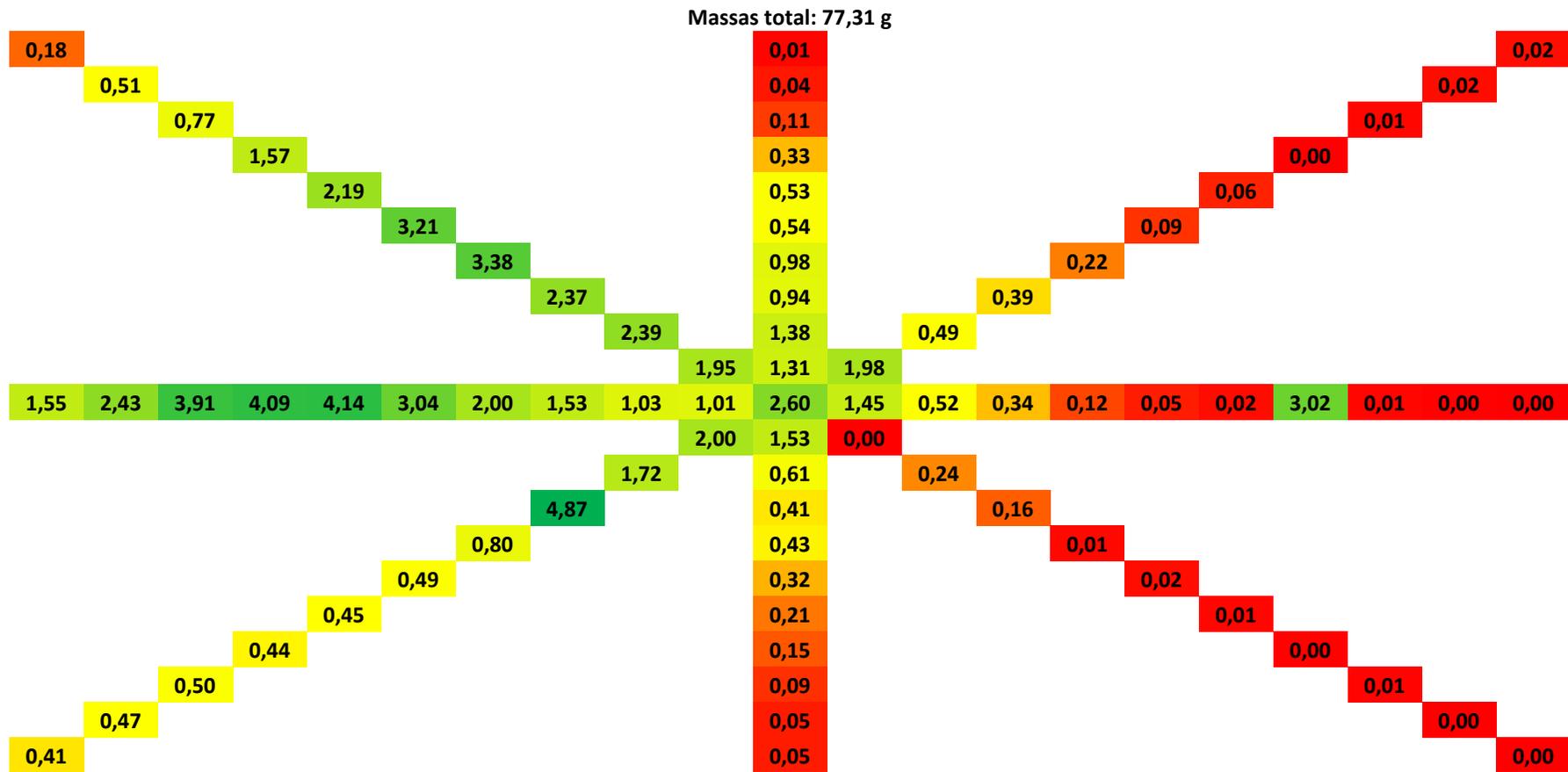


Figura A-21 - Experimento 11.

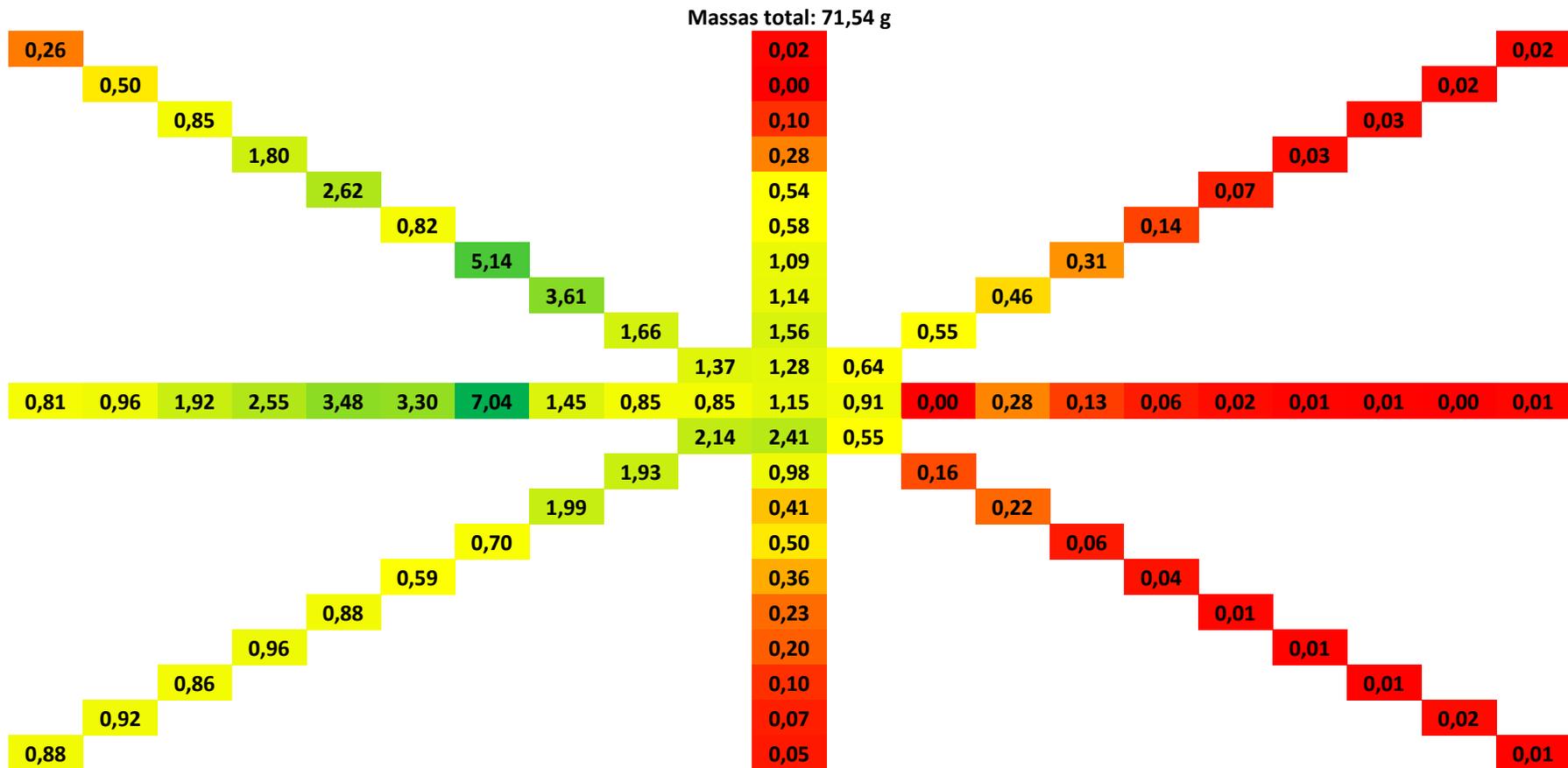


Figura A-22 - Duplicata do experimento 11.

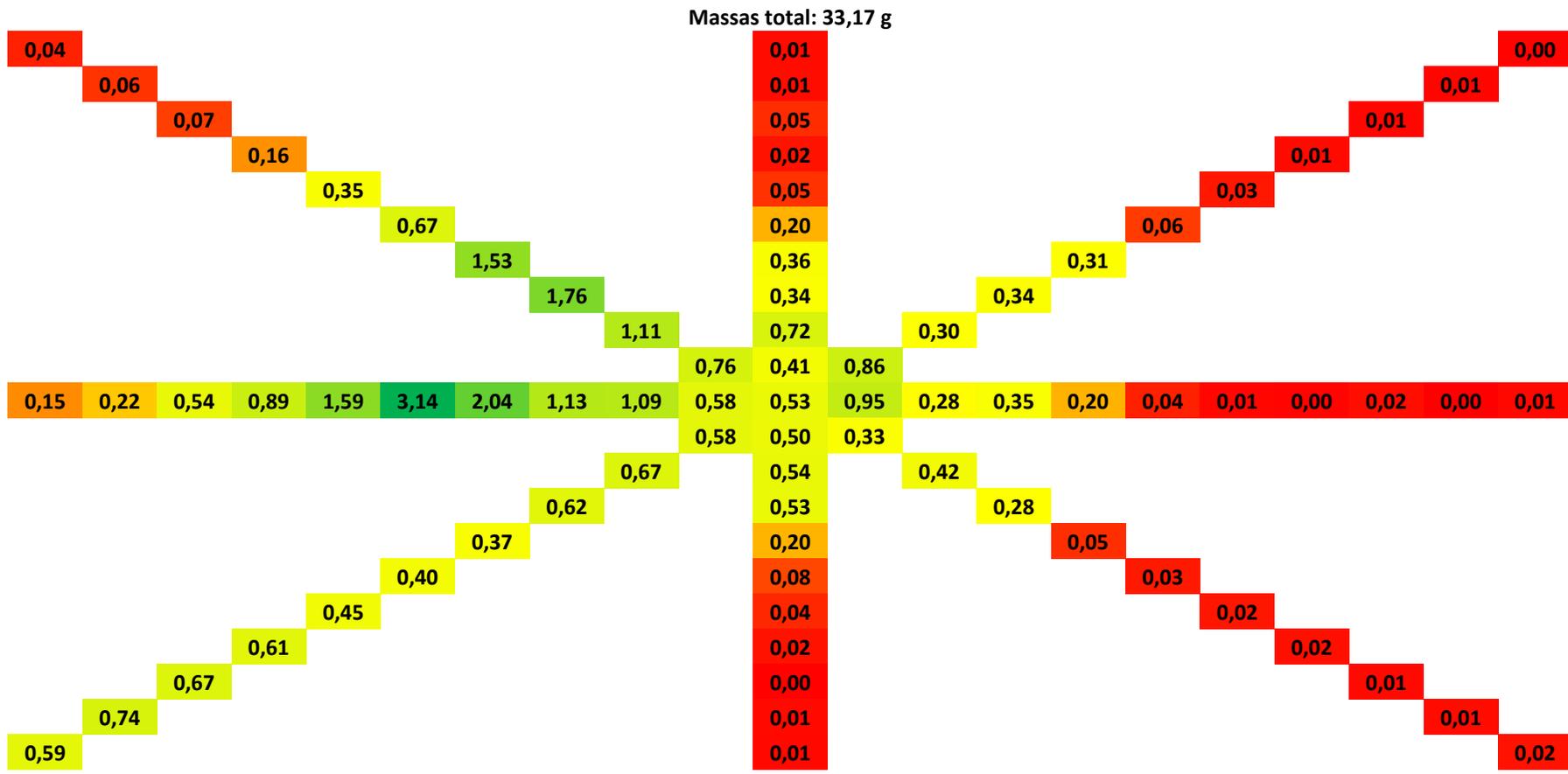


Figura A-24 - Duplicata do experimento 12.

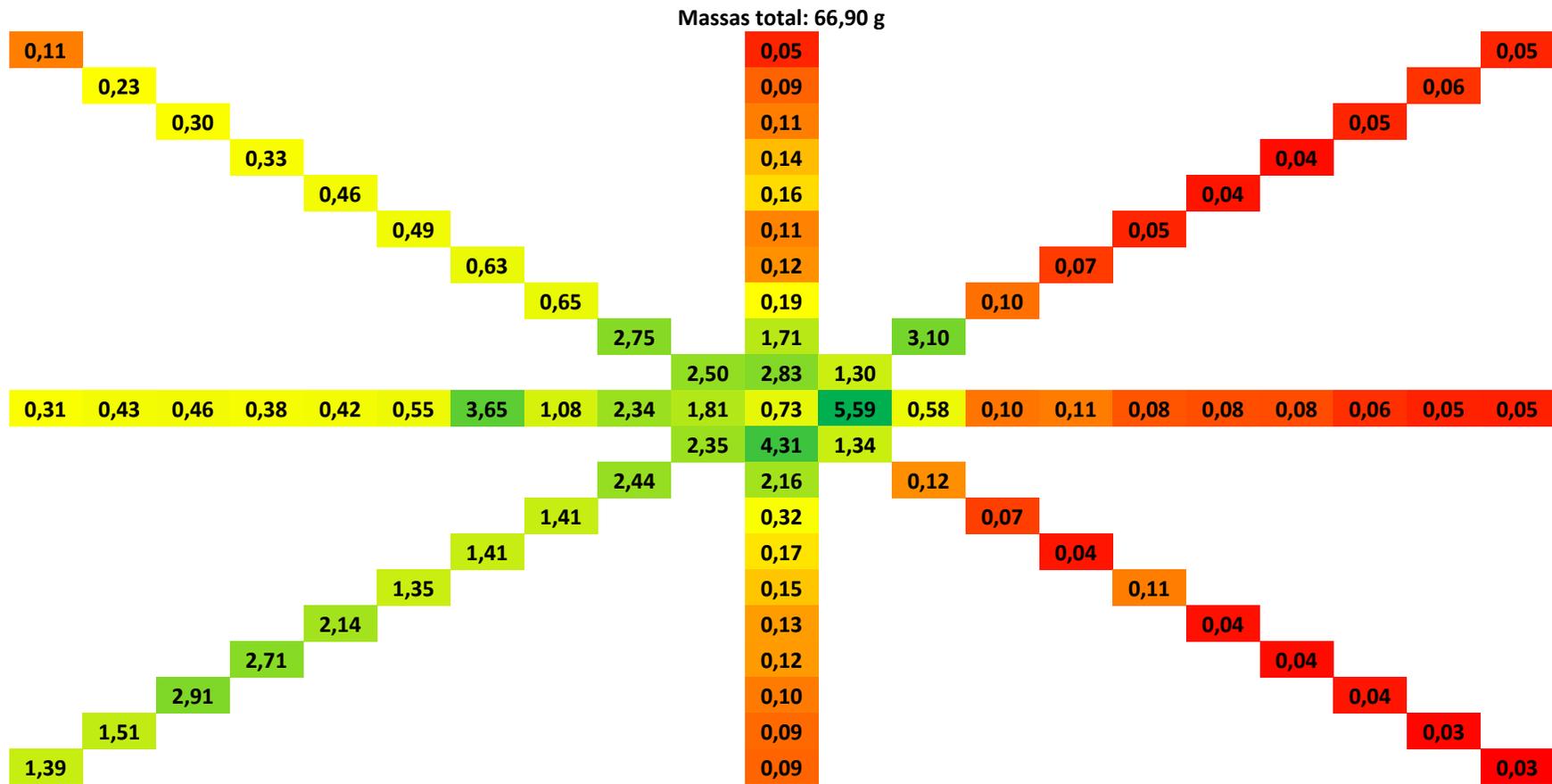


Figura A-26 - Duplicata do experimento 13.

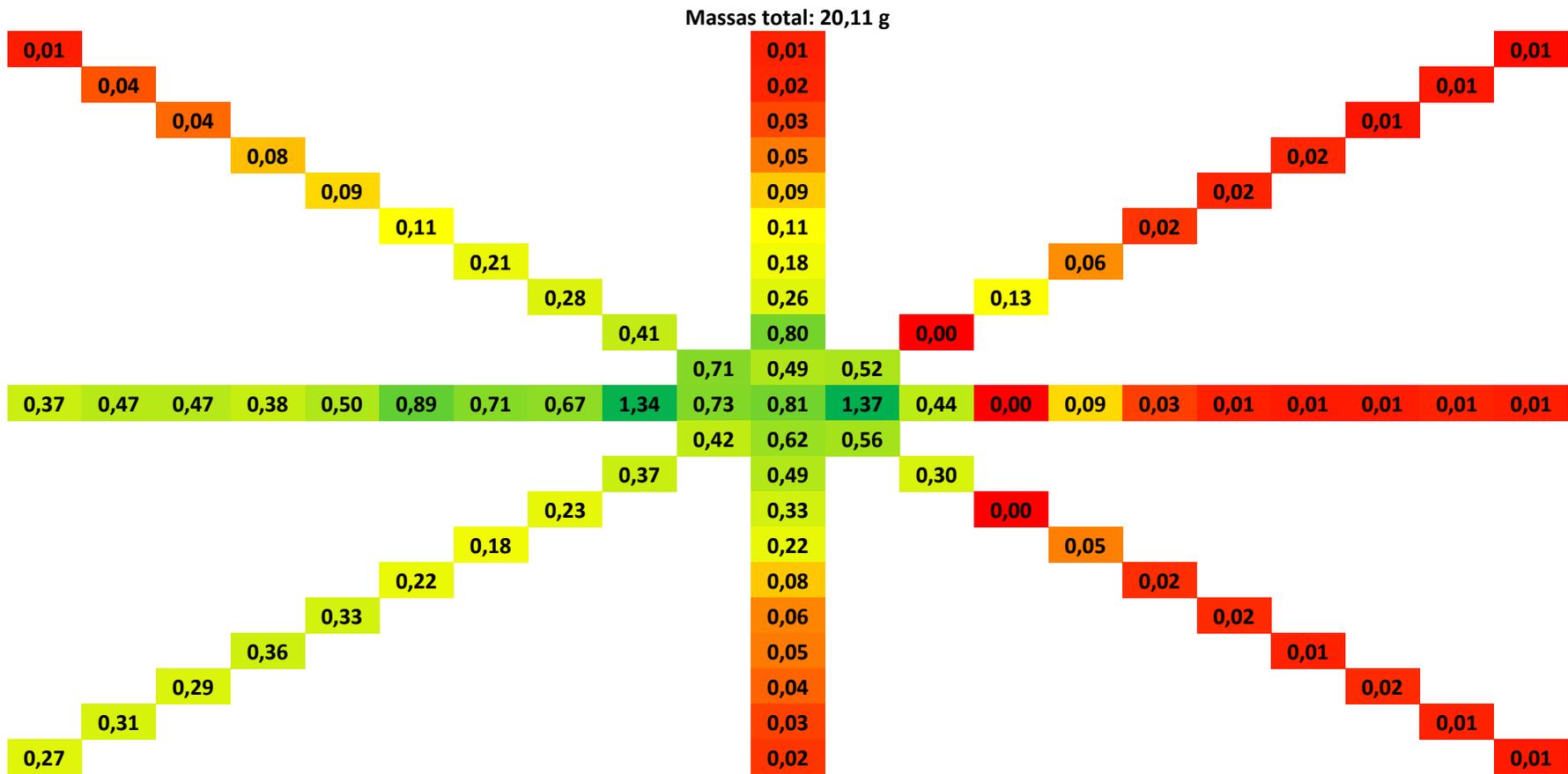


Figura A-31 - Experimento 16.

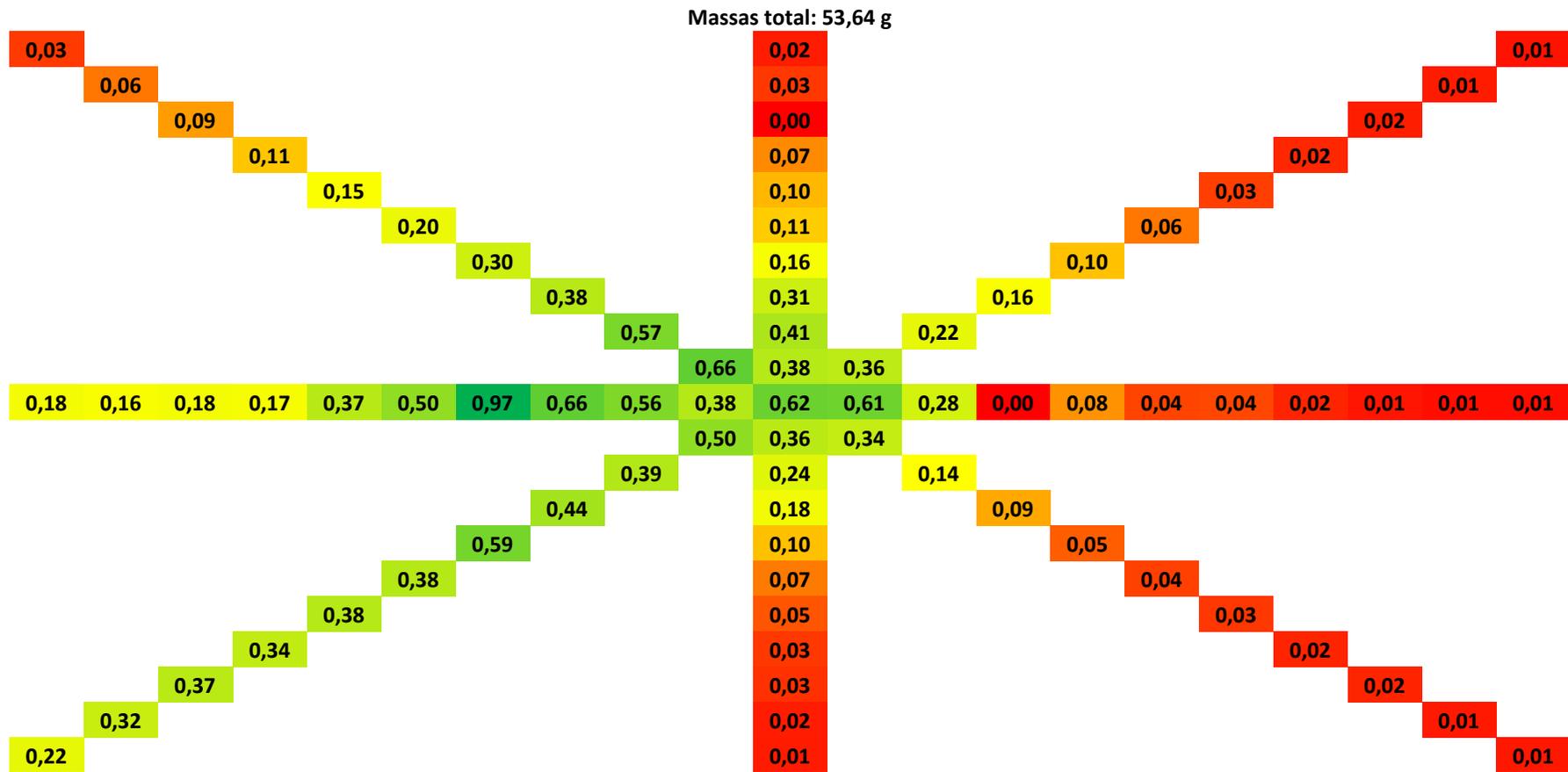


Figura A-32 - Duplicata do experimento 16.

APÊNDICE B – Distribuição da Névoa

Os resultados das análises qualitativas do comportamento da nebulização podem ser observados nas figuras B-1 a B-16.

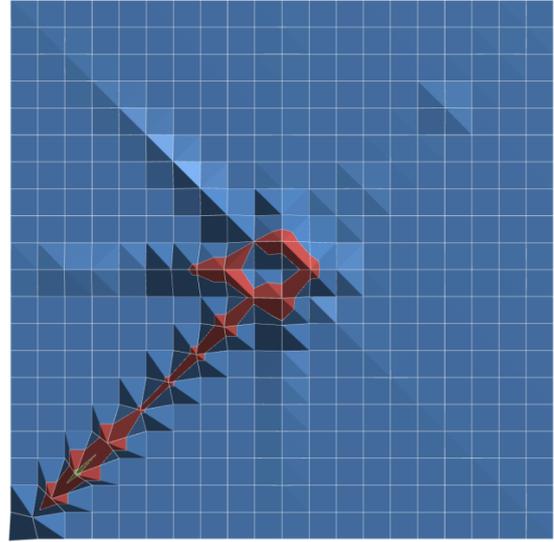
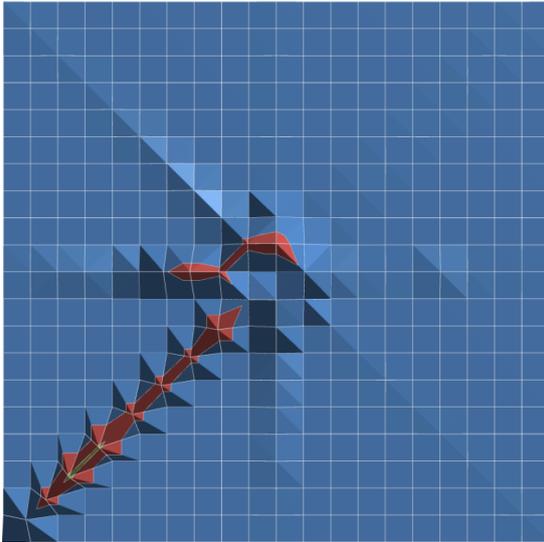


Figura B-1 – Experimento 1 e duplicata.

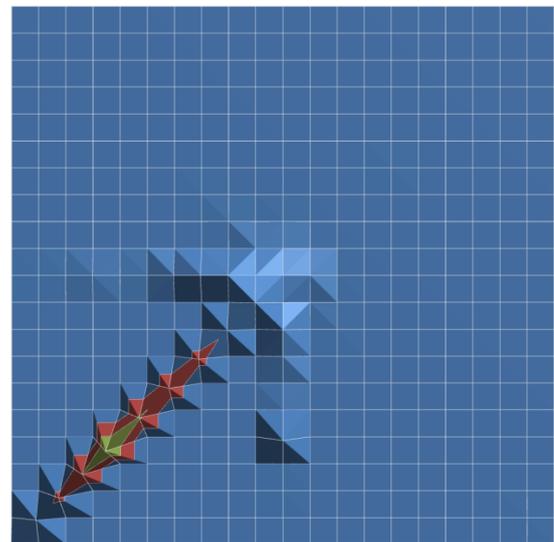
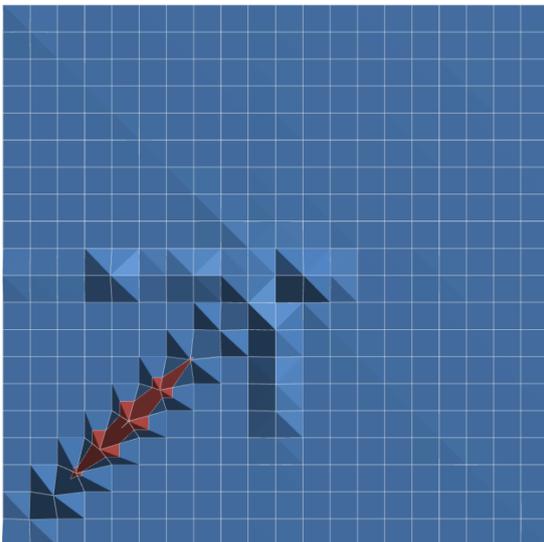


Figura B-2 – Experimento 2 e duplicata.

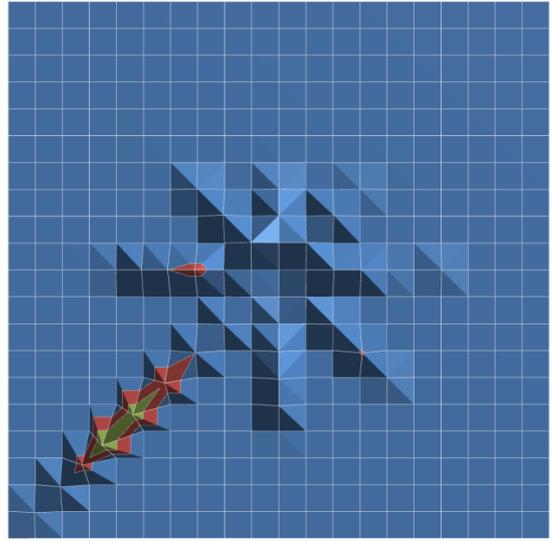
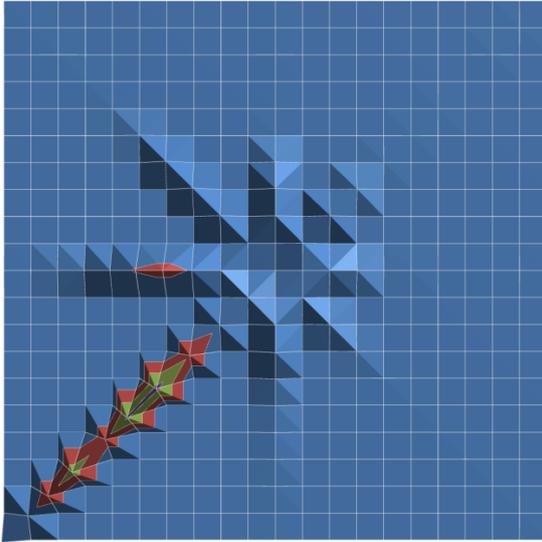


Figura B-3 – Experimento 3 e duplicata.

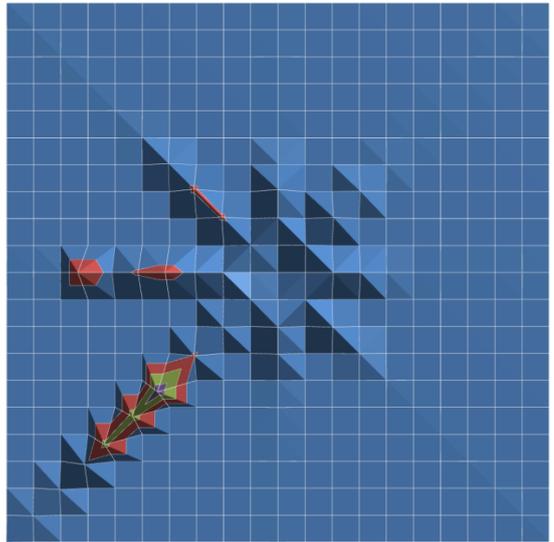
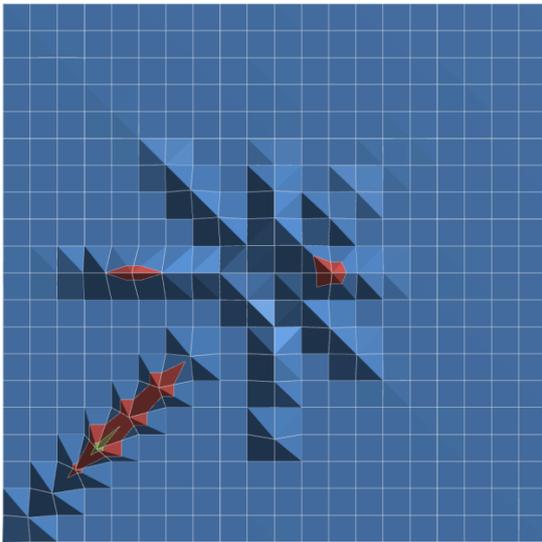


Figura B-4 – Experimento 4 e duplicata.

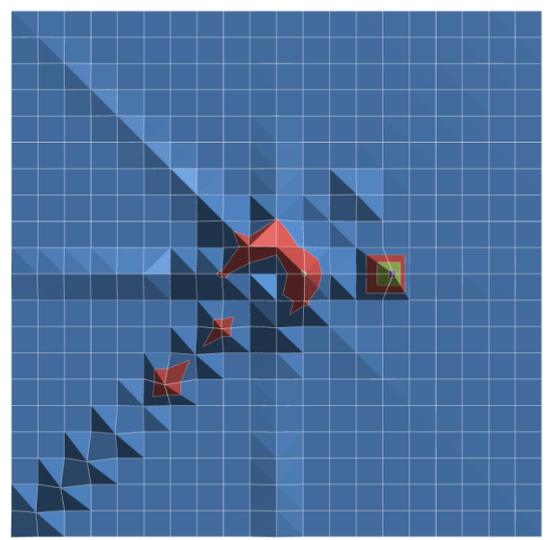
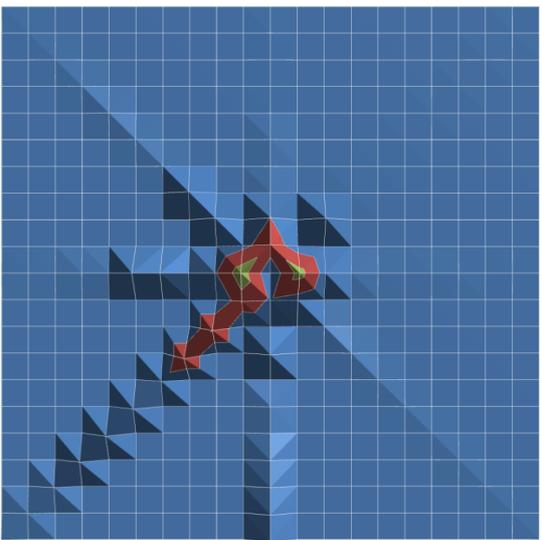


Figura B-5 – Experimento 5 e duplicata.

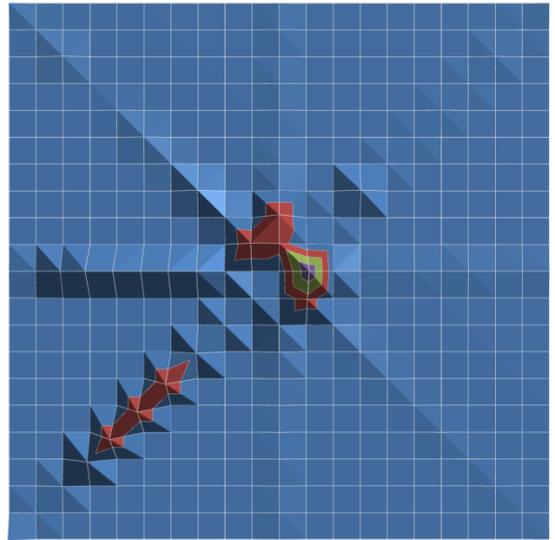
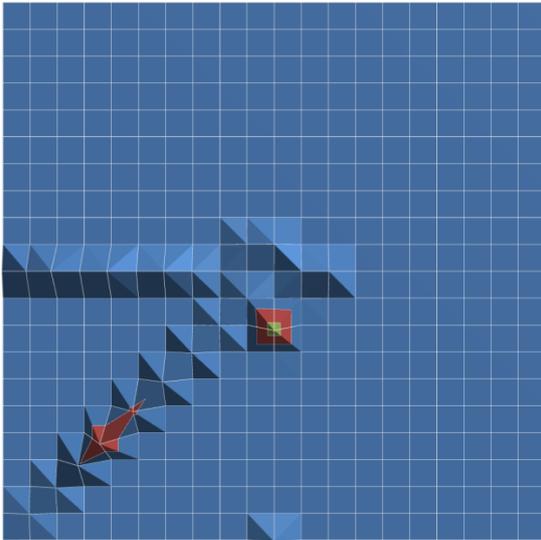


Figura B-6 – Esperimento 6 e duplicata.

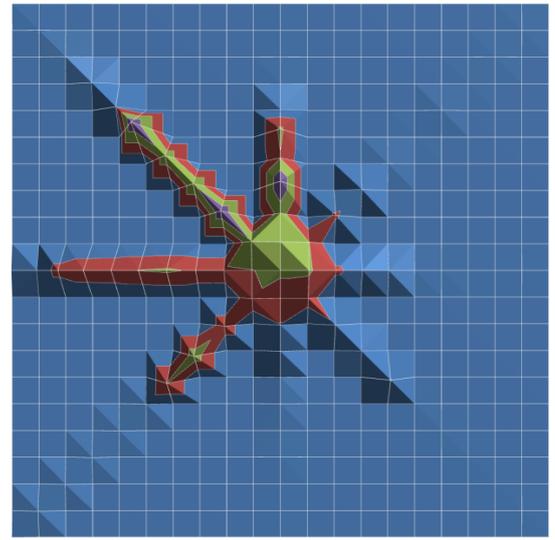
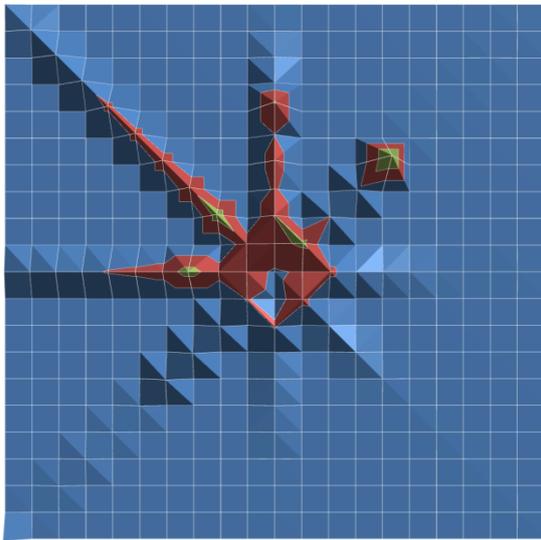


Figura B-7 – Esperimento 7 e duplicata.

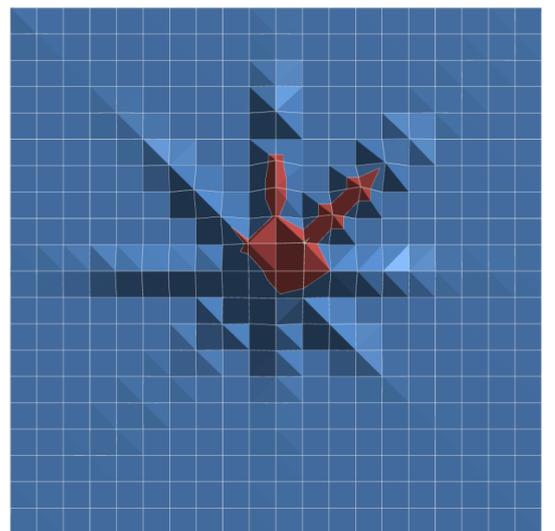
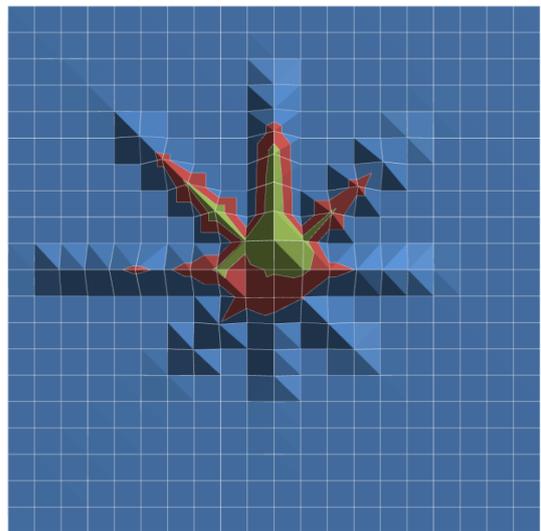


Figura B-8 – Esperimento 8 e duplicata.

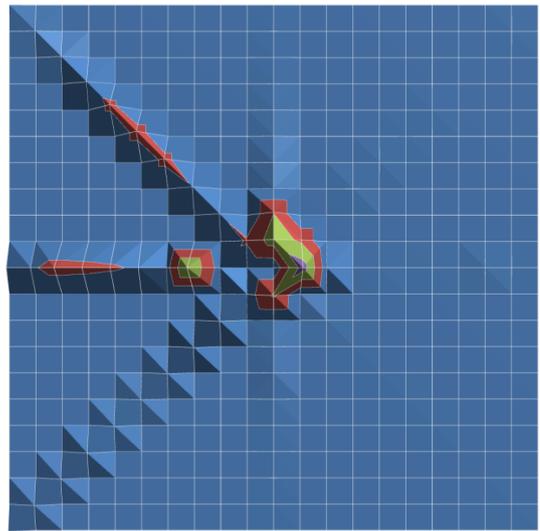
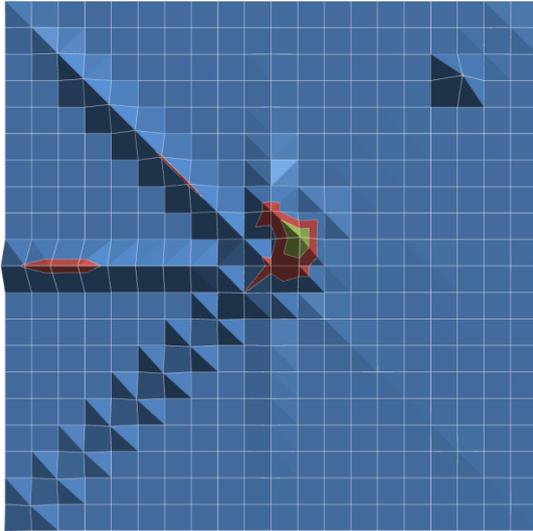


Figura B-9 – Esperimento 9 e duplicata.

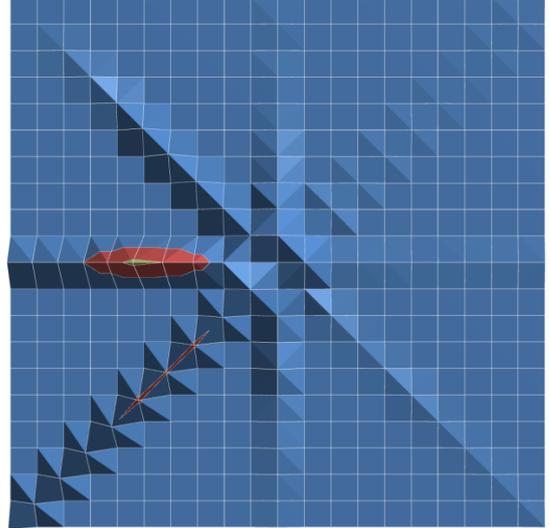
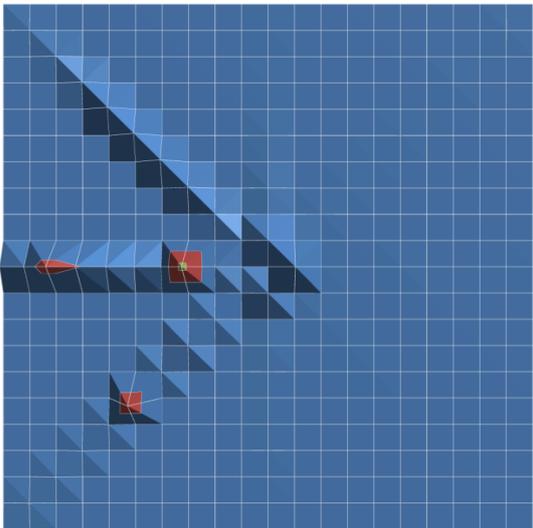


Figura B-10 – Esperimento 10 e duplicata.

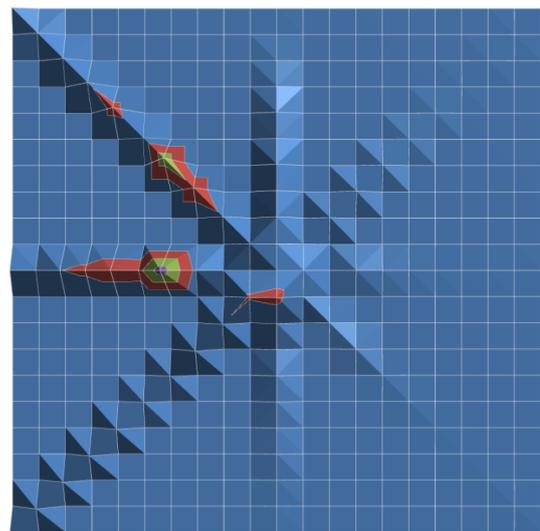
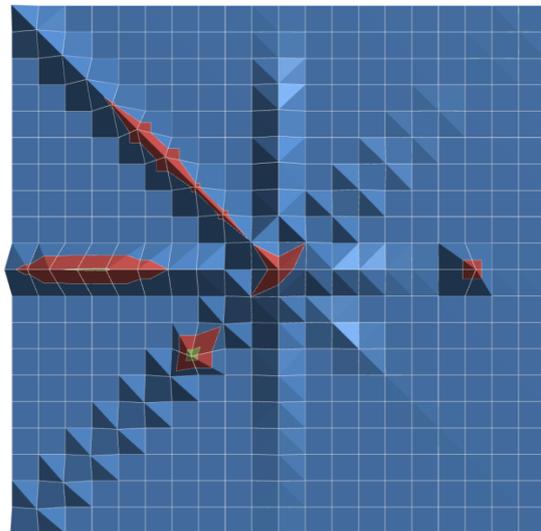


Figura B-11 – Esperimento 11 e duplicata.

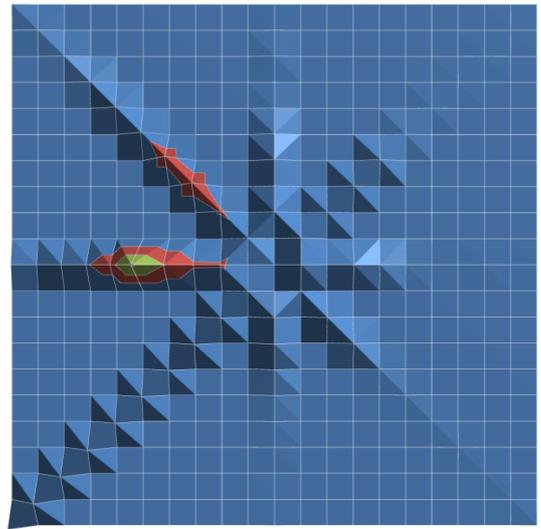
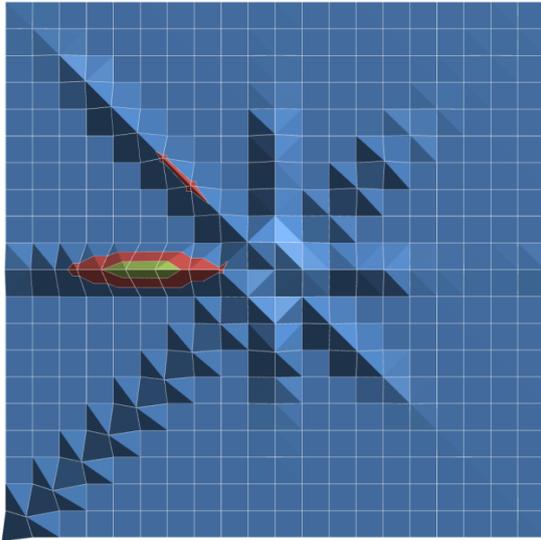


Figura B-12 – Experimento 12 e duplicata.

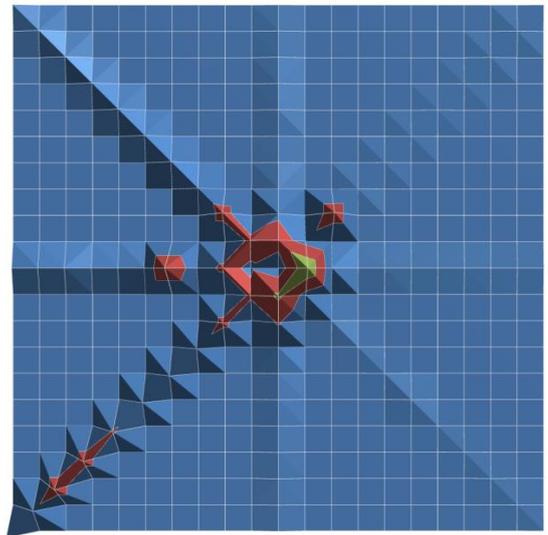
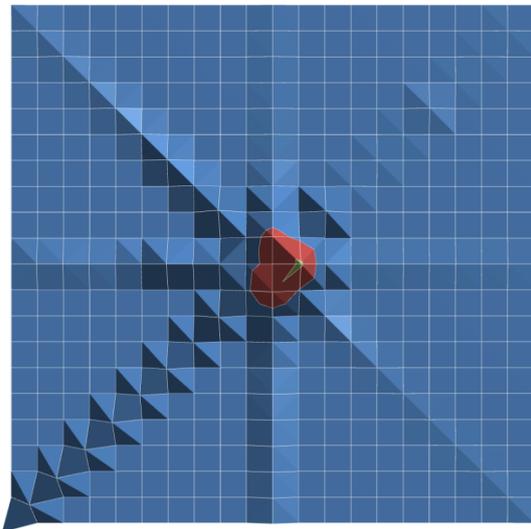


Figura B-13 – Experimento 13 e duplicata.

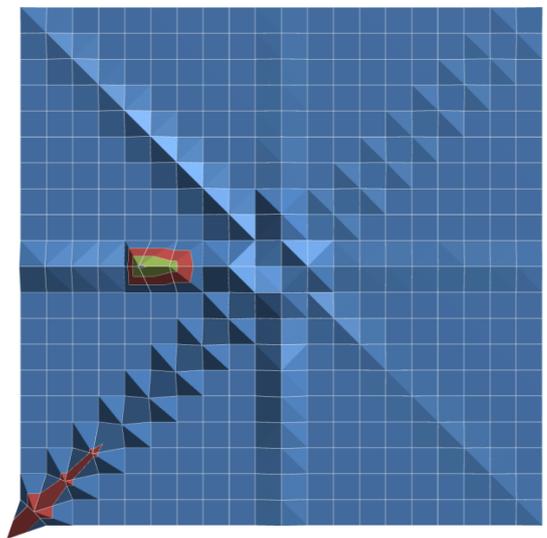
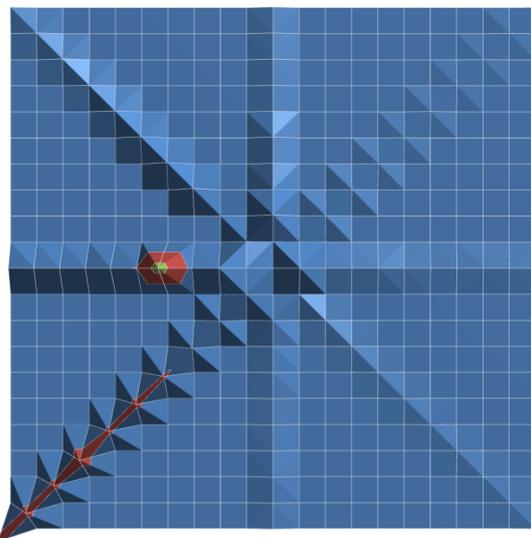


Figura B-14 – Experimento 14 e duplicata.

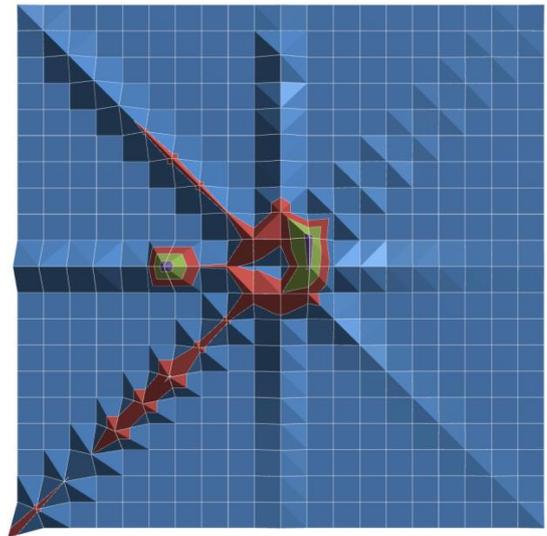
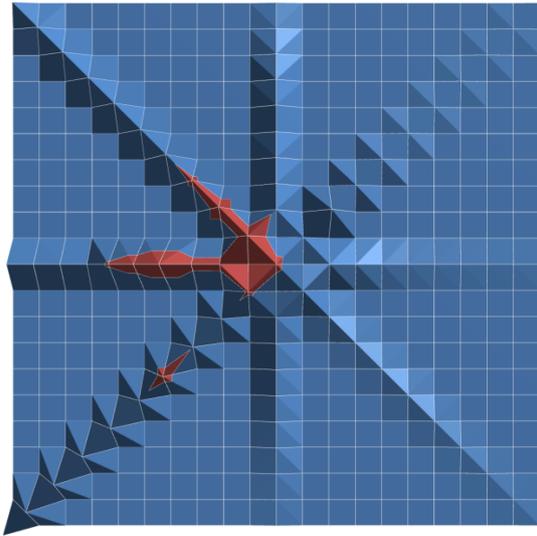


Figura B-15 – Esperimento 15 e duplicata.

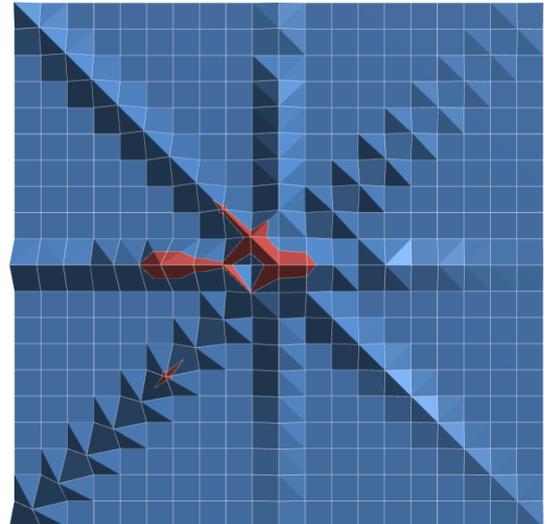
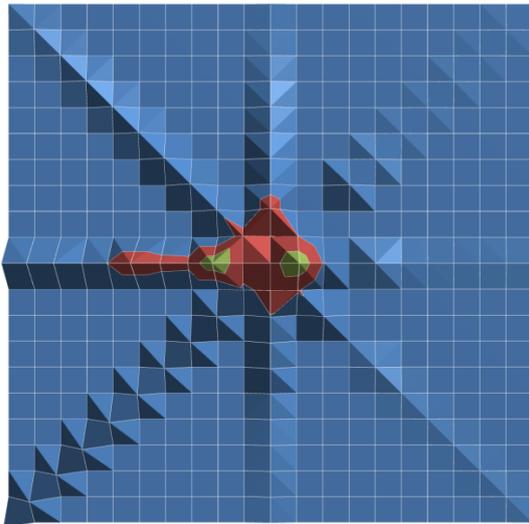


Figura B-16 – Esperimento 16 e duplicata.

APÊNDICE C – Massa Adsorvida

A Tabela C-1 apresenta o desvio padrão observado em cada um dos experimentos. A notação “*1” indica o anel onde todos os coletores de final um (01, 11, 21, 31, 41, 51, 61, 71 e 81) se encontram. As colunas representam o ensaio sendo o número seguido de apóstrofe (por exemplo “1’”) a representação da duplicata daquele experimento em específico.

Tabela C-1 – Desvio padrão para cada experimento em cada anel.

| | | Experimento | | | | | | | | | | | | | | | |
|------|----|-------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| | | 1 | 1' | 2 | 2' | 3 | 3' | 4 | 4' | 5 | 5' | 6 | 6' | 7 | 7' | 8 | 8' |
| Anel | *1 | 0,77 | 1,09 | 0,09 | 0,10 | 0,31 | 0,16 | 0,14 | 0,14 | 1,51 | 1,09 | 0,02 | 0,24 | 0,46 | 0,82 | 0,47 | 0,27 |
| | *2 | 1,24 | 1,31 | 0,09 | 0,15 | 0,22 | 0,28 | 0,47 | 0,20 | 1,12 | 0,95 | 0,16 | 0,11 | 0,94 | 1,35 | 0,48 | 0,43 |
| | *3 | 1,15 | 1,06 | 0,17 | 0,22 | 0,42 | 1,05 | 0,21 | 0,36 | 1,16 | 0,51 | 0,03 | 0,06 | 1,29 | 1,52 | 0,61 | 0,43 |
| | *4 | 0,99 | 0,79 | 0,25 | 0,28 | 0,63 | 2,14 | 0,59 | 1,17 | 0,48 | 2,37 | 0,06 | 0,12 | 0,98 | 1,94 | 0,44 | 0,39 |
| | *5 | 0,94 | 0,74 | 0,33 | 0,35 | 0,87 | 2,07 | 0,71 | 0,82 | 0,60 | 0,16 | 0,08 | 0,12 | 1,36 | 1,08 | 0,09 | 0,26 |
| | *6 | 1,39 | 1,23 | 0,31 | 0,50 | 0,99 | 1,05 | 0,78 | 0,74 | 0,36 | 0,33 | 0,13 | 0,12 | 0,60 | 1,47 | 0,10 | 0,15 |
| | *7 | 1,42 | 1,45 | 0,19 | 0,33 | 0,45 | 1,59 | 0,39 | 0,63 | 0,24 | 0,47 | 0,07 | 0,07 | 0,56 | 0,63 | 0,03 | 0,08 |
| | *8 | 0,94 | 1,07 | 0,08 | 0,20 | 0,11 | 1,09 | 0,21 | 0,07 | 0,16 | 0,40 | 0,05 | 0,03 | 0,43 | 0,47 | 0,01 | 0,04 |
| | *9 | 0,33 | 0,38 | 0,01 | 0,07 | 0,04 | 0,29 | 0,08 | 0,04 | 0,18 | 0,19 | 0,03 | 0,01 | 0,10 | 0,23 | 0,00 | 0,00 |
| | *0 | 0,09 | 0,11 | 0,02 | 0,01 | 0,00 | 0,21 | 0,02 | 0,01 | 0,19 | 0,06 | 0,01 | 0,01 | 0,04 | 0,20 | 0,00 | 0,00 |
| | | 9 | 9' | 10 | 10' | 11 | 11' | 12 | 12' | 13 | 13' | 14 | 14' | 15 | 15' | 16 | 16' |
| Anel | *1 | 1,78 | 2,28 | 0,53 | 0,11 | 0,63 | 0,64 | 0,18 | 0,20 | 1,11 | 1,40 | 0,11 | 0,08 | 0,20 | 0,81 | 0,28 | 0,12 |
| | *2 | 0,96 | 1,24 | 0,09 | 0,15 | 0,69 | 0,66 | 0,31 | 0,30 | 0,52 | 0,98 | 0,15 | 0,10 | 0,24 | 0,43 | 0,37 | 0,15 |
| | *3 | 0,69 | 1,97 | 1,48 | 0,25 | 1,49 | 1,09 | 0,47 | 0,49 | 0,25 | 0,48 | 0,15 | 0,08 | 0,24 | 0,43 | 0,20 | 0,20 |
| | *4 | 0,73 | 0,85 | 0,33 | 0,33 | 1,08 | 2,50 | 0,84 | 0,68 | 0,30 | 1,17 | 0,39 | 0,39 | 0,33 | 1,19 | 0,20 | 0,30 |
| | *5 | 0,63 | 0,99 | 1,04 | 0,37 | 1,26 | 1,00 | 0,86 | 0,99 | 0,22 | 0,41 | 0,22 | 0,50 | 0,23 | 0,56 | 0,27 | 0,17 |
| | *6 | 0,64 | 1,00 | 0,40 | 0,29 | 1,38 | 1,24 | 0,64 | 0,51 | 0,36 | 0,66 | 0,20 | 0,10 | 0,19 | 0,55 | 0,17 | 0,14 |
| | *7 | 0,97 | 0,83 | 0,68 | 0,18 | 1,46 | 0,90 | 0,45 | 0,32 | 0,42 | 0,85 | 0,23 | 0,18 | 0,15 | 0,35 | 0,15 | 0,10 |
| | *8 | 0,86 | 0,88 | 0,87 | 0,14 | 1,25 | 0,64 | 0,31 | 0,26 | 0,57 | 0,92 | 0,19 | 0,20 | 0,16 | 0,33 | 0,16 | 0,12 |
| | *9 | 0,69 | 0,53 | 0,43 | 0,10 | 0,78 | 0,39 | 0,23 | 0,24 | 0,57 | 0,47 | 0,19 | 0,30 | 0,16 | 0,40 | 0,16 | 0,10 |
| | *0 | 0,38 | 0,28 | 0,26 | 0,06 | 0,50 | 0,35 | 0,13 | 0,19 | 0,62 | 0,44 | 0,21 | 0,30 | 0,12 | 0,44 | 0,14 | 0,08 |