



Recuperação e valorização das lecitinas numa unidade industrial

Catarina Alexandra Lopes Tapada

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Química

Orientadores:

Professora Doutora Maria Diná Ramos Afonso
Doutor Renato Henriques de Carvalho

Júri

Presidente: Professor Doutor Sebastião Manuel Tavares da Silva Alves
Orientador: Doutor Renato Henriques de Carvalho
Vogal: Professor Doutor Vítor Manuel Geraldês Fernandes

Novembro de 2018

Aos meus pais e ao meu irmão que me apoiaram neste percurso.

Agradecimentos

Esta dissertação é o culminar de um percurso académico de 5 anos, que não teria sido possível concluir, sem o contributo e apoio de muitas pessoas, e por isso não posso deixar de lhes agradecer.

Em primeiro lugar, ao meu orientador, Doutor Renato Henriques de Carvalho, que me deu a oportunidade de estagiar na empresa. Pela sua ajuda, disponibilidade, por todos os conhecimentos e conselhos transmitidos.

Em segundo lugar, gostaria de agradecer à minha orientadora Professora Doutora Diná Afonso por me ter apoiado e ajudado e pela disponibilidade permanente, no decorrer da elaboração desta dissertação.

A todos os trabalhadores da empresa, por se mostrarem sempre disponíveis para me ajudar e responder a todas as minhas questões, partilhando comigo os seus conhecimentos e experiência.

Aos meus colegas de estágio, pela ajuda, partilha de conhecimento, amizade e boa disposição ao longo dos 6 meses de estágio.

Aos meus amigos, que me ajudaram e apoiaram durante todo o meu percurso académico, transmitindo-me sempre a força que eu precisava.

Ao meu irmão, que me acompanha há 18 anos, por estar ao meu lado incondicionalmente e por acreditar sempre que eu posso ser a melhor em tudo o que fizer.

Aos meus pais, pela força, suporte, por me terem dado a melhor educação e os melhores valores. Sem eles, nada era possível, devo-lhes tudo o que alcancei até hoje. Agradeço-lhes por acreditarem sempre em mim, por me ajudarem a enfrentar os meus medos e obstáculos e a alcançar os meus objetivos.

O meu muito obrigada a todos!

Resumo

O principal objetivo deste trabalho foi o estudo e avaliação técnico-económica da instalação de uma unidade de secagem de lecitinas, que visa produzir lecitinas de nível *feed-grade*, de modo a aproveitar a sua valorização no mercado e a reduzir o teor de gordura no bagaço.

Estudaram-se em detalhe as características, especificações e aplicações das lecitinas, assim como as tecnologias de secagem por evaporação de água, de modo a escolher uma tecnologia que efetue uma secagem eficiente, resultando num produto de qualidade com as especificações solicitadas pelos clientes.

Em paralelo, estudaram-se também sistemas de geração de vácuo, necessário para a secagem das lecitinas e tipos de filtros, como hipóteses para a remoção dos sólidos a montante da desgomagem e obtenção de um produto final com maior qualidade. Desenvolveram-se ainda em *Excel* duas ferramentas de auxílio no dimensionamento de sistemas de vácuo (ejetores de vapor e bomba de vácuo de anel líquido) e de alguns tipos de filtros (filtro de prensa, filtro de folhas, filtro de tambor rotativo, filtro de disco e filtro de esteira).

Concluiu-se que a bomba de vácuo de anel líquido é o tipo de sistema de vácuo mais adequado para a secagem das lecitinas. No caso da remoção dos sólidos, concluiu-se que a clarificação do óleo antes da desgomagem numa centrífuga é preferível face à filtração.

Contactaram-se vários fornecedores especialistas neste tipo de processos e elaborou-se uma *checklist* com as alterações e trabalhos necessários para a implementação da secagem de lecitinas. Procedeu-se à avaliação técnica e económica das quatro propostas recebidas (A, B, C e D), tendo-se concluído que a proposta C é a que apresenta melhores perspetivas a nível global.

Da análise económica obtiveram-se como indicadores económicos, para o cenário 1 (soja OGM e colza OGM) um VAL de 332 061 €, TIR de 15% e um PRI de 8 anos; e para o cenário 2 (soja OGM e colza não OGM) um VAL de 712 074 €, TIR de 20% e PRI de 6 anos. Da análise de sensibilidade concluiu-se que este projeto tem algum risco associado.

Palavras-chave: lecitinas, secagem de lecitinas, evaporador de filme, soja, colza, sistema de vácuo, filtração, clarificação.

Abstract

The main objective of this dissertation was the technical-economical evaluation of the installation of a lecithins drying unit, to produce feed-grade lecithins, to take advantage of its market value and to reduce the fat content in the meals.

The characteristics, specifications and applications of lecithins as well as water-evaporating drying were studied in detail to choose an efficient drying, resulting in a quality product within the specifications requested by the customers.

In parallel, it was also studied vacuum generation systems, necessary for the lecithin drying and types of filters, for the removal of the solids upstream of the degumming in order to obtain a final product with higher quality. Two tools were also developed in *Excel* to aid in the design of vacuum systems (steam ejectors and liquid ring vacuum pumps) and some types of filters (press filter, leaf filter, rotary drum filter, disc filter and belt filter).

It was concluded that the liquid ring vacuum pump is the most suitable type of vacuum system for the lecithins drying. In the case of the solids removal, it was found that the oil clarification prior to degumming in a centrifuge is preferred over filtration.

Several expert suppliers for this type of processes were contacted and a checklist was drawn up with the changes and work required for the implementation of the lecithins drying. The technical and economical evaluation of the four proposals received (A, B, C and D), was carried out, and it was concluded that the proposal C is the one that presents the best overall prospects.

From the economic analysis, a NPV of 332 061 €, an IRR of 15% and a payback time of 8 years were obtained as economic indicators for scenario 1 (GMO soybean and GMO rapeseed); and for scenario 2 (GMO soybean and non-GMO rapeseed) a NPV of 712 074 €, an IRR of 20% and a payback time of 6 years. The sensitivity analysis led to the conclusion that this project has some associated risk.

Keywords: lecithins, lecithins drying, thin film evaporator, soy, rapeseed, vacuum system, filtration, clarification

Índice

| | |
|--|-------------|
| Agradecimentos | v |
| Resumo | vii |
| Abstract | ix |
| Índice de Tabelas | xiii |
| Índice de Figuras | xv |
| Lista de símbolos e abreviaturas | xvii |
| 1. Introdução | 1 |
| 1.1. Processo de produção de bagaços de soja e colza | 1 |
| 1.2. Estado da arte da desgomagem física..... | 3 |
| 1.3. Enquadramento e motivação..... | 4 |
| 1.4. Lecitinas..... | 4 |
| 1.4.1. <i>Caracterização físico-química e métodos de análise</i> | 4 |
| 1.4.2. <i>Especificações de mercado e matérias-primas</i> | 8 |
| 1.4.3. <i>Aplicações e perspetivas do mercado das lecitinas</i> | 11 |
| 1.5. Tecnologias de secagem industrial (por evaporação da água) | 14 |
| 1.6. Sistemas de vácuo | 22 |
| 1.7. Filtração | 26 |
| 2. Ferramentas de dimensionamento: sistema de vácuo e filtração | 37 |
| 2.1. Sistema de vácuo | 37 |
| 2.2. Filtração | 40 |
| 3. Implementação de uma unidade de secagem industrial de lecitinas | 43 |
| 3.1. Seleção do tipo de evaporador..... | 43 |
| 3.2. Filtração/clarificação da miscela e/ou do óleo..... | 46 |
| 3.3. <i>Checklist</i> | 51 |
| 3.4. Propostas de fornecedores relativamente à secagem e filtração ou clarificação | 52 |
| 3.5. Viabilidade técnica..... | 53 |
| 3.5.1. <i>Tecnologia de evaporação de filme agitado (thin film)</i> | 53 |
| 3.5.2. <i>Comparação técnica das propostas</i> | 56 |
| 3.5.3. <i>Análise de risco ao embalamento do produto</i> | 62 |
| 3.6. Viabilidade económica..... | 64 |
| 3.6.1. <i>Estimativa do investimento</i> | 64 |
| 3.6.2. <i>Análise económica</i> | 65 |
| 3.6.3. <i>Análise de sensibilidade</i> | 68 |
| 4. Conclusões | 73 |
| 5. Trabalho futuro | 75 |
| 6. Referências Bibliográficas | 77 |

Índice de Tabelas

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Composição de ácidos gordos, em percentagem, para as lecitinas de soja e colza. (van Nieuwenhyzen, 2014)..... | 9 |
| Tabela 2 - Composição dos principais fosfatídeos, em percentagem, para as lecitinas de soja e colza. (van Nieuwenhyzen, 2014)..... | 9 |
| Tabela 3 - Especificação de lecitina (<i>feed-grade</i>)..... | 9 |
| Tabela 4 - Principais aplicações e vantagens das lecitinas na indústria alimentar. | 13 |
| Tabela 5 – Fatores de ponderação e classificação atribuída a cada critério, para cada tipo de sistema de vácuo e respetiva classificação final. | 38 |
| Tabela 6 – Adaptabilidade dos evaporadores em estudo às características das lecitinas..... | 43 |
| Tabela 7 - Classificação atribuída a cada critério, para cada evaporador e respetiva classificação final. | 46 |
| Tabela 8 – Fator de ponderação e classificação atribuída a cada critério, para a filtração/clarificação da miscela/óleo e respetiva classificação final. | 51 |
| Tabela 9 – Fator de ponderação e classificação atribuída a cada critério para cada proposta e respetiva classificação final. | 61 |
| Tabela 10 - Indicadores económicos resultantes da análise económica a 10 anos, de cada uma das propostas, para o cenário 1..... | 66 |
| Tabela 11 - Indicadores económicos resultantes da análise económica a 10 anos, de cada uma das propostas, para o cenário 2..... | 66 |
| Tabela 12 - Análise quantitativa às propostas B e C com base nas análises técnica e económica, para o cenário 2. | 67 |
| Tabela 13 - Indicadores económicos para a proposta C, em cada um dos cenários sem incluir os custos envolvidos na clarificação do óleo. | 67 |

Índice de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 – Fluxograma dos processos de preparação e extração para os grãos de soja (esquerda) e para as sementes de colza (direita). Os retângulos a azul são as operações unitárias da preparação, a laranja as operações unitárias da extração e a cinzento os produtos obtidos após as operações unitárias. As setas a verde representam a recirculação do hexano. | 3 |
| Figura 2 - Estrutura molecular da fosfatidilcolina. | 5 |
| Figura 3 - Estrutura molecular da fosfatidiletanolamina. | 5 |
| Figura 4 - Estrutura molecular do fosfatidilinositol. | 5 |
| Figura 5 - Variação da viscosidade aparente das lecitinas em função do teor de humidade (70°C). (Gunstone et al., 2007)..... | 15 |
| Figura 6 - Desenho esquemático de um evaporador <i>batch</i> . (Lopez-Toledo, 2006) | 16 |
| Figura 7 - Desenho esquemático de um evaporador de tubo horizontal. (Glover, 2004) | 17 |
| Figura 8 - Desenho esquemático de um evaporador de tubo vertical curto. (Glover, 2004) | 18 |
| Figura 9 - Evaporador de filme ascendente ou de tubo vertical longo. (Glover, 2004) | 19 |
| Figura 10 - Desenho esquemático de um evaporador tubular de circulação forçada. («Forced Circulation Evaporator», 2018)..... | 20 |
| Figura 11 - Desenho esquemático de um evaporador de filme descendente. (Glover, 2004) | 21 |
| Figura 12 - Desenho esquemático de um evaporador de filme fino vertical. (Glover, 2004)..... | 22 |
| Figura 13 - Bomba de vácuo de anel líquido parada. (Vallo, 2018)..... | 23 |
| Figura 14 - Bomba de vácuo de anel líquido em funcionamento. (Vallo, 2018) | 23 |
| Figura 15 - Desenho esquemático da constituição de um ejetor de vapor. (Alves & Alves, 2014-2015) | 25 |
| Figura 16 - Filtração de bolo. (McCabe et al., 1993)..... | 28 |
| Figura 17 - Filtração em profundidade ou de clarificação. (McCabe et al., 1993) | 28 |
| Figura 18 - Filtração de fluxo cruzado. (McCabe et al., 1993) | 29 |
| Figura 19 - Filtro de prensa. (McCabe et al., 1993) | 30 |
| Figura 20 - Filtro de folhas horizontal (esquerda) e vertical (direita). («Vertical Leaf Filter», 2018) | 31 |
| Figura 21 - Filtro de <i>Nutsche</i> . («Nutsche Filter», 2018) | 32 |
| Figura 22 - Desenho esquemático de um filtro de tambor rotativo. (Coulson et al., 2005) | 33 |
| Figura 23 - Filtro de disco. (911 Metallurgist, 2018)..... | 34 |
| Figura 24 - Desenho esquemático de um filtro de esteira horizontal. (Coulson et al., 2005) | 35 |
| Figura 25 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização dos tipos de sistema de vácuo na operação de secagem das lecitinas. | 38 |
| Figura 26 - Ferramenta de auxílio no dimensionamento de sistemas de vácuo (ejetor de vapor)..... | 39 |
| Figura 27 - Ferramenta de auxílio no dimensionamento de sistemas de vácuo (bomba de vácuo de anel líquido). | 39 |
| Figura 28 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de disco). | 40 |
| Figura 29 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de esteira)..... | 41 |
| Figura 30 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de tambor rotativo a vácuo)..... | 41 |
| Figura 31 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de folhas)..... | 42 |

| | |
|---|----|
| Figura 32 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de prensa). | 42 |
| Figura 33- Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização das tecnologias de secagem em estudo. | 45 |
| Figura 34 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização da filtração/clarificação da miscela/óleo para remoção dos sólidos a montante da secagem das lecitinas..... | 50 |
| Figura 35 - Representação de um evaporador de filme horizontal. («Horizontal Thin Film Dryer - Buss-SMS-Canzler GmbH», 2018)..... | 54 |
| Figura 36 - Representação da secção transversal de um evaporador de filme. («Thin Film / Wiped Film Evaporator LCI Corporation», 2018) | 54 |
| Figura 37 - Rotor de folga fixa. («Thin Film / Wiped Film Evaporator LCI Corporation», 2018) | 55 |
| Figura 38 - Permutador de calor de superfície raspada para arrefecimento das lecitinas. («RheoHeat - Scraped surface heat exchanger», 2018) | 56 |
| Figura 39 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização das propostas. | 60 |
| Figura 40 - Matriz de risco para embalagem em <i>flexitanks/flexibags</i> | 63 |
| Figura 41 - Matriz de risco para embalagem em bidons. | 63 |
| Figura 42 - Matriz de risco para expedição do produto em cisternas. | 64 |
| Figura 43 - Sensibilidade do indicador económico PRI à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas. | 69 |
| Figura 44 - Sensibilidade do indicador económico VAL à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas. | 70 |
| Figura 45 - Sensibilidade do indicador económico TIR à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas. | 71 |

Lista de símbolos e abreviaturas

| | |
|-------------|---|
| AOCS | <i>American Oil Chemistry Society</i> |
| ATEX | Atmosfera explosiva |
| DTS | Dessolventizador-tostador-secador |
| HDL | <i>High Density Lipoproteins</i> (Lipoproteínas de alta densidade) |
| LDL | <i>Low Density Lipoproteins</i> (Lipoproteínas de baixa densidade) |
| OGM | Organismos geneticamente modificados |
| PA | Ácido fosfatídico |
| PC | Fosfatidilcolina |
| PE | Fosfatidiletanolamina |
| PI | Fosfatidilinositol |
| PLC | <i>Programmable logic controller</i> (controlador lógico programável) |
| PS | Fosfatidilserina |

1. Introdução

1.1. Processo de produção de bagaços de soja e colza

Os grãos de soja e sementes de colza são recebidos na fábrica por meio marítimo, rodoviário ou ferroviário.

- Preparação dos grãos de soja e sementes de colza

Ambas as matérias-primas são sujeitas a um processo de limpeza em que são removidas impurezas arrastadas com a matéria-prima, tais como, pedras, vidros e metais. Assim, os grãos de soja e as sementes de colza passam por um peneiro, seguindo para um separador gravimétrico e por fim para um separador magnético. Após a limpeza, inicia-se o processo de preparação da semente.

A preparação ocorre antes da extração e é uma fase essencial para se obter um bom rendimento em óleo e produtos (óleo e bagaço) de qualidade.

Na preparação, os grãos de soja são alimentados a trituradores seguindo para condicionadores. Nos condicionadores, os grãos são partidos e aquecidos (com vapor indireto) com o objetivo de tornar a semente mais plástica e de desnaturar os inibidores da tripsina, enzimas que afetam negativamente a digestão animal.

Os grãos partidos e aquecidos são alimentados a laminadores que, com força mecânica, vão laminar os grãos, deixando-os na forma ideal de flocos para a extração química. Finalmente, os flocos passam por um *expander*, onde há um aumento da área específica e uma diminuição da densidade do sólido, mas ao serem compactados ocorre um aumento da densidade da corrente (*bulk*). Esta fase promove, também, a ruptura das paredes celulares onde é armazenado o óleo, permitindo que o solvente penetre com mais facilidade na estrutura celular, aquando da extração do óleo. Assim, o material expandido fica preparado para a extração química.

Para as sementes de colza, o processo de preparação é ligeiramente diferente. As sementes são pré-aquecidas e entram de seguida nos laminadores, não sendo necessária a fase de trituração devido ao tamanho das sementes ser inferior ao dos grãos de soja. As sementes de colza após laminagem seguem para os condicionadores e por fim para a etapa de prensagem onde ocorre remoção de 60 a 70% do óleo (que, normalmente, já não passa na desgomagem física pois já se encontra com uma concentração de cerca de 200 ppm de fosfatídeos não hidratáveis).

Depois da preparação estar concluída, os sólidos (de soja ou de colza) seguem para o processo de extração química. A partir daqui o processo é idêntico para ambas as matérias-primas.

- Extração do óleo com hexano

A extração de óleo ocorre num extrator rotativo em que os sólidos são alimentados ao mesmo e circulam em contracorrente com a miscela (mistura de hexano e óleo), com baixa concentração de óleo. Desta forma, a extração do óleo dá-se pelo método de percolação em que o solvente ao entrar no interior das sementes mistura-se com o óleo, transportando-o depois para o exterior devido à diferença de concentrações. Portanto, o bagaço que sai do extrator entra em contacto com a miscela

mais concentrada em hexano, garantindo a maior extração de óleo possível. No final deste processo obtêm-se duas correntes, a miscela e o bagaço.

Este processo deve ocorrer ligeiramente abaixo da pressão atmosférica para evitar fugas de hexano, mas não em demasia, para prevenir entradas de ar. Após a drenagem, o sólido (bagaço) é descarregado através de uma tremonha e é conduzindo para o Dessolventizador-Tostador-Secador (DTS).

O bagaço é alimentado ao DTS, passa através dos vários pratos que compõem o equipamento e onde é adicionado vapor a diferentes temperaturas. Nos primeiros pratos de pré-dessolventização, ocorre a maior parte da remoção do solvente. De seguida, na zona de dessolventização ocorre a remoção do solvente e a tostagem, que consiste num tratamento térmico para garantir a eliminação de fatores anti nutricionais e eliminar substâncias de sabor indesejável na alimentação animal. Nos últimos pratos ocorre a secagem e o arrefecimento da farinha, caso seja necessário. O hexano ainda presente no bagaço é arrastado pelo vapor, do qual é removido a jusante, pela adição de água quente.

A saída de miscela do extrator ocorre no local de maior concentração em óleo, sendo depois encaminhada para o processo de destilação. A miscela é alimentada a torres de destilação a vácuo para remover o hexano, obtendo-se assim o óleo cru. O hexano evaporado na destilação é condensado, sendo separado da água num decantador. O hexano recuperado é depois reutilizado na extração.

O óleo cru é sujeito a um processo de desgomagem física por centrifugação com adição de água, de forma a eliminar os fosfatídeos hidratáveis. Esta remoção tem como objetivo reduzir a concentração de fósforo no óleo, ajustando a composição deste último aos valores pretendidos. O óleo é sujeito a aquecimento e posterior secagem a vácuo, obtendo-se o óleo desgomado/bruto.

Na etapa de desgomagem física ocorre a entrada de óleo cru e água de condensados, que são misturados instantaneamente. A mistura é encaminhada para uma centrífuga de pratos da qual resulta o óleo desgomado como fase leve e uma fase de gomas como fase pesada, sendo estas gomas constituídas essencialmente pela água adicionada e pelos fosfatídeos removidos durante o processo (lecitinas), arrastando consigo um pouco de óleo.

As lecitinas são adicionadas ao bagaço (no DTS) tornando-o mais nutritivo. As impurezas removidas no processo de limpeza que contêm fontes de fibra, tais como paus, cascas e vagens, são também adicionadas ao bagaço após tratamento das mesmas.

O bagaço é armazenado em armazéns até seguir para expedição. O óleo desgomado é armazenado em tanques intermédios para ser comercializado.

Na **Figura 1** está representado um fluxograma simplificado das operações unitárias e produtos envolvidos nas fases de preparação e extração descritas anteriormente.

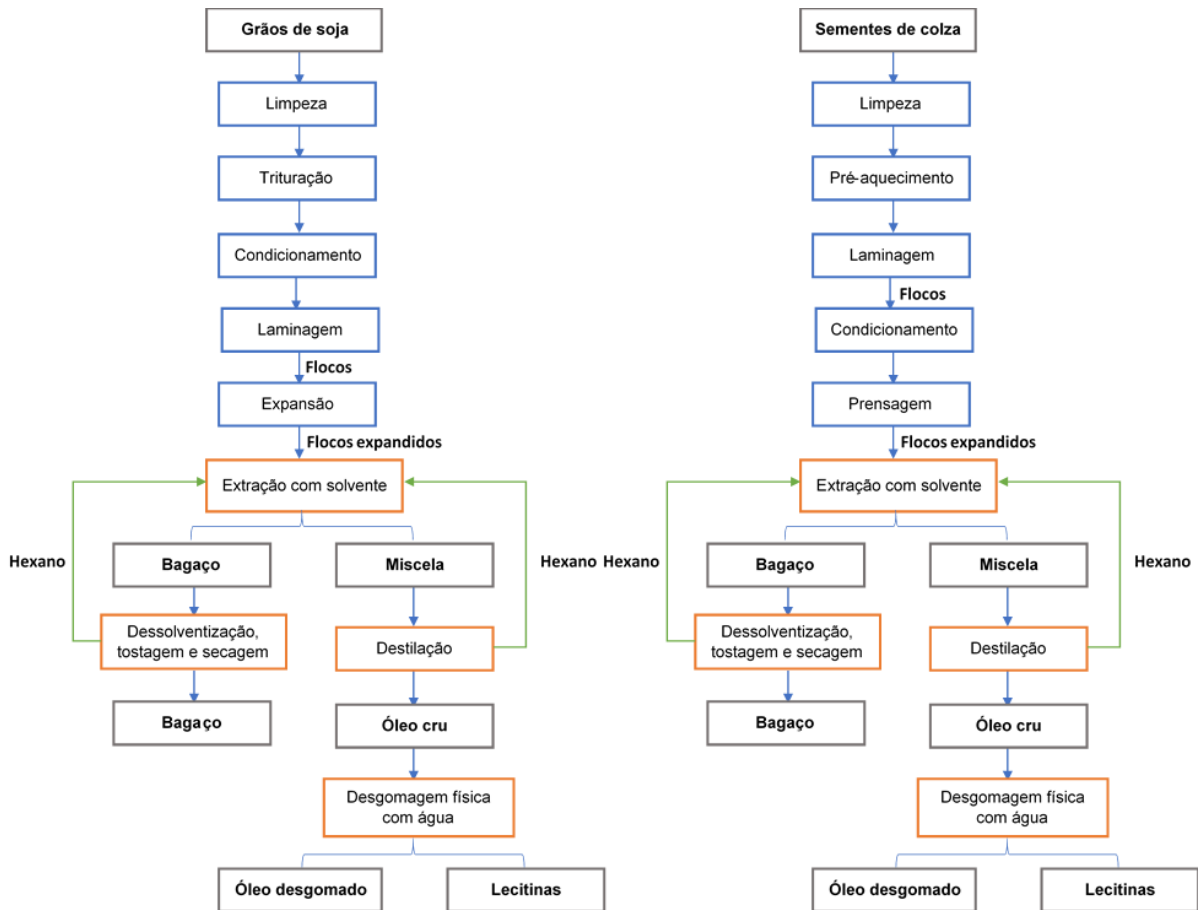


Figura 1 – Fluxograma dos processos de preparação e extração para os grãos de soja (esquerda) e para as sementes de colza (direita). Os retângulos a azul são as operações unitárias da preparação, a laranja as operações unitárias da extração e a cinzento os produtos obtidos após as operações unitárias. As setas a verde representam a recirculação do hexano.

1.2. Estado da arte da desgomagem física

A desgomagem é o processo que leva à remoção dos fosfatídeos presentes nos óleos vegetais e que podem interferir nos processos subsequentes. A desgomagem física, também conhecida por desgomagem aquosa, é um processo simples e de reduzido investimento. As gomas (lecitinas) removidas neste processo podem ser aproveitadas e vendidas devido ao seu valor de mercado. (Telles Moraes, 2015)

Nesta etapa são removidos os fosfatídeos hidratáveis do óleo cru, por adição de água quente, numa centrífuga. A água não deve conter sais de cálcio e magnésio, pois estes reduzem a eficiência da desgomagem e a quantidade de água adicionada deve ser equivalente a 2% do caudal de óleo, provocando assim a precipitação dos fosfatídeos hidratáveis. (Al-Kahtani, Hanna, & Handel, 1984) Esta remoção é feita, também, com o objetivo de reduzir a concentração de fósforo no óleo, ajustando a composição deste último aos valores pretendidos.

A temperatura de operação deve ser ajustada para que ocorra uma boa desgomagem e uma boa separação em simultâneo. Temperaturas baixas favorecem a desgomagem, mas promovem maiores perdas de óleo na separação, devido à sua maior viscosidade, enquanto que temperaturas

elevadas permitem menores perdas de óleo, mas mais gomas permanecerão no óleo desgomado, devido à maior solubilidade destas no óleo. A temperatura ótima situa-se entre 70 e 80°C. (Dorsa, 2004)

O rendimento da desgomagem depende da proporção de fosfatídeos hidratáveis, relativamente ao total de fosfatídeos presentes. Admite-se que para a soja, 90% dos fosfatídeos são hidratáveis enquanto que para a colza variam entre 55 e 80%. (Shahidi & Zhong, 2005) Estima-se que a desgomagem física remove 70 a 80% dos fosfatídeos presentes no óleo. (Mandarino & Roessing, 2001)

As gomas obtidas da desgomagem, que contêm cerca de 50% de humidade, podem ser secas sob vácuo de modo a obter-se a lecitina comercial com menos de 1% de humidade.

1.3. Enquadramento e motivação

Atualmente, a corrente de lecitinas que resulta da desgomagem física (ou aquosa) é adicionada ao bagaço no DTS, o que aumenta o seu valor nutricional, mas também a quantidade de óleo/gordura nas mesmas. Além disso, as lecitinas têm elevado valor nutricional humano e podem potenciar ganhos não só pelo seu potencial de nicho de mercado, como também por minimizar o óleo residual no bagaço.

Deste modo, a corrente de lecitinas pode ser recuperada e vendida com as especificações exigidas pelo mercado (*feed grade*).

Foi neste contexto que surgiu a motivação para esta dissertação, de modo a avaliar a potencial valorização das lecitinas no mercado, identificar o tipo de tratamento a realizar à corrente de lecitinas proveniente da desgomagem e analisar técnica e economicamente a viabilidade deste projeto.

1.4. Lecitinas

1.4.1. Caracterização físico-química e métodos de análise

A lecitina de soja comercial é uma mistura complexa de fosfatídeos, triglicéridos, fito-glicolípidos, fito-esteróis, tocoferóis e ácidos gordos. (Braverman, 1990) Os fosfatídeos são o principal ingrediente funcional das lecitinas (Szuhaj, 1983)

A composição típica da lecitina bruta é a seguinte:

- Óleo de soja: 30 – 50%;
- Fosfatidilcolina (PC): 15% (principal composto ativo);
- Fosfatidiletanolamina (PE): 13% (também conhecido por cefalina);
- Fosfatidilinositol (PI): 9%;
- Ácido fosfatídico (PA): 5%;
- Fosfatidilserina (PS): 2%;

- Substâncias diversas (glicolípidos, carboidratos, esteróis e tocoferóis): 5 - 25%;
- Humidade: 1%.

A fosfatidilcolina (**Figura 2**) caracteriza-se por uma base de glicerol com ácidos gordos em duas posições não polares constituídas principalmente por ácido palmítico, esteárico, oleico, linoleico e linolénico. Na terceira posição encontra-se o grupo típico de colina. A colina é polar devido à separação da carga negativa do grupo fosfato e da carga positiva no azoto (íões híbridos). Toda a lecitina é polar porque possui uma cadeia fosfatídica polar e grupos de ácidos gordos não-polares. As lecitinas são um bom emulsionante devido à sua polaridade. (Braverman, 1990)

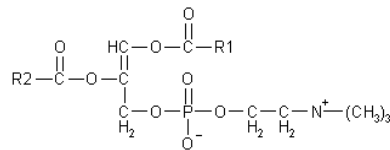


Figura 2 - Estrutura molecular da fosfatidilcolina.

A fosfatidiletanolamina (**Figura 3**) contém ácidos gordos nas posições 1 e 2 semelhantes à PC. No entanto, a cadeia fosfatídica de três posições tem o seu grupo amina no final em vez de no meio da cadeia. Esta cadeia também é polar, à semelhança da PC, devido à separação de cargas. (Braverman, 1990)

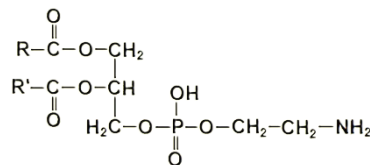


Figura 3 - Estrutura molecular da fosfatidiletanolamina.

O fosfatidilinositol (**Figura 4**) contém ácidos gordos nas posições 1 e 2, à semelhança da PC e da PE. O seu ramo fosfatídico é bastante diferente das duas outras moléculas, porque tem como grupo terminal um poliálcool cíclico (inositol). Isto prova que o PI possui uma polaridade significativamente diferente da PC e da PE. (Braverman, 1990)

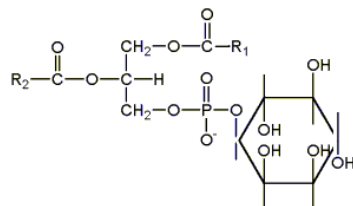


Figura 4 - Estrutura molecular do fosfatidilinositol.

A qualidade das lecitinas é avaliada por vários parâmetros, entre eles, o teor de insolúveis em acetona, teor de insolúveis em hexano, teor de insolúveis em tolueno, índice de acidez, humidade, cor, índice de peróxidos, pH e viscosidade. Para a determinação destes parâmetros recorre-se muitas vezes a metodologias sugeridas pela *American Oil Chemistry Society* (AOCS). (AOCS, 2018)

As metodologias das análises físico-químicas são as que se seguem, com os respectivos números atribuídos pela AOCS:

- **Insolúveis em acetona** (AOCS – Ja-4-46)

Os insolúveis em acetona representam, aproximadamente, o teor de fosfolípidos presentes na lecitina. A insolubilidade em acetona determina o rendimento da lecitina em relação ao teor de fosfatídeos, ou seja, corresponde à fração hidratável retirada do óleo bruto, que não se solubiliza em acetona, e cujas características são a não polaridade das moléculas de fosfolípidos. O índice de insolúveis em acetona na lecitina comercial deve ser no mínimo 60%.

- **Insolúveis em hexano** (AOCS – Ja-3-87)

A insolubilidade em hexano é uma das medidas de pureza da lecitina e, normalmente, é devida a fibras residuais, carboidratos, pigmentos carotenóides e clorofilados e auxiliares de filtração. A matéria insolúvel em hexano determina as impurezas insolúveis polares que acompanham a lecitina e que lhes causa turbidez, mau aspeto e sedimentação. O índice máximo de insolúveis em hexano não deve exceder 0,3% e raramente é superior a 0,1% (quando usadas em alimentos). A lecitina com um teor de insolúveis em hexano de 0,3% não é recomendada para uso alimentar.

Esta determinação pode também ser feita utilizando tolueno em vez de hexano.

- **Viscosidade** (AOCS – Ja-10-87)

A viscosidade influencia a facilidade de manuseio do produto e depende diretamente da concentração de fosfolípidos, do teor de humidade e do índice de acidez.

A viscosidade da lecitina pode ser medida com um viscosímetro rotativo de *Brookfield*, uma técnica amplamente utilizada. Os resultados são dados em Poise (P) ou centipoise (cP) a 25°C (ou 77°F).

À temperatura de 70°C (e com um teor de humidade inferior a 1%), tipicamente as lecitinas de soja e colza apresentam viscosidades de cerca de 10 P e 90 P, respetivamente. À temperatura de 25°C (e com um teor de humidade inferior a 0,6%) a lecitina apresenta uma viscosidade entre 80 e 120 Poise. (Lambourne, Covey, Chai, & Dunstan, 1999)

- **Humidade** (AOCS – Ja-2b-87)

O teor de humidade na lecitina, após o processo de secagem, é geralmente inferior a 1%. Um baixo teor de humidade é extremamente importante para assegurar a estabilidade microbológica. Um elevado nível de humidade confere-lhe um grande potencial de alteração e/ou degradação química.

O teor de humidade presente na lecitina não pode ser determinado por métodos de secagem em fornos a vácuo, pois estes métodos degradam o produto e levam à determinação de níveis de humidade pouco fiáveis. Assim, determina-se a humidade por destilação com um solvente imiscível ou mais frequentemente pelo método de Karl Fischer.

O método de Karl Fischer determina a quantidade de água na lecitina por titulação com um reagente de Fischer que reage quantitativamente com água.

- **Índice de Acidez** (AOCS – Ja-6-55)

O índice de acidez representa a acidez titulável medida em mg KOH por g de amostra e é representativo da acidez dos fosfolípidos, bem como dos ácidos gordos livres. No entanto, não é indicativo do pH, uma vez que os fosfatídeos ionizam a maioria dos sistemas, e não deve ser confundido com teor de ácidos gordos livres ou ácidos minerais. O método correto para determinar o teor de ácidos gordos livres consiste também numa titulação, mas apenas da parte solúvel em acetona.

A lecitina geralmente possui um pH neutro em meio aquoso. Um índice de acidez superior a 30 mg KOH/g pode indicar a degradação da lecitina, devido a um processo inadequado ou a sementes/grãos de má qualidade.

- **Índice de Peróxidos** (AOCS – Ja-8-87)

O índice de peróxidos é uma medida do peróxido residual do processo de branqueamento (quando existe). O peróxido é usado em pequenas quantidades, muitas vezes para aclarar a cor da lecitina, e é expresso em meq de peróxido por kg de amostra (miliequivalente/kg).

Este índice traduz, também, o grau de deterioração relativamente à oxidação dos fosfolípidos e produção de odores e sabores indesejáveis.

- **pH** (AOCS – Ja-8-87)

O pH da lecitina é medido numa solução aquosa de 1% de etanol. A maioria das lecitinas apresenta valores de pH 7 e quando modificada pode variar entre 6 e 8.

- **Cor** (AOCS – Ja-9-87 – Método de Gardner)

A cor da lecitina é fundamental como padrão de qualidade estética, relevante sob o ponto de vista comercial. Revela, também, o excesso de temperatura no processo ou secagem excessiva, o que pode afetar as propriedades funcionais da lecitina. Além disso, pode indicar deterioração devido a uma armazenagem incorreta (exposição à luz, por exemplo). A estabilidade da cor da lecitina exige que se evite a sua exposição mais de 60°C.

Relativamente à cor, a lecitina é classificada como, não branqueada, branqueada e duplamente branqueada. Um produto não branqueado não foi tratado ao nível da cor (i.e., não passou pelo processo de branqueamento); um produto branqueado foi tratado apenas com um agente branqueador, normalmente peróxido de hidrogénio; um produto duplamente branqueado foi tratado com dois agentes de branqueamento (peróxido de hidrogénio e peróxido de benzoíla). No entanto, os métodos de branqueamento são cada vez menos utilizados dado que os processos de produção da lecitina (não branqueada) são cada vez mais eficientes e inovadores de modo a obter um produto de alta qualidade, sem se passar pela fase de branqueamento.

Convencionalmente, os tons âmbar da lecitina são medidos na escala de Gardner de 9 a 17 na sua forma não diluída (11 é a cor mel, 17 é a cor âmbar escuro). O método de Gardner determina

a cor da lecitina por comparação de uma amostra não diluída com padrões de uma cor específica conhecida.

Outro método para determinar a cor da lecitina consiste na utilização do colorímetro Lovibond. Este instrumento analisa a cor por meio de comparações entre a cor da amostra e a escala de cores Lovibond, que contempla medidas de cor para vermelho, amarelo, azul e neutro. (França, Santos, & Lima, 2007)

O colorímetro de Lovibond funciona para amostras opacas ou transparentes através de métodos de transmitância ou reflexão da luz. As amostras opacas, como é o caso das lecitinas, são analisadas por meio da luz refletida, quando posicionadas contra a luminosidade ou fonte de luz. A medida da cor é determinada pela composição de valores lidos nas escalas de cada cor no equipamento, no ponto de melhor concordância entre a cor da amostra e a cor formada pelo ajuste dos filtros do colorímetro. (França et al., 2007)

1.4.2. Especificações de mercado e matérias-primas

A soja é, de longe, a fonte mais importante de lecitina comercial. No entanto, a lecitina de colza tem-se tornado cada vez mais popular e requisitada na última década. (Ozdikicierler & Gumuskesen, 2018)

Embora a semente de colza possua metade da lecitina que o grão de soja possui, o interesse pela lecitina de colza cresceu devido a problemas de OGM (organismos geneticamente modificados) na soja e as potenciais reações alérgicas que daí advêm.

Existem diversas variedades de colza, que foram desenvolvidas para vários usos finais. A colza com elevado teor de ácido erúcido (cerca de 45%) é utilizada em óleos industriais. O ácido erúcido é usado para a fabricação de agentes tensioativos, lubrificantes de alta temperatura, materiais plásticos, vernizes e detergentes. As variedades de colza com níveis de ácido erúcido mais baixos (inferiores a 2%), como é o caso da canola, são destinadas ao consumo animal e humano. (Carlsson et al., 2007) O teor de óleo nas sementes de colza/canola varia de 40 a 48%. (Moretto & Fett, 1998)

As principais diferenças entre a lecitina de soja e a lecitina de colza/canola estão na composição dos ácidos gordos (**Tabela 1**), apresentando também algumas diferenças ao nível da composição de fosfatídeos (**Tabela 2**).

Tabela 1 - Composição de ácidos gordos, em percentagem, para as lecitinas de soja e colza. (van Nieuwenhyzen, 2014)

| Ácido gordo | Lecitina de soja | Lecitina de colza |
|---------------------------|------------------|-------------------|
| Palmítico (C16:0) | 16 | 7 |
| Estearico (C18:0) | 4 | 1 |
| Oleico (C18:1) | 17 | 56 |
| Linoleico (C18:2) | 55 | 25 |
| Linolénico (C18:3) | 7 | 6 |
| Outros | 1 | 5 |

Tabela 2 - Composição dos principais fosfatídeos, em percentagem, para as lecitinas de soja e colza. (van Nieuwenhyzen, 2014)

| Fosfatídeo | Lecitina de soja | Lecitina de colza |
|------------------------------|------------------|-------------------|
| Fosfatidilcolina | 15 | 17 |
| Fosfatidiletanolamina | 13 | 9 |
| Fosfatidilinositol | 9 | 10 |
| Ácido fosfatídico | 5 | 4 |

As empresas produtoras de lecitina comercial devem satisfazer determinados requisitos quantitativos e qualitativos, assim como monitorizar todas as etapas do processo de produção desde a receção da semente, de modo a garantir a produção de uma lecitina de qualidade a todos os níveis. A **Tabela 3** apresenta uma especificação típica da lecitina *feed – grade*.

Tabela 3 - Especificação de lecitina (*feed-grade*).

| Parâmetro | Teor |
|------------------------------|------------------|
| Humidade | máx. 1,0 % |
| Insolúveis em Tolueno | máx. 1,0 % |
| Insolúveis em Acetona | min. 60 % |
| Índice de Acidez | máx. 30 mg KOH/g |
| Índice de Peróxidos | máx 10 meq/kg |

Vários fatores têm um grande impacto na qualidade das lecitinas em todas as etapas do seu processo de produção, entre elas, condições de crescimento do grão ou semente, altura da colheita, armazenagem do grão/sememente, extração e armazenamento do óleo cru, condições de desgomagem, armazenamento das gomas hidratadas, branqueamento (se existir), secagem das lecitinas e seu armazenamento. (Braverman, 1990)

Condições de crescimento: as condições de crescimento do grão/sememente podem ter algum efeito na composição dos ácidos gordos das lecitinas. Por exemplo, a soja cultivada em latitudes nórdicas possui maior teor de ácido linolénico do que as cultivadas em climas mais quentes. Verões mais quentes tendem a reduzir os teores de ácidos gordos insaturados. A composição dos solos afeta o conteúdo mineral das lecitinas.

Altura da colheita: a altura em que é feita a colheita é geralmente afetada pelas condições de plantação da primavera e pelas geadas iniciais que podem atrasar a plantação, resultando depois numa colheita prematura. Os grãos/sementes verdes e imaturos não só afetam a cor da lecitina, mas também a quantidade e composição dos fosfatídeos. Grãos danificados pelo gelo podem resultar em menor quantidade de fosfatídeos e maior de ácidos gordos livres. Esta situação leva à diminuição dos insolúveis em acetona e a diferentes consistências da goma, o que afeta a eficiência da desgomagem e diminui a viscosidade das lecitinas.

Armazenagem do grão: os grãos e sementes são sistemas vivos que sofrem alterações na sua composição com o tempo e com as condições de armazenamento. Um armazenamento prolongado pode alterar o teor de insolúveis em acetona. Os grãos velhos tendem a ter teores mais altos de ácido fosfatídico e ácidos gordos livres, o que reduz a viscosidade e os solúveis em acetona.

Os grãos armazenados em silos são, normalmente, os melhores grãos, se forem devidamente misturados e mantidos a baixa humidade. Aqueles que apresentam danos causados por aquecimento e/ou exposição ao calor ou sofreram deterioração e fermentação por perda de água, transferem odores a queimado e azedo para a lecitina. Os grãos que se encontram divididos e partidos afetam tanto as lecitinas como a qualidade do óleo, pois, uma vez que o invólucro está quebrado, a exposição à luz e/ou ao calor induzirá oxidação e decomposição das lecitinas.

Extração do óleo: a extração com um solvente em contracorrente pode resultar em lecitinas de má qualidade se a temperatura da destilação durante a remoção do solvente for muita alta e o óleo não for devidamente arrefecido posteriormente. São necessárias temperaturas moderadas e tempo de exposição curto.

Armazenamento do óleo cru: as lecitinas e os tocoferóis presentes no óleo cru, ajudam a manter a estabilidade à oxidação durante o armazenamento. No entanto, a qualidade das lecitinas pode ser afetada se os tanques de armazenamento de óleo cru estiverem sobreaquecidos e os fundos permitirem o azedamento e fermentação do produto.

Condições de desgomagem: a desgomagem com água é ideal para obter lecitinas de alta qualidade. A maioria dos aditivos usados na desgomagem são geralmente nocivos para as lecitinas, à exceção do anidrido acético. Aditivos como o ácido fosfórico tendem a queimar as lecitinas durante a secagem. O ácido oxálico torna as lecitinas tóxicas e os sais inorgânicos afetam as suas propriedades físicas e funcionais.

Armazenamento da goma hidratada: quando as gomas hidratadas (lecitinas antes da secagem) são armazenadas durante várias horas, por vezes adiciona-se peróxido de hidrogénio diluído para estabilizar as gomas e evitar a deterioração bacteriana.

Controlo do branqueamento: um melhor controlo do processamento, armazenamento e manuseio do grão, evita ou reduz o grau de branqueamento necessário para controlar a cor das lecitinas. No entanto, se for necessário pode usar-se como agente de branqueamento o peróxido de hidrogénio e, para um duplo branqueamento, utiliza-se também o peróxido de benzoíla.

Secagem da lecitina: a secagem de lecitinas deve ser controlada quer ao nível da temperatura, quer ao nível da pressão. O tempo de residência deve ser também o mais curto possível para evitar a decomposição do produto. Além disso, após a secagem, as lecitinas devem ser arrefecidas para prevenir o seu escurecimento. Esta fase do processo e as condições de operação necessárias serão explicadas em maior detalhe ao longo deste trabalho.

Armazenamento e manuseio: após a secagem das lecitinas, estas devem ser armazenadas em tanques apropriados que são aquecidos de modo a impedir o escurecimento do produto e o aumento da viscosidade, o que dificultaria o bombeamento posterior. A agitação no tanque é adequada para dispersar os fosfatídeos.

1.4.3. Aplicações e perspectivas do mercado das lecitinas

As lecitinas podem ser obtidas da gema de ovo e de diversas fontes de óleos vegetais. A fonte mais comum é a soja (com 2% a 3% de lecitina), podendo também ser obtidas dos óleos de palma, canola e girassol. (Fani, 2016)

As lecitinas são utilizadas, principalmente, pelos seus benefícios funcionais em alimentos. Das suas principais propriedades funcionais destacam-se: agente emulsionante (comestível); redutor de viscosidade de emulsões gordurosas; agente dispersante e humectante; agente estabilizador; antioxidante para compostos orgânicos e inibidor de cristalização. (Portantiolo, 2009)

As suas principais aplicações são, ao nível da indústria alimentar, na formulação de chocolates, biscoitos, leite em pó, margarinas, gelados, massas alimentícias, panificações e produtos instantâneos; na indústria de cosméticos; na indústria química em tintas, plásticos, borrachas, sabões, lubrificantes e graxas; e na indústria de rações para animais. (Fani, 2016)

As lecitinas como emulsionantes

O seu poder emulsionante é a característica química mais importante das lecitinas. Os emulsionantes são substâncias que apresentam na mesma molécula, uma porção hidrofílica, ou seja, que tem afinidade com a água e uma porção lipofílica, que tem afinidade com o óleo ou outras substâncias apolares, tal como acontece nas moléculas de fosfolípidos presentes nas lecitinas. Esta característica faz com que os emulsionantes exibam a capacidade de formar emulsões, tornando miscíveis substâncias normalmente imiscíveis, como é o caso do óleo e da água. (Fani, 2016)

As lecitinas enquanto emulsionantes, revestem fisicamente as partículas, principalmente aquelas que contêm gordura na sua composição, de tal forma que o óleo quando em meio aquoso, promove uma redução da tensão superficial entre as fases sólida e líquida, fazendo com que estas se misturem e formem uma única fase.

As lecitinas brutas (obtidas pela desgomagem com água e posterior secagem) normalmente possuem propriedades emulsionantes do tipo água/óleo, ou seja, no meio óleo formam micelas com a água.

Principais aplicações na indústria alimentar (Fani, 2016; Portantiolo, 2009)

As lecitinas são utilizadas nos alimentos como aditivos, cuja função é emulsificar e estabilizar as reações químicas entre os diversos constituintes dos alimentos como proteínas, carboidratos, lípidos e água. Como estabilizantes favorecem e mantêm as características físicas das emulsões e das suspensões e, em alguns tipos de produtos, podem até ter a função de espessantes, ou seja, aumentam a viscosidade de soluções, emulsões e suspensões, além de melhorar a consistência dos alimentos.

As lecitinas funcionam como emulsionante em alimentos como o leite, margarina, pudim, chocolate, produtos de panificação, queijos, substitutos do leite, cremes e gelados. São também um bom agente antiespuma, por exemplo, em cremes, batidos, gelados e uma grande variedade de doces.

As lecitinas são igualmente utilizadas como agente humectante em muitos produtos, isto é, conferem a capacidade de as partículas se solubilizarem rapidamente. Exemplos de produtos em que as lecitinas têm esta função são: chocolate em pó, misturas em pó para bebidas instantâneas, pudins, misturas para bolos, sopas e molhos instantâneos.

Na **Tabela 4** encontram-se sintetizadas as principais aplicações das lecitinas na indústria alimentar e as principais vantagens da sua presença em cada um dos produtos alimentares.

Tabela 4 - Principais aplicações e vantagens das lecitinas na indústria alimentar.

| Aplicação | Vantagens |
|-----------------------------|--|
| Margarina | <ul style="list-style-type: none"> - Evitam separações durante os períodos de armazenamento; <li style="padding-left: 40px;">- Melhoram a textura; <li style="padding-left: 40px;">- Retêm a humidade; <li style="padding-left: 40px;">- Evitam respingos durante a fritura; - Protegem as vitaminas (agentes antioxidantes); <li style="padding-left: 40px;">- Retardam a cristalização; - Aumentam o tempo de vida útil do produto. |
| Chocolates | <ul style="list-style-type: none"> - Facilitam a dispersão das gorduras de diferentes pontos de ebulição, diminuindo a viscosidade; <li style="padding-left: 40px;">- Diminuem o uso de manteiga de cacau; - O processo de fabrico de chocolate opera a temperaturas mais baixas; <li style="padding-left: 40px;">- Evitam a perda de aromas voláteis; - Melhoram a aparência, textura, gosto e aroma do chocolate. |
| Leite em pó | <ul style="list-style-type: none"> - Aumentam a estabilidade e o tempo de vida útil do leite devido às qualidades emulsionantes, antioxidantes e dispersantes. |
| Biscoitos e Bolachas | <ul style="list-style-type: none"> <li style="padding-left: 40px;">- Diminuem a quantidade de gordura nas formulações; <li style="padding-left: 40px;">- Melhoram a resistência e a elasticidade da massa laminada; - Melhoram a textura, sabor, retenção de humidade, desmoldagem e tempo de vida útil; <li style="padding-left: 40px;">- Reduzem as quebras dos produtos. |
| Gelados | <ul style="list-style-type: none"> - Conferem ao gelado uma estrutura mais fina e melhor emulsão dos diversos ingredientes devido à inibição de cristalização. |
| Massas alimentícias | <ul style="list-style-type: none"> - Auxiliam na dispersão e fixação do pigmento betacaroteno, conferindo maior uniformidade e brilho ao produto final. |
| Panificação | <ul style="list-style-type: none"> - Reduzem o tempo de amassamento e aumentam a absorção de água devido às suas propriedades emulsionantes e de retenção de água; <li style="padding-left: 40px;">- Reduzem o custo em emulsionantes, gordura e açúcar; <li style="padding-left: 40px;">- Retardam a síntese do gel de amido; - Resultam em pães de crostas mais macias, granulação mais fina e textura uniforme. |
| Bebidas | <ul style="list-style-type: none"> - Atuam como estabilizadores e emulsionantes. |

As lecitinas são também uma fonte de colina, um nutriente essencial para o bom desenvolvimento cerebral do feto durante a gestação. A colina contribui também para o bom funcionamento do fígado e para prevenir a perda de memória com a idade. (Fani, 2016)

As lecitinas apresentam vários benefícios ao nível da saúde, entre os quais: (Sousa Nilo, 2016)

- Regulam a produção hormonal e menstruação;
- Combatem dores de cabeça, reumáticas e insónias;
- Aumentam a produção do bom colesterol (HDL, *High Density Lipoproteins*) e reduz o mau (LDL, *Low Density Lipoproteins*), prevenindo também derrames e enfartes;
- Reduzem o aparecimento de gripes e febre;
- Aceleram o metabolismo;
- Controlam os sintomas da menopausa;
- Previnem a osteoporose;
- Atuam na construção dos tecidos nervosos e cerebrais;
- Estimulam os movimentos peristálticos do intestino.

A crescente consciencialização sobre os emulsionantes naturais e a sua crescente procura no fabrico de produtos alimentares induzirá o crescimento do mercado das lecitinas. As propriedades emulsionantes e lubrificantes das lecitinas em conjunto com a sua origem natural, têm impulsionado a sua procura para aplicações industriais e alimentares, entre outras. (Research, 2017a, 2017b)

É expectável que a abundante disponibilidade de matérias-primas, assim como a crescente procura por parte das indústrias de uso final, tenham um impacto bastante positivo no crescimento do mercado deste produto. (Research, 2017a, 2017b)

1.5. Tecnologias de secagem industrial (por evaporação da água)

As lecitinas obtidas após a desgomagem contêm um teor de humidade de aproximadamente 50% que deve ser reduzido para um teor máximo de 1% de modo a obter-se lecitina comercial. Assim sendo, após a desgomagem física, segue-se uma secagem (evaporação da água) das lecitinas que constitui um ponto crítico de controlo no seu processo de produção, devido à tendência de as gomas escurecerem com a ação do calor e a variação da viscosidade à medida que a humidade vai diminuindo.

Esta variação da viscosidade das lecitinas com a humidade encontra-se representada na **Figura 5**, na qual a viscosidade do produto começa a aumentar para um teor de humidade de 20% até atingir uma viscosidade máxima de aproximadamente 9000 P (Poise) a uma humidade de 7 a 8%. A partir desse momento, a diminuição do teor de humidade provoca o decréscimo da viscosidade até cerca de 300 P a 4% de humidade. (Erickson, 1995; Gunstone, Harwood, & Dijkstra, 2007)

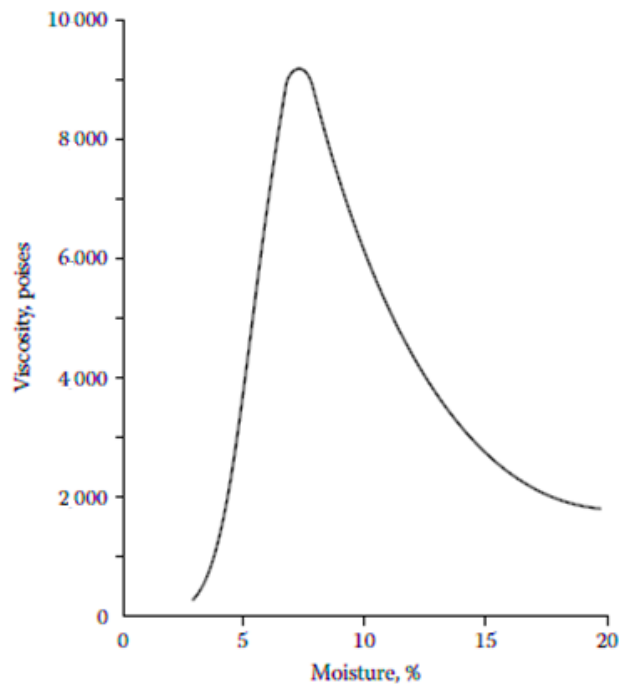


Figura 5 - Variação da viscosidade aparente das lecitinas em função do teor de humidade (70°C). (Gunstone et al., 2007)

O comportamento da viscosidade das lecitinas à medida que o teor de humidade diminui é explicado pelo facto de estas passarem de um fluido de *Bingham* (em que a água é a fase contínua) para um fluido do tipo pseudoplástico (em que a fase contínua é o óleo). (Lambourne et al., 1999)

Devido à sensibilidade deste produto, principalmente quando sujeito a elevadas temperaturas, a sua secagem deve ser feita a temperatura e pressão controladas para que não ocorra decomposição e diminuição da qualidade das lecitinas.

Das tecnologias de secagem, por evaporação de água, destacam-se as seguintes:

- Evaporador por lote (*Batch evaporator*)
- Evaporador tubular de circulação natural (*Natural-circulation tubular evaporator*)
 - Evaporador de tubo horizontal (*Horizontal tube evaporator*)
 - Evaporador de tubo vertical curto (*Short-tube vertical evaporator*)
 - Evaporador de filme ascendente ou de tubo vertical longo (*Rising-film evaporator*)
- Evaporador tubular de circulação forçada (*Forced-circulation tubular evaporator*)
- Evaporador de filme descendente (*Falling-film evaporator*)
- Evaporador de filme agitado horizontal ou vertical (*Agitated thin film evaporator*)

Evaporador por lote (*Batch Evaporator*) (Glover, 2004; SPX Corporation, 2008)

O *design* mais simples e um dos mais antigos, é o evaporador *batch* (**Figura 6**). Este tipo de evaporador consiste num recipiente (semelhante a um tanque) encamisado que é aquecido com

vapor ou outro fluido de aquecimento. O produto é alimentado ao evaporador até um dado nível através de uma boca de alimentação e é aplicado calor para aquecer o lote até ao ponto de ebulição; os vapores são removidos até se atingir a concentração desejada. O calor é posteriormente removido e o produto concentrado é drenado ou bombeado para fora do evaporador através de uma boca de saída.

Este tipo de evaporador pode também operar sob vácuo de modo a baixar o ponto de ebulição, mas é pouco adaptável a produtos sensíveis à temperatura. O seu tempo de residência é elevado (3 a 4 horas) e o movimento do produto realiza-se apenas por circulação natural, levando à formação de incrustações na superfície de aquecimento principalmente quando se manuseiam produtos sensíveis à temperatura, viscosos e/ou que contêm sólidos. Além disso, o fluxo de calor é baixo assim como a área de transferência de calor relativamente ao volume ocupado pelo evaporador.(Glover, 2004)

Os coeficientes de transferência de calor podem ser aumentados e o *fouling* reduzido colocando um agitador no evaporador (*stirred batch*). Ainda assim, este tipo de evaporador é pouco flexível e eficiente.

A secagem por lote além de oferecer menos flexibilidade por processar menores capacidades, requer também uma maior supervisão do operador.

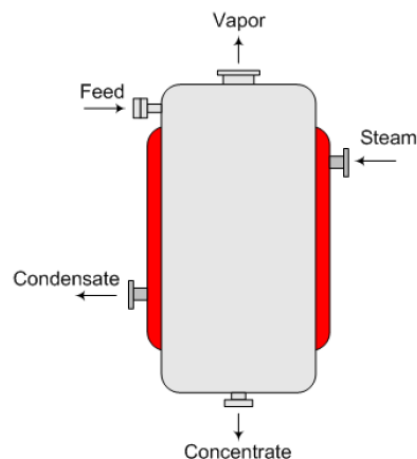


Figura 6 - Desenho esquemático de um evaporador *batch*. (Lopez-Toledo, 2006)

Evaporador tubular de circulação natural (*Natural-circulation tubular evaporator*)

Os evaporadores tubulares de circulação natural são usados para aplicações simples, em que o produto é limpo e pouco sensível à temperatura. Os evaporadores deste tipo mais comuns são o de tubo horizontal, tubo vertical curto e tubo vertical longo.

- Evaporador de tubo horizontal (*Horizontal tube evaporator*) (Glover, 2004; SPX Corporation, 2008)

O evaporador de tubo horizontal (**Figura 7**) é o único em que o fluido de aquecimento circula nos tubos.

A principal vantagem destes evaporadores é a pequena altura que é necessária ter disponível no local de instalação do equipamento. No entanto, este evaporador é pouco indicado para fluidos com tendência a formar incrustações.

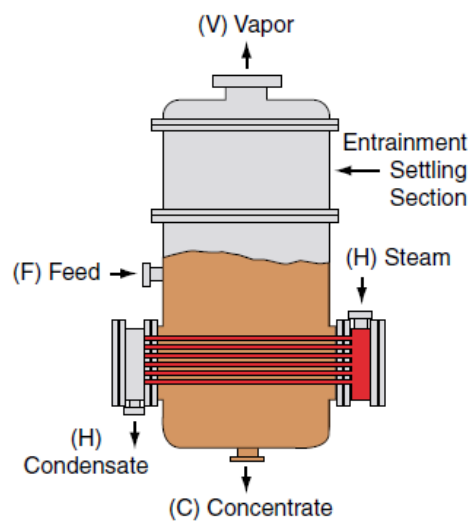


Figura 7 - Desenho esquemático de um evaporador de tubo horizontal. (Glover, 2004)

- Evaporador de tubo vertical curto (*Short-tube vertical evaporator*) (Glover, 2004; Lopez-Toledo, 2006)

O evaporador de tubo vertical curto (também conhecido como *calandria*) é um dos evaporadores mais antigos que ainda é bastante utilizado.

Este evaporador é constituído por dois conjuntos de tubos e por uma calha central. O líquido de alimentação circula nos tubos e o fluido de aquecimento circula fora dos tubos. À medida que o líquido entra em ebulição, sobe pelos tubos e retorna ao fundo do evaporador através da parte central.

O condensado é removido na zona inferior dos tubos e os gases não condensados são ventilados próximo da zona superior dos tubos. As posições da entrada de alimentação e da saída de descarga são variáveis, sendo as apresentadas na **Figura 8** as mais usuais.

O nível de líquido afeta a circulação e a transferência de calor neste tipo de evaporador. Normalmente, o nível operacional de líquido é próximo do topo da parte superior dos tubos. No entanto, os maiores coeficientes de transferência de calor verificam-se quando o nível de líquido está apenas a meio caminho nos tubos. A redução do nível de líquido abaixo do nível ótimo resulta num humedecimento deficiente da parede dos tubos, com o conseqüente aumento da formação de incrustações. Quando o evaporador processa um produto com tendência à formação de incrustações, é habitual operar com um nível de líquido maior que o ideal (ou seja, ligeiramente acima da zona superior dos tubos).

As principais vantagens associadas a este equipamento são, a pequena altura disponível que é necessária na zona de instalação, a capacidade de processar líquidos com uma tendência moderada para formar incrustações uma vez que o produto circula nos tubos (acessíveis para

limpeza), o fabrico relativamente barato e os coeficientes de transferência de calor bastante elevados que podem ser obtidos com líquidos pouco viscosos (5 a 10 cP).

Por outro lado, a transferência de calor neste tipo de evaporador depende muito da viscosidade e da temperatura, não sendo adequado para materiais sensíveis a esta última.

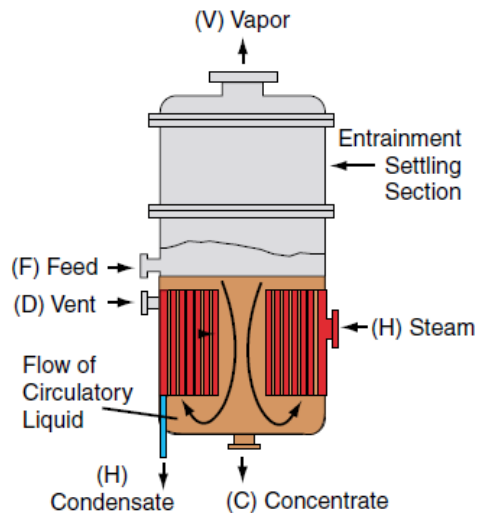


Figura 8 - Desenho esquemático de um evaporador de tubo vertical curto. (Glover, 2004)

- Evaporador de filme ascendente ou de tubo vertical longo (*Rising-film evaporator*) (Glover, 2004; Lopez-Toledo, 2006; SPX Corporation, 2008)

O evaporador de filme ascendente (**Figura 9**) é um dos evaporadores tubulares mais utilizados e foi desenvolvido no início do século XX. Consiste, basicamente, num permutador de calor de caixa e tubos montado num separador líquido/vapor. Requer pouco espaço no solo, mas é necessária uma elevada altura disponível na zona de instalação do equipamento.

O fluido de alimentação entra nos tubos na base do evaporador sendo aquecido até à ebulição enquanto que o fluido de aquecimento circula do lado da caixa. O vapor gerado pela ebulição empurra o fluido através dos tubos e à medida que se dá a ascensão do fluido, mais vapor é formado, que por sua vez leva à formação de um filme fino de líquido junto à parede do tubo. Isto proporciona elevados coeficientes de transferência de calor e menores tempos de residência.

Perto do topo dos tubos, as bolhas de gás aumentam rapidamente e nesta zona, tanto a mistura gás-líquido como as bolhas sobem rapidamente através dos tubos e são descarregadas a alta velocidade a partir do topo e impelidas para o separador líquido/vapor.

Este tipo de evaporador tem a capacidade de lidar com produtos que tendem a formar espumas e é uma boa solução para líquidos que são moderadamente sensíveis ao calor. (Technoforce, 2018)

As principais vantagens associadas a este equipamento consistem no reduzido espaço necessário para a sua instalação e nos coeficientes de transferência de calor relativamente altos. No entanto, apresenta uma elevada perda de pressão ao longo dos tubos e a carga hidrostática na parte inferior dos tubos pode aumentar a temperatura do produto e causar problemas na sua qualidade.

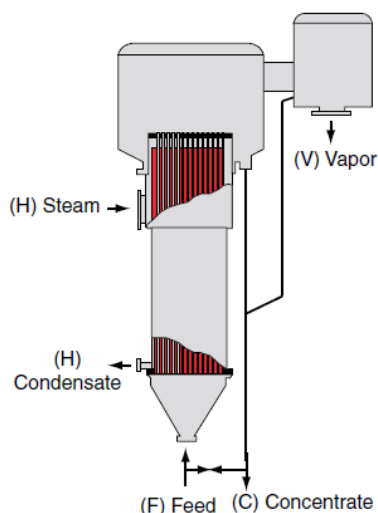


Figura 9 - Evaporador de filme ascendente ou de tubo vertical longo. (Glover, 2004)

Evaporador tubular de circulação forçada (*Forced-circulation tubular evaporator*)

(Glover, 2004; Lopez-Toledo, 2006; SPX Corporation, 2008)

Este tipo de evaporador (**Figura 10**) é adequado para uma grande variedade de aplicações e é geralmente um dos mais caros. Foi desenvolvido para processar soluções suscetíveis de formar incrustações ou cristalizar.

Este equipamento consiste num permutador de calor de caixa e tubos, um separador líquido/vapor e uma bomba de recirculação do líquido.

Ao projetar um evaporador tubular, deve avaliar-se o custo associado à recirculação. À primeira vista, a adição de uma bomba e controlos adicionais aumenta os custos de instalação, operação e manutenção. No entanto, a recirculação parcial do concentrado à corrente de alimentação aumenta a transferência de calor significativamente e o tamanho do evaporador pode ser reduzido consideravelmente, resultando em custos totais menores.

A bomba centrífuga força o líquido de alimentação a percorrer os tubos a alta velocidade, o qual vai aquecendo devido à transferência de calor do vapor que circula do lado da caixa. A ebulição não ocorre nos tubos, pois estes estão sob uma carga hidrostática suficiente para elevar o ponto de ebulição. (ChemDist Process Solutions, 2018) A alta velocidade a que o líquido circula nos tubos reduz a probabilidade de ocorrerem incrustações, reduzindo tempos de inatividade da unidade.

A mistura líquido/vapor que se forma, passa pelo separador onde os vapores são removidos no topo e o líquido retorna à bomba centrífuga. Parte do líquido que sai do separador é retirada como líquido concentrado e a outra volta a entrar no evaporador como alimentação.

Uma das desvantagens associadas a este evaporador, além do seu elevado custo e do alto consumo energético da bomba de circulação, prende-se com o elevado tempo de retenção do produto na zona de aquecimento o que, em certos casos, leva à sua degradação e deterioração.

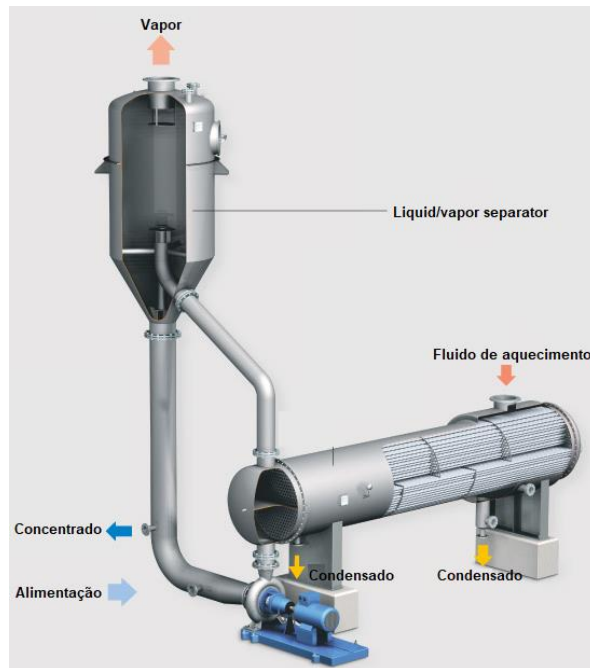


Figura 10 - Desenho esquemático de um evaporador tubular de circulação forçada. («Forced Circulation Evaporator», 2018)

Evaporador de filme descendente (*Falling-film evaporator*) (ChemDist Process Solutions, 2018; Glover, 2004; Lopez-Toledo, 2006; SPX Corporation, 2008)

Os evaporadores de filme descendente (**Figura 11**) são uma variante do evaporador de filme ascendente, encontrando-se o permutador de calor na parte superior e o separador líquido/vapor na base. A alimentação entra no topo do evaporador e é distribuída uniformemente por cada um dos tubos.

O principal problema deste evaporador ao longo do seu processo de aperfeiçoamento, era como projetar um sistema adequado para a distribuição uniforme do líquido de alimentação em cada um dos tubos. A técnica mais utilizada pela maioria dos fabricantes baseia-se na utilização de uma placa perfurada posicionada na zona superior dos tubos.

O evaporador de filme descendente tem a vantagem de o fluido circular por gravidade, o que resulta num filme mais fino e que flui mais rapidamente. Deste modo, o tempo de contacto do produto com a superfície de aquecimento é mais curto e o coeficiente de transferência de calor aumenta. (SPX Corporation, 2008) Quando são necessárias altas taxas de evaporação, parte do líquido concentrado é reciclado à entrada do evaporador.

O uso de múltiplos efeitos garante alta eficiência energética e é ideal para concentrar produtos sensíveis ao calor e com baixa tendência para formar incrustações.

As principais vantagens associadas a este tipo de evaporador são, custo relativamente baixo, grande superfície de transferência de calor, pequeno espaço necessário para a sua instalação, altos coeficientes de transferência de calor, curtos tempos de residência, baixas perdas de carga e adequação a operar sob vácuo. No entanto, é necessária bastante altura disponível no local de

implantação do evaporador. Geralmente não é adequado para materiais com tendência a formar incrustações, sendo a recirculação muitas vezes necessária.

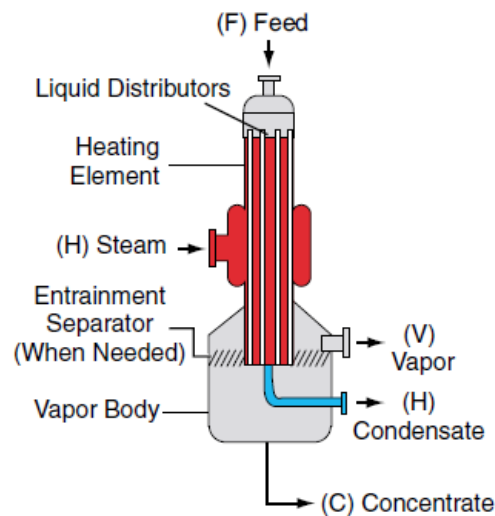


Figura 11 - Desenho esquemático de um evaporador de filme descendente. (Glover, 2004)

Evaporador de filme fino agitado horizontal ou vertical (*Agitated Thin Film Evaporator*)

(Glover, 2004)

A secagem contínua pode ser efetuada também em evaporadores de filme agitado (**Figura 12**), que podem operar na horizontal ou na vertical e são constituídos por dois conjuntos principais, um corpo aquecido e um rotor.

Este tipo de evaporador é caracterizado por lidar facilmente com produtos difíceis de manusear, separar rapidamente os componentes voláteis dos menos voláteis através da transferência de calor indireta e possuir agitação mecânica do filme de produto sob condições controladas. Esta separação é efetuada sob vácuo para maximizar a diferença de temperatura entre os fluidos enquanto mantém a temperatura moderada do produto, assim como para maximizar a remoção e recuperação de voláteis.

Devido ao seu curto tempo de residência (1 a 2 minutos), elevada turbulência e renovação rápida do filme de produto junto à sua superfície interna, o evaporador de filme consegue manusear materiais sensíveis ao calor e de elevada viscosidade (como é o caso das lecitinas).

Este tipo de evaporador envolve poucos custos e trabalhos de manutenção devido ao seu *design* robusto e à lavagem contínua da superfície de troca de calor pelas lâminas do rotor, o que minimiza a formação de incrustações.

O evaporador de filme possui também uma extensa flexibilidade de processamento, principalmente quando opera na horizontal. Quando opera verticalmente é menos flexível e mais sensível, porque o filme de lecitina pode quebrar mais facilmente dentro do aparelho, diminuindo a eficiência de secagem. (Waszczyński, 2018)

O evaporador horizontal tem a grande vantagem de se poder adaptar o seu tempo de residência através da utilização de vários tipos de rotor. Nos evaporadores verticais o tempo de residência apenas depende da gravidade, o que pode prejudicar a qualidade do produto final.

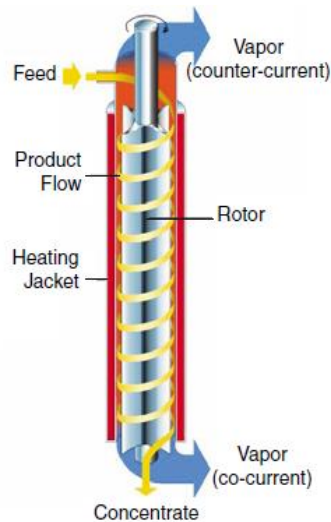


Figura 12 - Desenho esquemático de um evaporador de filme fino vertical. (Glover, 2004)

1.6. Sistemas de vácuo

Tal como referido no capítulo anteriormente, a secagem das lecitinas deve ser efetuada sob vácuo para que não ocorra a decomposição e alteração das duas características e qualidade. Desta forma, procedeu-se a um estudo mais detalhado de sistemas de geração de vácuo, incidindo em ejetores de vapor e bombas de vácuo de anel líquido, potenciais hipóteses para o sistema de vácuo a utilizar na secagem das lecitinas.

É bastante frequente ser necessário e/ou vantajoso operar a pressão reduzida (< 1 atm) em equipamentos integrados em processos químicos, como é o caso de evaporadores, reatores, filtros, secadores e colunas de destilação. O vácuo pode ser definido da seguinte forma: $P_{v\u00e1cuo} = P_{atm} - P$, ou seja, a diferença de pressão entre o sistema a ser evacuado e a atmosfera. (Engineers, 2012)

As pressões de vácuo enquadram-se em quatro categorias: (Festo, 2012; Ludwig, 1999)

- V\u00e1cuo baixo: 760 a 1 mm Hg;
- V\u00e1cuo m\u00e9dio: 1 a 0,001 mm Hg;
- V\u00e1cuo alto: 0,001 a 10^{-7} mm Hg;
- V\u00e1cuo ultra alto: abaixo de 10^{-7} mm Hg.

Existem dois tipos de sistemas de vácuo, os que s\u00f3 envolvem gases n\u00e3o condens\u00e1veis e os que envolvem misturas de vapores com gases n\u00e3o condens\u00e1veis, sendo estes \u00faltimos os mais comuns na ind\u00fastria qu\u00edmica. A gera\u00e7\u00e3o de vácuo \u00e9, basicamente, a remo\u00e7\u00e3o de gases ou vapores. A remo\u00e7\u00e3o de gases n\u00e3o condens\u00e1veis \u00e9 levada a cabo por compress\u00e3o, usando bombas de vácuo ou ejetores. A lista de equipamentos usados para criar vácuo \u00e9 extensa, mas na ind\u00fastria qu\u00edmica os mais usados s\u00e3o os ejetores de vapor e as bombas de vácuo de anel l\u00edquido. (Elsevier, 1999)

Uma bomba de vácuo é um compressor com algumas especificidades: a pressão à entrada da bomba é muito baixa, a pressão à saída é normalmente a pressão atmosférica e os caudais mássicos são normalmente pequenos.

Uma bomba de vácuo de anel líquido (**Figura 13**) é constituída apenas por uma parte móvel, ou seja, um rotor com inúmeras pás que está montado num eixo no interior de um corpo cilíndrico oco fechado lateralmente por duas placas, colocadas uma de cada lado do rotor. Como o eixo é montado excentricamente em relação à câmara de bombeamento, as pás do rotor ficam próximas do topo da bomba e também das placas laterais que fecham o corpo de ambos os lados e, que são providas de aberturas chamadas “janelas” destinadas a permitir a entrada e a saída do ar bombeado, formando uma câmara de bombeamento. Uma das janelas fica ligada à aspiração da bomba, enquanto a outra, colocada do outro lado do rotor, está ligada à descarga da mesma, com o rotor girando entre elas. (Elsevier, 1999; Filho & Leitis, 2013; Vallo, 2018)

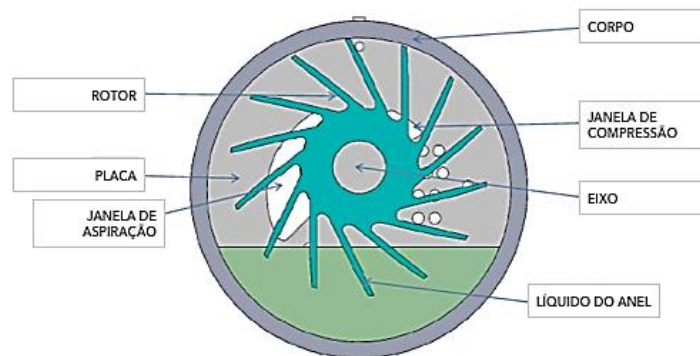


Figura 13 - Bomba de vácuo de anel líquido parada. (Vallo, 2018)

Para o funcionamento da bomba é necessária a presença de um líquido, designado líquido de selagem, que é normalmente água. A bomba inicia a sua operação com o líquido pela metade e a força centrífuga gerada pela rotação do rotor força o líquido a girar contra o corpo da bomba, criando assim um “anel líquido”, que gira concentricamente em relação ao corpo da bomba (**Figura 14**). (Elsevier, 1999; Filho & Leitis, 2013; Vallo, 2018)

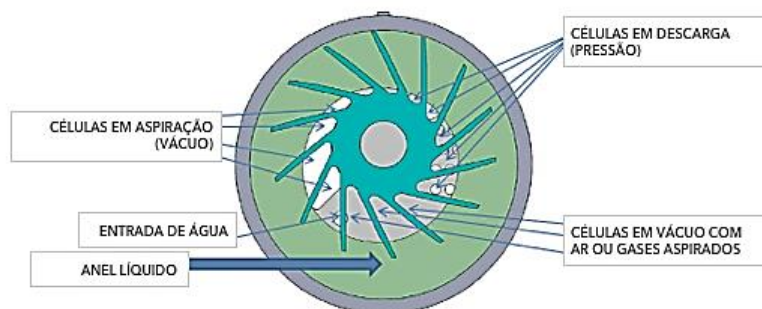


Figura 14 - Bomba de vácuo de anel líquido em funcionamento. (Vallo, 2018)

Dado que o rotor está montado excentricamente em relação ao corpo da bomba, ao girar no sentido anti-horário, algumas pás ficam totalmente imersas no líquido, enquanto que as que estão do lado oposto ficam quase totalmente fora do mesmo. (Vallo, 2018)

O espaço formado entre duas pás e o corpo da bomba, conhecido como “célula”, contrai-se ou expande-se e, dependendo da sua posição em relação às placas, aspira ou expelle o ar/gás, pois na expansão do volume da célula há uma redução de pressão, isto é, formação de vácuo e, na sua contração há um aumento de pressão (compressão). Desta forma, os gases são expelidos arrastando um pouco de líquido, de forma turbulenta na saída da bomba. (Vallo, 2018)

Durante o ciclo de compressão é transmitido calor ao líquido e, para manter a temperatura abaixo do ponto de ebulição deste, deve ser efetuado um arrefecimento adicionando líquido frio ao anel e utilizando um permutador de placas. A quantidade de líquido adicionada é igual à que é descarregada juntamente com o gás comprimido. (Vallo, 2018)

O ciclo acima descrito ocorre numa rotação da bomba, concluindo-se que numa só rotação ocorrem duas fases, a de sucção (vácuo) e a de compressão.

A bomba de vácuo de anel líquido tem uma estrutura simples, mas altamente confiável e funcional. A sua manutenção é simples, apresenta pouco ruído e vibrações durante a operação e tem uma longa vida útil. («Advantages of Liquid Ring Vacuum Pumps for Industrial Users», 2017; Moerman & Desanghere, 2011)

A boa qualidade da água (líquido de selagem) é fundamental para evitar falhas devido à acumulação de incrustações. Variações na temperatura do líquido de selagem tornam o sistema de vácuo instável. Ocorre uma mistura inevitável do gás evacuado com a água. (Moerman & Desanghere, 2011)

Este tipo de sistema de vácuo é mais dispendioso a nível energético (principalmente eletricidade) quando comparado com ejetores de vapor e apresenta risco de cavitação. (Moerman & Desanghere, 2011)

Os ejetores de vapor são os mais comuns na indústria química. Usam vapor a alta pressão para comprimir vapor ou outro gás. Num ejetor, a pressão estática de um fluido motor (fluido primário) é convertida em energia cinética que é usada para arrastar e comprimir um segundo fluido (fluido secundário). (Aliasso, 1999; Ludwig, 1999)

Um ejetor é constituído essencialmente por quatro elementos (**Figura 15**): (Ludwig, 1999)

- Um bocal (*nozzle*) de alta pressão que serve para acelerar o vapor primário (ou vapor motor) a altas velocidades;
- Uma entrada de gás secundário, que é também acelerado, antes do arrastamento pelo vapor primário;
- Uma zona de mistura das correntes de vapor primário e gás secundário, com aceleração do segundo e desaceleração do primeiro;
- A zona de difusão, onde a mistura é desacelerada com aumento de pressão.

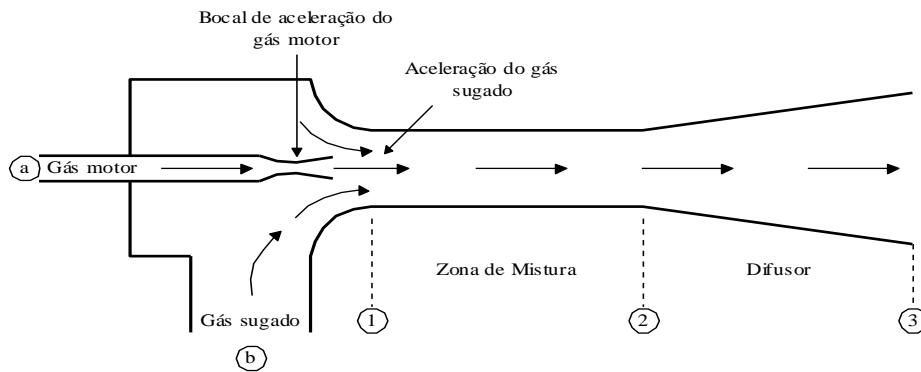


Figura 15 - Desenho esquemático da constituição de um ejetor de vapor. (Alves & Alves, 2014-2015)

Assim, o vapor é alimentado ao ejetor com uma elevada pressão que, ao alcançar o *nozzle*, com a constrição da secção transversal atinge uma velocidade muito elevada e expande, criando vácuo e sugando os gases não condensáveis do equipamento a que está ligado. O gás sugado é arrastado com o vapor e conduzido a um difusor que diminui a velocidade desta mistura, convertendo-a em pressão estática. (Birgenheler et al., 1993; Ludwig, 1999)

Um sistema de vapor com ejetores de vapor pode ser de estágio simples ou multi-estágio. Os de estágio simples geram vácuo até 3 mm Hg, enquanto os de multi-estágio geram vácuo até 3 μ m Hg. (Reynolds, 2014)

O comportamento do ejetor de vapor depende sobretudo:

- da razão entre a área da garganta da zona de mistura, A_2 , e do bocal (*nozzle*), A_t ;
- da razão entre a área final do difusor, A_3 , e a área da garganta da zona de mistura, A_2 ;
- da razão entre os caudais primário e secundário;
- da razão entre as pressões de entrada e saída do gás secundário (aquele que é comprimido);
- da pressão disponível do vapor primário.

Tipicamente, num projeto, sabem-se inicialmente, a pressão de entrada do gás secundário que corresponde ao vácuo desejado; a pressão de descarga da mistura, que é normalmente a pressão atmosférica; a pressão do vapor primário (motor), que é a pressão garantida pela rede de vapor da fábrica; e o caudal de gás secundário a remover. Numa primeira fase do projeto, pretende-se estimar o consumo de vapor primário.

Os ejetores são equipamentos de construção, instalação e manutenção simples. Os custos de instalação são relativamente baixos quando comparados com as bombas de vácuo e requerem pouco espaço, exigem pouca manutenção, têm baixo custo por não terem partes móveis e apresentam uma longa vida útil. Têm a capacidade de manusear misturas de vapor húmido, seco ou corrosivo, são eficientes e de operação relativamente simples. (Ludwig, 1999) No entanto, requerem um fluido motriz pressurizado (vapor saturado, uma utilidade de elevado custo), são mais ruidosos

que as bombas de vácuo de anel líquido, podendo ser necessários silenciadores. A contaminação do fluido motriz pelo gás de processo e vice-versa é inevitável. (Aliasso, 1999)

Alternativamente aos sistemas de vácuo só com ejetores de vapor ou só com uma bomba de anel líquido, pode utilizar-se um sistema de vácuo híbrido, constituído por um ejetor de vapor e uma bomba de vácuo de anel líquido (inclui também um condensador entre ambos e uma fossa barométrica). Este tipo de sistema de vácuo reduz o consumo de utilidades, tanto de vapor como de água de refrigeração, e reduz o consumo de eletricidade, pois a bomba terá uma potência bastante menor comparativamente ao uso de uma só bomba para a geração do mesmo vácuo. Além disso é mais eficiente na geração de vácuo e pode instalar-se ao nível do solo, sem risco de ocorrer cavitação. (Jet-vac technologies, 2018)

1.7. Filtração

Tal como será explicado em **3.2. Filtração/clarificação da miscela e/ou do óleo**, para se obter uma lecitina de qualidade com as especificações exigidas pelos clientes, é necessário remover a maioria das impurezas sólidas a montante da desgomagem.

No seguimento da análise das várias hipóteses para a remoção das impurezas sólidas, procedeu-se a um estudo mais detalhado da filtração e dos principais filtros existentes.

Filtração é o termo usado para a operação unitária. Um filtro é um equipamento através do qual é realizada a filtração. O meio filtrante ou septo é a barreira que permeia o líquido enquanto retém a maioria dos sólidos e pode ser uma tela, um tecido, um papel ou uma camada de sólidos (auxiliar de filtração). O líquido que permeia através do meio filtrante designa-se por filtrado. (Coulson & Richardson, 2002)

Em geral, os poros do meio filtrante são maiores do que as partículas a serem removidas e o filtro só funciona eficientemente após um depósito inicial ter sido retido no meio filtrante. (Coulson & Richardson, 2002)

Na maioria das aplicações industriais, os principais fatores a serem considerados na seleção do equipamento e condições de operação são: (Coulson et al., 2005)

- as propriedades do fluido, particularmente a sua viscosidade, densidade, inflamabilidade, toxicidade e propriedades corrosivas;
- a natureza dos sólidos (bolo de filtração): tamanho, forma e distribuição de tamanhos das partículas;
- a concentração de sólidos na suspensão de alimentação;
- a quantidade de matéria a ser manuseada e o seu valor de mercado;
- se o produto valioso é o sólido, o fluido ou ambos;
- se é necessário lavar os sólidos filtrados;
- se é necessário secar os sólidos filtrados;

- se uma ligeira contaminação causada pelo contacto da suspensão ou filtrado com os vários componentes do equipamento é prejudicial ao produto;
- se o líquido de alimentação pode ser aquecido;
- se algum pré-tratamento pode ser útil.

A filtração é essencialmente uma operação mecânica e é pouco exigente energeticamente, em relação a outras operações unitárias, como a secagem ou a evaporação. (Coulson & Richardson, 2002)

Na operação típica de uma filtração, o bolo acumula-se gradualmente no meio filtrante e a resistência à permeação do líquido aumenta progressivamente. Durante o período inicial da filtração, as partículas são depositadas na superfície do tecido ou tela para formar o verdadeiro meio filtrante. Este depósito inicial pode ser formado a partir de um material de pré-cobertura. Para aumentar a taxa de filtração, a alimentação é frequentemente pré-tratada por aquecimento, recristalização ou adição de um auxiliar de filtração como a celulose ou terra de diatomáceas. (Coulson & Richardson, 2002)

Os fatores que mais influenciam a taxa de filtração são: (Coulson & Richardson, 2002)

- a perda de pressão da alimentação;
- a área de superfície de filtração;
- a viscosidade do filtrado;
- a resistência do bolo filtrante;
- a resistência do meio filtrante e das camadas iniciais do bolo.

Devido à enorme variedade de materiais a serem filtrados e das condições de processo, imensos tipos de filtros foram desenvolvidos.

A filtração e os filtros podem ser classificados de várias formas:

1. Por força motriz (Maloney, 2008; McCabe et al., 1993)

O filtrado é induzido a permear através do meio filtrante por gravidade, pressão aplicada a montante do meio filtrante, vácuo ou pressão reduzida aplicada a jusante do meio filtrante, ou força centrífuga.

Pressões acima da pressão atmosférica podem ser desenvolvidas pela força da gravidade atuando sobre uma coluna de líquido, por uma bomba ou ventilador, ou por força centrífuga. Os filtros de gravidade restringem-se nas suas aplicações industriais à drenagem de líquidos com cristais muito grosseiros, à clarificação de água potável e ao tratamento de águas residuais.

A maioria dos filtros industriais são filtros de pressão, filtros a vácuo ou separadores centrífugos. Podem operar continuamente ou descontinuamente, dependendo se a descarga de sólidos filtrados é constante ou intermitente, respetivamente. Durante grande parte do ciclo de operação de um filtro descontínuo, a circulação do fluido através do equipamento é contínua, mas

tem de ser interrompida para a descarga dos sólidos acumulados. Num filtro contínuo, a descarga de sólidos e fluidos é ininterrupta.

2. Pelo mecanismo de filtração (Maloney, 2008; McCabe et al., 1993)

Quando os sólidos se acumulam na superfície de um meio filtrante e se empilham uns sobre os outros para formar um bolo de espessura crescente, a separação é denominada filtração de bolo. Se os sólidos são retidos dentro dos poros ou no seio do meio filtrante, é denominada filtração em profundidade, meio filtrante, leito profundo ou de clarificação. Existe ainda a filtração de fluxo cruzado.

Os filtros de bolo (**Figura 16**) separam quantidades relativamente grandes de sólidos como um bolo de cristais ou lama. Muitas vezes ocorrem a lavagem do bolo e a remoção de parte do líquido dos sólidos antes da descarga. As partículas da suspensão são depositadas na superfície de um septo poroso que idealmente deve oferecer uma pequena resistência à permeação. À medida que os sólidos se acumulam no septo, as camadas iniciais formam o meio filtrante eficaz, evitando que as partículas se encaixem no tecido do filtro e assegurando que se obtém um filtrado livre de partículas.

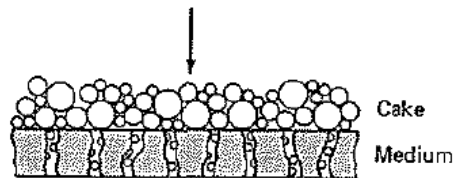


Figura 16 - Filtração de bolo. (McCabe et al., 1993)

Os filtros de clarificação (**Figura 17**) removem pequenas quantidades de sólidos para produzir um gás ou líquido limpos. As partículas sólidas penetram nos poros do meio filtrante e as interações entre as partículas e a superfície do meio são em grande parte responsáveis pela sua retenção. Esta configuração é, normalmente, usada para a remoção de partículas finas de suspensões muito diluídas, em que a recuperação das partículas não é a prioridade.

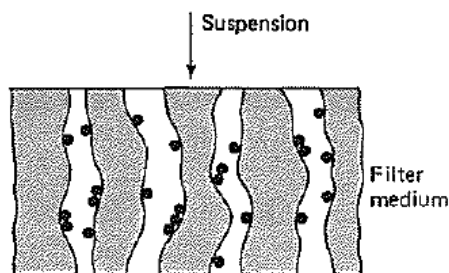


Figura 17 - Filtração em profundidade ou de clarificação. (McCabe et al., 1993)

Num filtro de fluxo cruzado (**Figura 18**), a suspensão de alimentação circula sob pressão, a uma velocidade razoavelmente elevada através do meio filtrante. Uma fina camada de sólidos forma-se na superfície do meio, mas a alta velocidade da alimentação evita que a camada se acumule. Este tipo de filtração é usado particularmente para suspensões muito diluídas que são continuamente recirculadas.

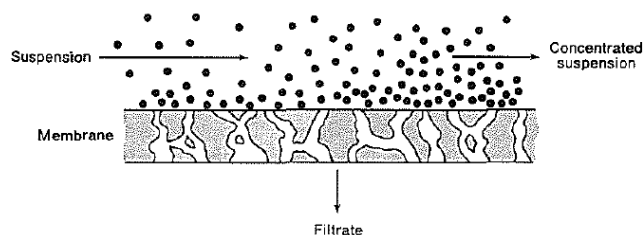


Figura 18 - Filtração de fluxo cruzado. (McCabe et al., 1993)

3. Por objetivo (Maloney, 2008)

O objetivo do processo de filtração pode ser obter sólidos secos (o bolo é o produto de valor), líquido clarificado (o filtrado é o produto de valor), ou ambos. Uma recuperação de sólidos é mais facilmente obtida por filtração de bolo, enquanto a clarificação do líquido é realizada por filtração em profundidade ou de bolo.

4. Por ciclo operacional (Maloney, 2008)

A filtração pode ser intermitente (*batch*) ou contínua. Os filtros descontínuos operam a pressão contante, a fluxo constante ou em ciclos variáveis em relação à pressão e ao fluxo. O ciclo *batch* varia muito dependendo da área do filtro e dos sólidos.

5. Pela natureza dos sólidos (Maloney, 2008; McCabe et al., 1993)

A filtração de bolo envolve uma acumulação de sólidos compressíveis ou substancialmente incompressíveis. O tamanho das partículas ou agregado de partículas pode ser da mesma ordem de grandeza do tamanho mínimo dos poros dos meios filtrantes (1 a 10 μm ou maior), ou pode ser menor (1 μm até à dimensão das bactérias e macromoléculas). A maioria das filtrações envolve sólidos da primeira gama de tamanhos. Os do último intervalo podem ser filtrados apenas por filtração de clarificação ou por ultrafiltração, a menos que sejam convertidos para o primeiro intervalo por agregação antes da filtração.

Os filtros de bolo são usados quase exclusivamente para separações sólido-líquido. Como em outros filtros, eles operam à pressão atmosférica a montante do meio filtrante ou sob vácuo a jusante. Qualquer tipo de filtro pode ser contínuo ou descontínuo, mas devido à dificuldade de descarregar os sólidos a uma pressão superior à atmosférica, a maioria dos filtros de pressão são descontínuos.

Filtros de pressão

Os filtros de pressão aplicam um grande diferencial de pressão ao longo do septo para realizar uma filtração rápida de líquidos viscosos ou sólidos finos. Os tipos mais comuns de filtros de pressão são os filtros de prensa e os filtros de folhas.

- Filtro de prensa (McCabe et al., 1993)

É o filtro *batch* mais antigo e mais usado, sendo capaz de manusear líquidos e bolos viscosos com alta resistência específica. (Coulson et al., 2005)

Um filtro prensa (**Figura 19**) contém um conjunto de placas / pratos projetados para formarem uma série de câmaras ou compartimentos nos quais os sólidos se podem acumular. As placas são cobertas por um meio filtrante como tela ou tecido. A suspensão é admitida a cada compartimento sob pressão, o líquido passa pela tela e sai pelo tubo de descarga, deixando um bolo húmido de sólidos para trás. As placas dos filtros podem ser quadradas ou circulares, verticais ou horizontais e com depressões ou planas.

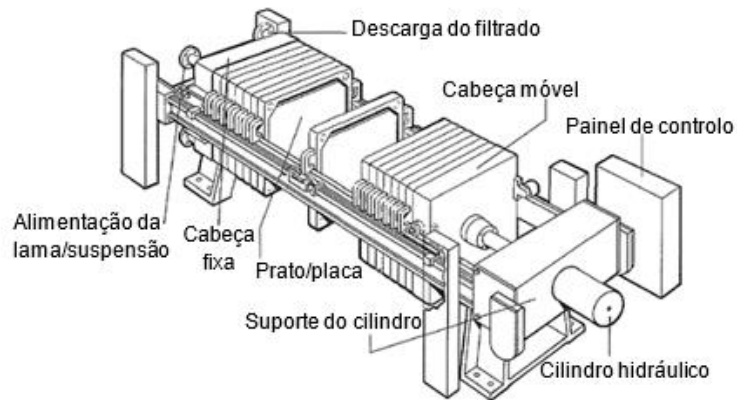


Figura 19 - Filtro de prensa. (McCabe et al., 1993)

As placas com depressões, quando justapostas formam o filtro-prensa de câmaras. Quando as placas são planas os compartimentos de alimentação da suspensão são formados por meio de quadros que separam as diversas placas. Este tipo é chamado filtro prensa de placas e quadros.

O filtro prensa de câmaras possui este nome, devido às depressões que as placas possuem no centro o que faz com que formem câmaras quando justapostas. Cada placa tem um furo central. Quando a prensa está montada, os furos formam um canal através do qual a suspensão é alimentada às diversas câmaras. As placas são revestidas com tecidos que também apresentam furos centrais correspondentes aos furos das placas. Numa das extremidades da prensa há uma cabeça fixa e na outra uma cabeça móvel que serve para prensar o conjunto por meio de um parafuso resistente operado por um volante. Alternativamente, as placas podem ser prensadas por um sistema hidráulico. A sequência de operação é a seguinte: a prensa é montada, alimenta-se a suspensão e prossegue-se até que as câmaras estejam cheias de bolo ou quando a pressão exceder um determinado valor, abre-se a prensa, retira-se o bolo de filtração e monta-se novamente o conjunto.

As principais desvantagens do filtro prensa de câmaras são o custo elevado de operação e o desgaste excessivo do meio filtrante. Além disso, não é possível lavar o bolo de filtração. Por estas razões estes filtros foram sendo substituídos por filtros de placas e os quadros.

O filtro prensa de placas e quadros apresenta placas quadradas e com faces planas. Entre duas placas sucessivas da prensa há um quadro que serve como espaçador das placas. De cada lado de um quadro há um tecido que se encosta à placa correspondente. Assim, as câmaras onde se forma o bolo ficam delimitadas pelos tecidos. A estrutura de suporte do conjunto tem barras laterais que suportam as placas e quadros. O aperto do conjunto é feito por meio de um parafuso ou sistema hidráulico.

O filtrado atravessa os tecidos colocados de cada lado dos quadros e passa para as placas, onde escoam pela superfície até chegar aos furos de saída no canto inferior oposto ao canal de entrada da suspensão nos quadros. Os tecidos têm furos na posição correspondente aos canais. A saída do filtrado pode ser feita através de uma torneira existente em cada placa ou por um canal idêntico ao da alimentação da suspensão formado pela justaposição de furos circulares que comunicam com a saída das placas.

As principais vantagens deste tipo de filtro são: a construção simples, robusta e económica, a grande área de filtração, a flexibilidade pois é possível aumentar ou diminuir o número de elementos para variar a capacidade, trabalham sob pressões até 50 kgf/m² e a manutenção é relativamente simples e económica dado que só é necessário substituir o meio filtrante periodicamente. As desvantagens mais relevantes são: normalmente o filtro opera descontinuamente para remoção do bolo, o elevado custo de mão-de-obra e operação devido à montagem e desmontagem e a lavagem do bolo de filtração ser pouco eficiente e muito demorada.

Para operar de forma contínua, o filtro prensa tem de ser adaptado de modo a fazer a descarga automática do bolo de filtração (“auto-limpante”).

- Filtro de folhas (Coulson et al., 2005; McCabe et al., 1993)

Um filtro de folhas pode ser utilizado para filtrar a pressões mais elevadas do que um filtro de prensa, para poupar em custos de operação e quando é necessária uma lavagem mais eficaz do bolo.

As folhas consistem em placas metálicas dispostas vertical ou horizontalmente. Na **Figura 20**, a unidade horizontal está aberta para descarga, mas durante a operação as folhas estão dentro do tanque fechado. A alimentação entra pelo lado do tanque e o filtrado passa através das folhas para um coletor de descarga. O bolo é removido mecanicamente, por escorrimento com jatos de água ou com vapor, dependendo do tipo de produto.

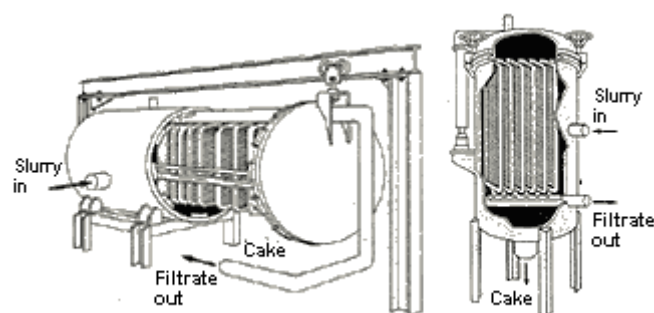


Figura 20 - Filtro de folhas horizontal (esquerda) e vertical (direita). («Vertical Leaf Filter», 2018)

Filtros de vácuo descontínuos (Coulson et al., 2005; McCabe et al., 1993)

Ao contrário dos filtros de pressão, os filtros de vácuo normalmente são contínuos. No entanto, um filtro de vácuo descontínuo, como é o caso do *Nutsche*, pode ser bastante útil.

O filtro de *Nutsche* (**Figura 21**) é uma versão industrial do filtro de *Buchner* laboratorial e é pouco usado em processos industriais devido ao trabalho envolvido na remoção do bolo de filtração. Consiste, basicamente, num tanque com uma base perfurada que suporta o meio filtrante.

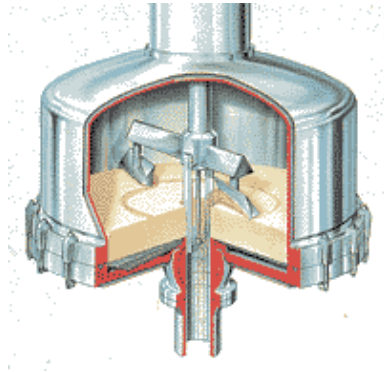


Figura 21 - Filtro de *Nutsche*. («Nutsche Filter», 2018)

Filtros de vácuo contínuos (McCabe et al., 1993)

Nos filtros de vácuo contínuos, a suspensão é sugada através de um septo em movimento onde se deposita um bolo de sólidos. O bolo é movido para fora da zona de filtração, lavado, seco e descarregado do septo, que então reentra na suspensão para captar outra carga de sólidos. Parte do septo está na zona de filtração, parte está na zona de lavagem e a outra parte está a ser aliviada da sua carga de sólidos, de modo que a descarga de sólidos e líquido do filtro seja ininterrupta.

Os vários modelos de filtro diferem no método de admissão da suspensão, na forma da superfície do filtro e na forma como se dá a descarga dos sólidos. A maioria aplica vácuo de uma fonte estacionária para as partes móveis da unidade através de uma válvula rotativa.

- Filtro de tambor rotativo (Coulson et al., 2005; McCabe et al., 1993)

Um filtro de tambor rotativo (**Figura 22**) consiste essencialmente num grande tambor oco cilíndrico em que o meio filtrante é encaixado. O tambor é parcialmente submerso numa tina de suspensão e o filtrado é sugado através do meio filtrante por vácuo dentro do tambor.

Sob a face cilíndrica do tambor principal há um segundo tambor menor com superfície sólida. Entre os dois tambores encontram-se divisórias radiais que dividem o espaço em compartimentos separados, cada um ligado por um tubo interno a um orifício na placa rotativa. O vácuo e o ar são alimentados alternadamente a cada compartimento à medida que o tambor gira.

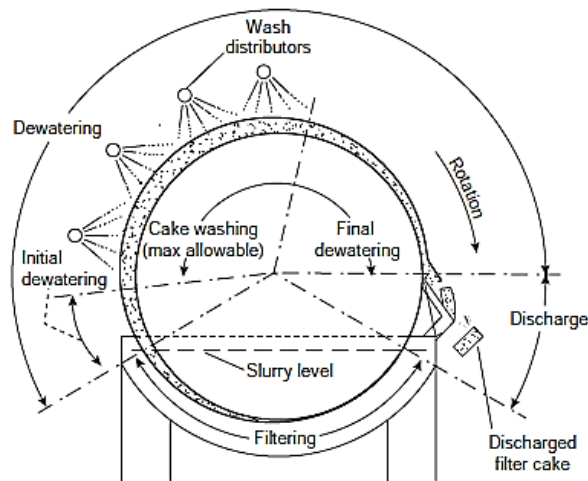


Figura 22 - Desenho esquemático de um filtro de tambor rotativo. (Coulson et al., 2005)

A percentagem de submersão do tambor é variável. A maioria dos filtros de alimentação inferior opera com cerca de 30% da sua área submersa na suspensão. Quando se pretende uma maior capacidade de filtração e sem lavagem do bolo, usa-se um filtro de alta submersão, com 60 a 70% da sua área submersa.

A capacidade de um filtro rotativo depende fortemente das características da pasta/suspensão de alimentação e, particularmente, da espessura do bolo depositado. Os bolos formados em filtros de vácuo rotativos industriais têm espessura de 3 a 40 mm e os tamanhos padrão do tambor variam de 0,3 a 3 metros de diâmetro.

Os filtros de vácuo rotativos podem ser adaptados para operarem a pressões positivas até 15 atm quando a filtração a vácuo não é viável ou económica, por exemplo, se os sólidos são muito finos e filtram muito lentamente, se o líquido tem uma elevada pressão de vapor ou uma viscosidade superior a 1 Poise ou se se trata de uma solução saturada que cristalizará se arrefecida. No entanto, os problemas mecânicos de descarregar os sólidos desses filtros, o seu elevado custo e complexidade e o seu pequeno tamanho limitam a sua gama de aplicações. Assim, quando a filtração a vácuo não pode ser usada, devem ser considerados outros meios de separação, como filtros centrífugos contínuos.

Um filtro de pré-cobertura é um filtro de tambor rotativo modificado para filtrar pequenas quantidades de sólidos finos ou gelatinosos que normalmente aderem aos filtros de tela/tecido. No funcionamento desta máquina, primeiro é depositada no meio filtrante uma camada de auxiliar de filtração porosa, tal como terra de diatomáceas. Um filtro de pré-cobertura também pode operar sob pressão. Neste caso, os sólidos descarregados e o auxiliar de filtração acumulam-se para serem removidos periodicamente à pressão atmosférica enquanto o tambor é coberto pelo auxiliar de filtração.

Os filtros de pré-cobertura só devem ser usados quando os sólidos podem ser descartados ou se a sua mistura com grandes quantidades de auxiliar de filtração não representar um problema.

Os filtros de tambor compartimentados contínuos são, normalmente, usados para materiais relativamente concentrados e fáceis de filtrar.

- Filtro de disco (Coulson et al., 2005)

Os filtros de disco (**Figura 23**) são semelhantes aos filtros rotativos, mas compreendem vários discos finos montados num eixo, em vez de um tambor. Estes filtros possuem uma área efetiva de filtração maior e por isso, se houver pouco espaço disponível para a sua instalação, são preferíveis face aos filtros de tambor rotativos.

Para filtros com áreas superiores a cerca de 25 m², os filtros de disco são mais baratos, mas as suas aplicações são mais limitadas, pois não são adequados para a lavagem do bolo e/ou a utilização de auxiliares de filtração.

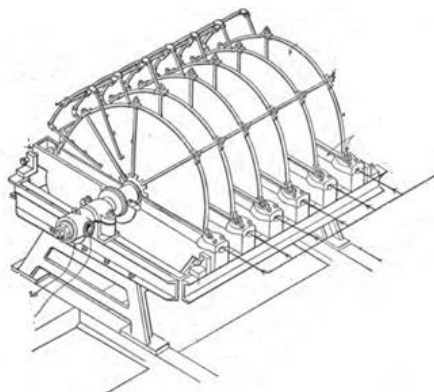


Figura 23 - Filtro de disco. (911 Metallurgist, 2018)

- Filtro de esteira (Coulson et al., 2005; McCabe et al., 1993)

Se a alimentação contiver partículas grosseiras, um filtro de tambor rotativo funciona mal ou não funciona sequer. As partículas grosseiras não ficam bem suspensas na tina de suspensão e o bolo que se forma muitas vezes não adere à superfície do filtro de tambor. Nessa situação, usa-se um filtro horizontal alimentado por cima.

O filtro de esteira móvel (**Figura 24**) é um dos vários tipos de filtro horizontal. Assemelha-se a um transportador de esteira com um suporte transversal ou esteira de drenagem, a qual suporta a tela/tecido do filtro, também na forma de uma esteira sem fim. As aberturas centrais na esteira de drenagem deslizam sobre uma caixa de vácuo longitudinal, na qual o filtrado é retirado. A suspensão de alimentação flui para a esteira, de um distribuidor numa das extremidades da unidade e o bolo filtrado e lavado é descarregado na outra extremidade.

Os filtros de esteira são especialmente úteis no tratamento de resíduos, uma vez que os estes geralmente contêm uma larga distribuição de tamanhos de partículas e encontram-se disponíveis com áreas de filtração até 110 m².

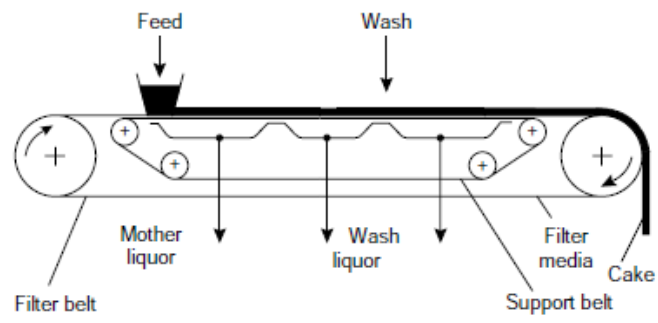


Figura 24 - Desenho esquemático de um filtro de esteira horizontal. (Coulson et al., 2005)

2. Ferramentas de dimensionamento: sistema de vácuo e filtração

2.1. Sistema de vácuo

Para selecionar qual o melhor tipo de sistema de vácuo a usar na secagem das lecitinas, fez-se uma análise comparativa com base nos seguintes critérios:

- Custos de investimento e instalação – quanto mais elevados forem os custos de investimento e instalação, maior será o tempo de retorno do investimento. No entanto, é necessário ter em conta a relação entre o custo e a eficiência do sistema de vácuo.
- Consumo de utilidades (água e vapor) – as principais utilidades consumidas por estes dois tipos de sistemas de vácuo são a água e o vapor, sendo o vapor a utilidade mais cara. Quando usada água de refrigeração, deve ter-se em conta também os custos associados ao funcionamento da torre de refrigeração.
- Consumo de eletricidade – o consumo de eletricidade tal como o consumo de utilidades contribui para os custos de operação.
- Manutenção – equipamentos com manutenção simples e pouco dispendiosa são preferíveis.
- Robustez – quanto mais robusto e resistente for o equipamento, menos manutenção é necessária e conseqüentemente os tempos de paragem serão menores e menos frequentes.
- Eficiência do vácuo – a eficiência do vácuo é o fator mais importante a considerar, dado que afeta fortemente a secagem das lecitinas e a qualidade final do produto.
- Cavitação – a cavitação põe em causa o correto funcionamento do sistema de vácuo, principalmente no caso da bomba de anel líquido, podendo mesmo danificá-la.
- Altura – por vezes o sistema de vácuo tem de ser instalado a uma altura superior ao equipamento que está a evacuar.
- Ruído e vibrações – um equipamento ruidoso é pouco desejado, até em termos de segurança dos operadores. A existência de vibrações implica a construção de muros ou o reforço da estrutura ou terreno onde for instalado o sistema.
- Fossa barométrica – num sistema de vácuo com ejetores, muitas vezes, é necessária uma fossa barométrica que recebe o resíduo. Esta pode provocar maus odores, e dependendo das substâncias presentes, estes podem ser prejudiciais.

Por forma a avaliar e escolher o melhor sistema a implementar na secagem das lecitinas, atribuiu-se um fator de ponderação entre 1 e 10 a cada um dos critérios supracitados, tendo os critérios com um fator de ponderação superior maior peso na hierarquização dos tipos de sistema de vácuo. Os valores atribuídos encontram-se apresentados no diagrama da **Figura 25**.

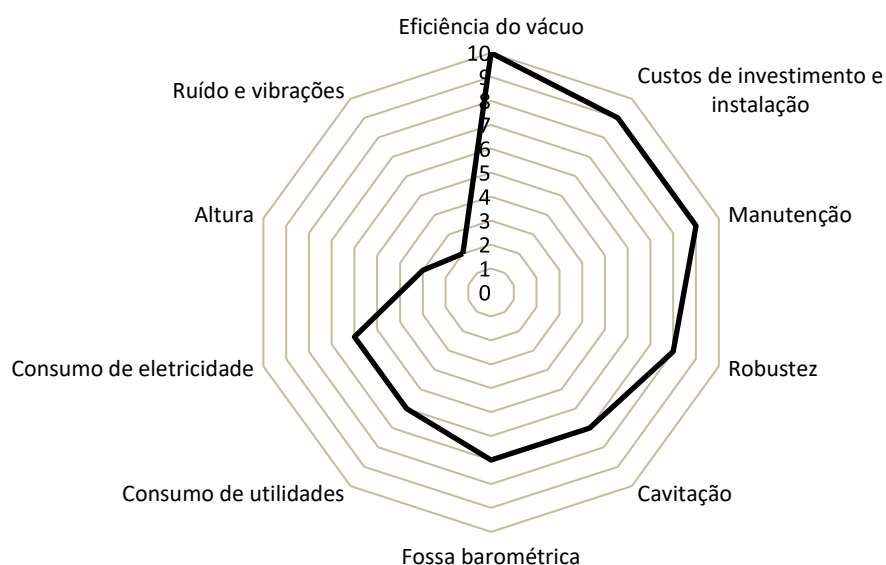


Figura 25 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização dos tipos de sistema de vácuo na operação de secagem das lecitinas.

As três hipóteses foram comparadas entre si e a cada um dos critérios atribuiu-se um valor numa escala de 0 a 10, onde 10 corresponde à melhor classificação e 0 à pior.

Na **Tabela 5** encontram-se os valores atribuídos a cada um dos critérios de cada tipo de sistema de vácuo. A classificação final, corresponde ao somatório dos produtos entre o fator de ponderação e a classificação atribuída em cada critério.

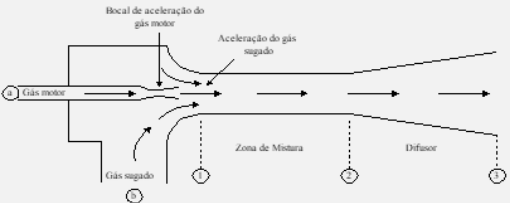
Tabela 5 – Fatores de ponderação e classificação atribuída a cada critério, para cada tipo de sistema de vácuo e respetiva classificação final.

| Critérios | Fator de ponderação | Ejetor de vapor | Bomba de anel líquido | Sistema híbrido |
|--|----------------------------|------------------------|------------------------------|------------------------|
| Custos de investimento e instalação | 9 | 10 | 6 | 0 |
| Consumo de utilidades | 6 | 0 | 8 | 10 |
| Consumo de eletricidade | 6 | 10 | 0 | 6 |
| Manutenção | 9 | 10 | 9 | 8 |
| Robustez | 8 | 9 | 8 | 10 |
| Eficiência do vácuo | 10 | 9 | 8 | 10 |
| Cavitação | 7 | 10 | 8 | 10 |
| Altura | 3 | 7 | 9 | 10 |
| Ruído e vibrações | 2 | 0 | 10 | 5 |
| Fossa barométrica | 7 | 0 | 10 | 0 |
| Classificação final | | 493 | 500 | 458 |

Segundo os resultados da **Tabela 5** concluiu-se que a melhor hipótese para a geração de vácuo é a bomba de vácuo de anel líquido.

Com base no estudo realizado sobre sistemas de vácuo, construiu-se uma ferramenta em Excel (**Figura 26** e **Figura 27**) de auxílio para o dimensionamento de ejetores de vapor e bombas de vácuo de anel líquido. A partir de *inputs* específicos solicitados ao utilizador, a ferramenta fornece dimensões, capacidades e outros dados importantes para a escolha do equipamento e contacto posterior com fornecedores para a aquisição do mesmo.

Dimensionamento preliminar de um Ejetor
 Perry, R.; Green, D. (1997). *Chemical Engineer's Handbook*. McGraw-Hill 6th ed.
 Ludwig, E. (1991) *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants* (Vol. I). Chapter 6: Ejectors and Mechanical Vacuum Systems.
 Alves, S.; Alves, A. Folhas da disciplina de Dimensionamento de Equipamento (2014/15). Secção de Folhas da AEIST



Este procedimento é para dimensionamento preliminar, as especificações finais devem ser determinadas recorrendo a um fabricante especializado.

Caudal de gás a aspirar pelo ejetor

V_{equipamento} (incluindo tubagem) (m³)
 V_{equipamento} (incluindo tubagem) (ft³) → Entre 10 e 10000 ft³

P_{ob} (mmHg) → Vácuo desejado

Caudal máximo de fugas

| | | |
|------|------|--|
| 0,00 | lb/h | → Para P _{ob} < 1 mmHg |
| 0,00 | lb/h | → Para 1 < P _{ob} < 3 mmHg |
| 0,00 | lb/h | → Para 3,1 < P _{ob} < 20 mmHg |
| 0,00 | lb/h | → Para 21 < P _{ob} < 89 mmHg |
| 0,00 | lb/h | → Para 90 < P _{ob} < 760 mmHg |
| 0,00 | lb/h | → Selecionar caudal máximo de fugas de acordo com a gama de pressões |
| 0,00 | kg/h | |

Caudal da corrente a alimentar ao equipamento

Ejetor Bomba de vácuo de anel líquido

Figura 26 - Ferramenta de auxílio no dimensionamento de sistemas de vácuo (ejetor de vapor).

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento preliminar de uma bomba de vácuo de anel líquido
 Backhurst, J.R.; Harker, J. H. *Process Plant Design*. London: Heinemann Education Books, 1973
 Ludwig, E.E. *Applied Process Design for Chemical and Petrochemical Plants* (Vol. 1) Gulf Professional Publishing 3rd ed., 1999

Este procedimento é para dimensionamento preliminar. As especificações finais devem ser determinadas recorrendo a um fabricante especializado.

Capacidade da bomba

V_{equipamento} (incluindo tubagem) (m³)
 V_{equipamento} (incluindo tubagem) (ft³) → Vácuo desejado

P₁ (mm Hg) → Vácuo desejado

Tempo de evacuação (min)

Fator de Bombeamento

| | | |
|------|----------------------------------|---|
| 0,00 | m ³ /m ³ | → Correlação obtida pelo gráfico da figura 1. |
| 0,00 | ft ³ /ft ³ | |

Volume total a ser bombeado/evacuado

| | |
|------|-----------------|
| 0,00 | m ³ |
| 0,00 | ft ³ |

Capacidade da bomba

| | |
|------|----------------------|
| 0,00 | m ³ /min |
| 0,00 | ft ³ /min |

A bomba selecionada deverá ter o tamanho padrão (fornecedores da especialidade) que permita obter a capacidade acima calculada.

Ejetor **Bomba de vácuo de anel líquido**

Figura 27 - Ferramenta de auxílio no dimensionamento de sistemas de vácuo (bomba de vácuo de anel líquido).

Assim, tendo em conta a análise comparativa dos vários tipos de sistema de vácuo, utilizou-se a ferramenta para determinar a capacidade que deveria ter a bomba de vácuo de anel líquido para o caso da secagem de lecitinas na unidade industrial em questão.

Foram introduzidos os valores solicitados nas células de *input*, tendo-se obtido um fator de bombeamento de $2,8 \text{ m}^3/\text{m}^3$ e uma capacidade da bomba de $1,96 \text{ m}^3/\text{min}$.

Os valores de *input* solicitados são o volume de equipamento (incluindo tubagem) que se pretende evacuar, a pressão de vácuo desejada e o tempo de evacuação ou bombeamento. O volume total a ser bombeado é obtido pela multiplicação do volume de equipamento pelo fator de bombeamento. O fator de bombeamento é obtido por uma correlação que depende da pressão de vácuo desejada. Dividindo o volume total a ser bombeado pelo tempo de evacuação obtém-se a capacidade da bomba.

2.2. Filtração

Com base no estudo detalhado dos filtros acima descritos, construiu-se uma ferramenta em *Excel* para o dimensionamento de cada um dos filtros (**Figura 28**, **Figura 29**, **Figura 30**, **Figura 31** e **Figura 32**). A partir de *inputs* específicos solicitados ao utilizador, a ferramenta fornece a área do filtro e outros dados importantes de projeto e operação.

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento de um filtro de disco
 Perry, R.; Green, D. (1997). Chemical Engineer's Handbook. McGraw-Hill 8th ed.

Submersão efetiva máxima, % → Tipicamente 28% para este tipo de filtro
 Porção máxima do ciclo de filtragem disponível para desaguamento, % → Tipicamente 45% para este tipo de filtro

Área do filtro com base em fatores de scale-up

Fatores de scale-up
 Fluxo 0,8
 Área 0,8
 Descarga 0,9
 } Valores retirados da literatura, ajustar se necessário

Caudal de sólido seco pretendido (ton/h)
 Teor de água no bolo (%)
 Espessura do bolo (cm) → Mínimo 1,0 a 1,3 cm, deve utilizar-se um valor superior
 Massa de bolo seco, w ($\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{ciclo}$) 0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 1
 Tempo de formar, Θ_1 (min) 0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 2
 Θ_d/w → Obtida pelo gráfico da figura 3, utilizando o teor de água no bolo

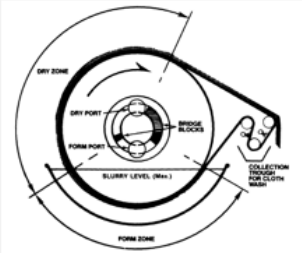
Tempo de secagem, Θ_d (min) 0
 Tempo do ciclo de formação, CT_{form} (mpr) 0
 Tempo do ciclo de secagem, CT_{dry} (mpr) 0
 } O maior dos tempos define qual das duas taxas controla o processo de filtração, a secagem ou a formação do bolo, sendo o maior tempo usado para o cálculo da taxa de filtração.
 Fator de scale-up global 0,58
 Taxa de filtração ($\text{kg}/(\text{h} \cdot \text{m}^2)$) 0
 Área de filtro necessária (m^2) 0 → Usar tamanho comercial (recorrendo a fornecedores da especialidade) mais próximo da área calculada

Filtro de disco | Filtro de esteira | Filtro tambor rotativo vácuo | Filtro de folhas | Filtro de prensa

Figura 28 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de disco).

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento de um filtro de esteira de tambor com lavagem
 Perry, R.; Green, D. (1997). Chemical Engineer's Handbook. McGraw-Hill 8th ed.



Submersão efetiva máxima, % → Tipicamente 30% para este tipo de filtro
 Submersão aparente máxima, % → Tipicamente 35% para este tipo de filtro
 Arco de lavagem máximo, % → Tipicamente 29% para este tipo de filtro
 Porção do ciclo sob vácuo, % → Tipicamente 75% para este tipo de filtro

Área do filtro com base em fatores de scale-up

Fatores de scale-up
 Fluxo 0,9
 Área 1
 Descarga 1 } Valores retirados da literatura, ajustar se necessário

Gravidade específica do líquido de alimentação
 Sólidos totais dissolvidos no líquido de alimentação, C_1 (wt%)
 Nível de vácuo (inHg)
 Teor de água no bolo final (wt%)
 Caudal de sólido seco pretendido (ton/h)
 Sólidos totais dissolvidos no bolo seco (wt%)
 Espessura do bolo (cm) → Mínimo 0,3 a 0,5 cm, deve utilizar-se um valor superior
 Massa de bolo seco, w (kg/m².ciclo) 0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 1
 Tempo de formação, Θ_f (min) 0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 2
 Θ_d/w → Obtida pelo gráfico da figura 3, utilizando o teor de água no bolo
 Tempo de secagem, Θ_d (min) 0

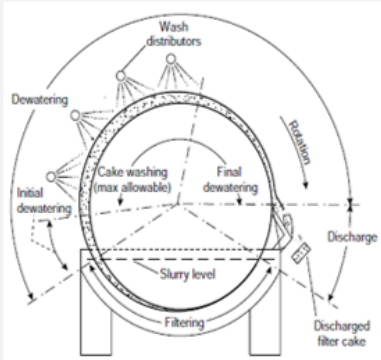
Lavagem necessária

Filtro de disco | **Filtro de esteira** | Filtro tambor rotativo vácuo | Filtro de folhas | Filtro de prensa

Figura 29 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de esteira).

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento de um filtro de tambor rotativo a vácuo
 Hicks, T. G.; Chopey N.P. Handbook of Chemical Engineering Calculations. 4th ed. McGraw Hill



Teor de sólidos na alimentação (%)
 Solutos no líquido (%)
 Humidade final do bolo (%)
 Taxa de lavagem, j → Volume de lavagem por volume de vazio
 Submersão máxima, %
 Submersão efetiva, %
 Arco de lavagem máximo, %
 Arco de sucção (secagem inicial), %
 Arco de descarga e resubmersão, %
 Espessura mínima do bolo (cm)
 Espessura do bolo pretendida (cm)
 Caudal de bolo (lbm/h)
 Massa de bolo, w_c (kg/m²) 0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 1.
 Massa de bolo, w_s (lbm/ft²) 0
 Tempo de filtração (min) 0,0 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 2.
 Taxa de filtração (lbm/h.ft²) 0
 Ciclo mínimo (min/r) 0
 Ciclo mínimo (r/min) 0

Verificar se a secagem ou lavagem inicial podem ser feitas dentro do tempo disponível durante o ciclo mínimo calculado

Tempo de secagem, t_d (min) 0
 Fator de correlação 0 → t_d/w_c
 Teor de água no bolo (bolo desidratado mas não lavado D/u), % 32,69 → Correlação obtida pelo gráfico da figura 3.
 Líquido no bolo D/u (lbm/ft².r) 0
 Quantidade de lavagem, V_w (lbm/ft².r) 0

Filtro de disco | Filtro de esteira | **Filtro tambor rotativo vácuo** | Filtro de folhas | Filtro de prensa

Figura 30 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de tambor rotativo a vácuo).

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento de um filtro de folhas
 Sutherland, K. Filters and Filtration Handbook (2008). 5th ed. Elsevier

Caudal de suspensão a filtrar (m³/h)

Taxa média de filtração (m³/h.m²)

Área do filtro (m²)

Volume de sólidos por ciclo (m³)

Espessura do bolo (m)

Área do filtro (m²)

A espessura do bolo também influenciará o espaçamento entre as folhas.

| Espaçamento entre folhas | Espessura máxima do bolo |
|--------------------------|--------------------------|
| 2" | 3/4 " |
| 3" | 1 1/8 " |
| 4" | 1 1/2 " |

1"=1/12 ft= 0,0254 m

Área final do filtro (m²) → Maior das áreas calculadas acima

Filtro de disco | Filtro de esteira | Filtro tambor rotativo vácuo | **Filtro de folhas** | Filtro de prensa

Figura 31 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de folhas).

Legenda das células
 Input manual
 Output automático

Dimensionamento de um filtro de prensa

Volume de suspensão por dia (L)

Teor de sólidos na alimentação (%)

Teor de sólidos no bolo seco (saída do filtro) (%)

Tempo do ciclo batch (horas)

Tempo de operação da fábrica (horas/dia)

Batches/dia

Sólidos filtrados por dia (kg sólidos/dia)

Sólidos filtrados por batch (kg sólidos/batch)

Massa de bolo/batch (kg bolo/batch)

Densidade do bolo (kg/L)

Volume do bolo (dm³ de bolo)

Volume do filtro (m³)

Filtrato (discharge (typical))

Slurry head (typical)

Stationary head

Polypropylene plate

Cylinder bracket or tail stand

Follower or movable head

Control panel

Double acting hydraulic cylinder

Filtro de disco | Filtro de esteira | Filtro tambor rotativo vácuo | Filtro de folhas | **Filtro de prensa**

Figura 32 - Ferramenta auxiliar no dimensionamento de filtros (filtro de prensa).

Neste caso, por falta de alguns parâmetros, não se aplicou a ferramenta ao caso prático em estudo. No entanto, quer para a filtração do óleo quer para a da miscela, o tipo de filtro mais adequado é o filtro de folhas. Os filtros devem ser “auto-limpantes” para funcionarem de forma mais autónoma e segura.

3. Implementação de uma unidade de secagem industrial de lecitinas

3.1. Seleção do tipo de evaporador

Após o estudo e análise das características de cada um dos evaporadores mencionados em **1.5. Tecnologias de secagem industrial (por evaporação da água)** e com base na **Tabela 6**, que compara a sua adaptabilidade (“Sim” se se adapta; “Não” se não se adapta) às características das lecitinas (elevada viscosidade, tendência à formação de incrustações, sólidos em suspensão, produto muito sensível à temperatura), concluiu-se que os evaporadores tubulares são menos adequados a produtos sensíveis à temperatura, com viscosidade elevada, contaminantes ou elevado ponto de ebulição. A evaporação de filme agitado resolve facilmente todos estes problemas.

Tabela 6 – Adaptabilidade dos evaporadores em estudo às características das lecitinas.

| Tipo de evaporador | Elevada viscosidade | Tendência à formação de incrustações | Sólidos em suspensão | Produtos sensíveis à temperatura |
|--|----------------------------|---|-----------------------------|---|
| Batch | Sim | Sim (se tiver agitação) | Sim (se tiver agitação) | Não |
| Tubo horizontal | Não | Não | Não | Não |
| Tubo vertical curto | Não | Sim | Sim | Não |
| Tubo vertical longo ou filme ascendente | Não | Não | Não | Sim |
| Tubular de circulação forçada | Não | Sim | Não | Não |
| Filme descendente | Não | Não | Não | Sim |
| Filme fino agitado (horizontal ou vertical) | Sim | Sim | Sim | Sim |

Em suma, selecionaram-se os evaporadores *batch* e de filme fino agitado horizontal ou vertical como potenciais soluções para a secagem das lecitinas.

Tendo em conta as características dos evaporadores selecionados, procedeu-se a uma análise mais pormenorizada de modo a selecionar a melhor opção para a secagem das lecitinas, com base nos seguintes critérios:

- Custos de investimento e instalação – quanto maior o custo de investimento, mais tempo é necessário para recuperá-lo, ou seja, este parâmetro influencia a viabilidade económica do processo de secagem. No entanto, é necessário ter em conta a relação entre o custo e a qualidade/eficiência do equipamento em questão.
- Consumo de energia - quanto menor for o consumo de energia, mais eficiente energeticamente é o equipamento.
- Continuidade do processo – um processo de secagem contínuo processa maiores capacidades com uma única passagem e requer menos supervisão de um operador em comparação com um processo *batch*.

- Tempo de residência - quanto menor for o tempo de residência, menor é a probabilidade do produto se decompor ou a sua qualidade final se degradar.
- Robustez - um *design* robusto do equipamento corresponde a custos de manutenção inferiores.
- Flexibilidade - o evaporador deve ter flexibilidade suficiente para processar lecitinas de diversas origens e numa larga gama de caudais.
- Facilidade de limpeza/manutenção – quanto mais autónomo e “auto-limpante” for o equipamento, mais vantajosa se torna a sua operação, principalmente na presença de produtos viscosos e sensíveis, como é o caso das lecitinas.
- Adaptável a produtos viscosos e sensíveis à temperatura - como as lecitinas são um produto muito viscoso e sensível à temperatura, o equipamento deverá necessariamente estar adaptado a produtos com estas características.
- Qualidade do produto – a preservação da qualidade do produto é um dos fatores mais importantes. É necessário que o processo de secagem seja devidamente controlado e que o evaporador tenha as características adequadas para que não ocorra a decomposição das lecitinas.
- Agitação eficaz (boa mistura e regime turbulento) - é necessária uma agitação eficaz que provoque a circulação turbulenta do produto e a sua mistura, dado que as lecitinas são um produto bastante sensível e viscoso.
- *Fouling* - como as lecitinas apresentam uma elevada viscosidade, a tendência de formação de incrustações é elevada e por isso, o evaporador deve ter mecanismos que reduzam a ocorrência de *fouling*.
- Preservação do filme dentro do evaporador - esta característica diz respeito apenas aos evaporadores de filme agitado vertical ou horizontal. A preservação do filme de produto no interior do evaporador permite uma secagem mais eficiente.
- Vácuo – quanto mais baixo for o vácuo necessário, menores serão os custos energéticos.
- Taxa de evaporação - dado que o objetivo desta secagem é remover grande parte da água presente no produto, quanto mais elevada for a taxa de evaporação da água, melhor será o processo de secagem.
- Fluxo de calor – o fluxo de calor no interior do evaporador, afeta diretamente a eficiência da secagem e a qualidade do produto à saída do processo.
- Área de transferência de calor – muitas vezes a área de transferência de calor é baixa por unidade de volume ocupado pelo evaporador (como é o caso do evaporador *batch*), o que pode representar um problema em relação ao espaço necessário para a instalação do evaporador, quando é exigida uma grande área de transferência de calor.

Atribuiu-se um fator de ponderação entre 1 e 10 a cada um dos critérios supracitados, tendo os critérios com um fator de ponderação superior maior peso na hierarquização das tecnologias de secagem analisadas. Os valores atribuídos encontram-se apresentados no diagrama da **Figura 33**.

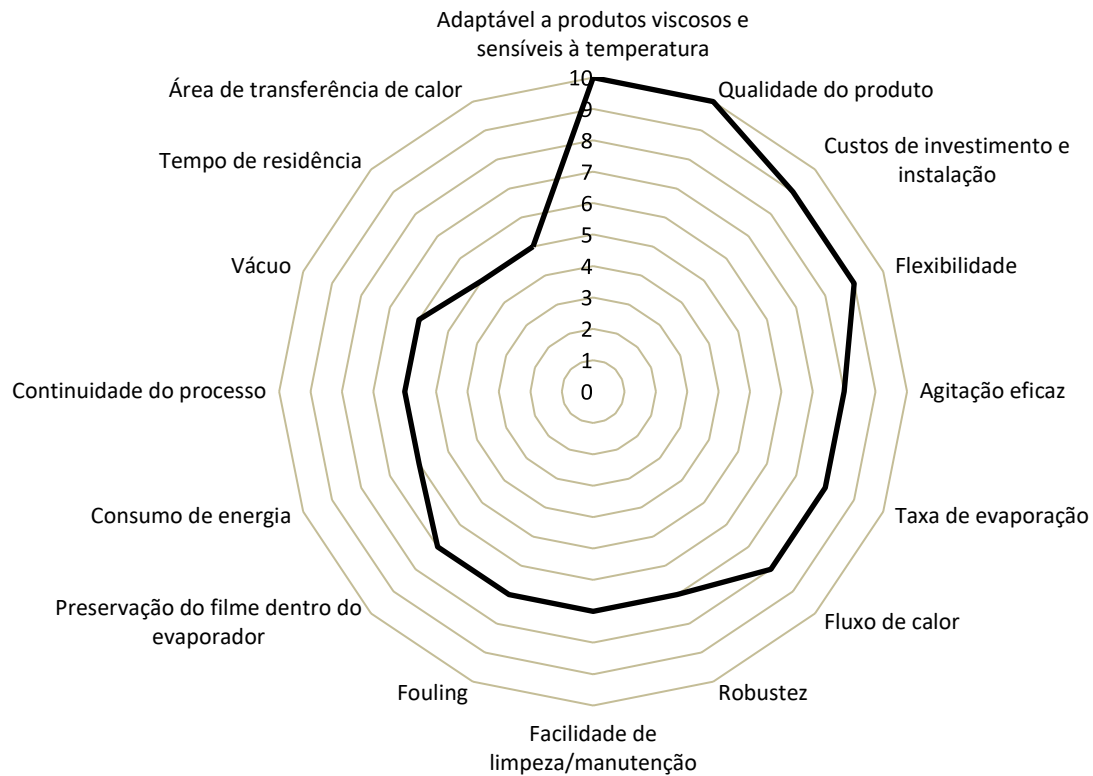


Figura 33- Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização das tecnologias de secagem em estudo.

Os três equipamentos foram comparados entre si e a cada um dos critérios atribuiu-se um valor numa escala de 0 a 10, onde 10 corresponde à melhor classificação e 0 à pior.

Na **Tabela 7** encontram-se os valores atribuídos a cada um dos critérios em cada um dos equipamentos e a sua classificação final foi calculada como anteriormente.

Tabela 7 - Classificação atribuída a cada critério, para cada evaporador e respetiva classificação final.

| Critérios | Fator de ponderação | Evaporador <i>batch</i> | Evaporador de filme fino agitado vertical | Evaporador de filme fino agitado horizontal |
|--|----------------------------|--------------------------------|--|--|
| Custo de investimento e instalação | 9 | 10 | 8 | 8 |
| Consumo de energia | 6 | 10 | 8 | 8 |
| Continuidade do processo | 6 | 0 | 10 | 10 |
| Tempo de residência | 5 | 2 | 10 | 10 |
| Robustez | 7 | 8 | 9 | 9 |
| Flexibilidade | 9 | 2 | 8 | 10 |
| Facilidade de limpeza/manutenção | 7 | 4 | 6 | 8 |
| Adaptável a produtos viscosos e sensíveis à temperatura | 10 | 2 | 10 | 10 |
| Qualidade do produto | 10 | 5 | 10 | 10 |
| Agitação eficaz | 8 | 3 | 10 | 10 |
| <i>Fouling</i> | 7 | 4 | 9 | 9 |
| Preservação do filme dentro do evaporador | 7 | 0 | 6 | 9 |
| Vácuo | 6 | 9 | 8 | 8 |
| Taxa de evaporação | 8 | 7 | 9 | 9 |
| Fluxo de calor | 8 | 6 | 9 | 9 |
| Área de transferência de calor | 5 | 6 | 9 | 9 |
| Classificação final | | 572 | 1029 | 1082 |

Pela análise da **Tabela 7** concluiu-se que a tecnologia mais indicada para a secagem das lecitinas é a evaporação de filme fino agitado a operar horizontalmente.

3.2. Filtração/clarificação da miscela e/ou do óleo

Para a produção de lecitinas, todas as impurezas sólidas, que são inevitavelmente arrastadas ao longo do processo, devem ser removidas antes da desgomagem de modo a que as lecitinas no final do processo de secagem tenham a cor e qualidade pretendidas.

No processo atual existe um hidrociclone que clarifica a miscela à saída do extrator antes desta passar para a destilação do hexano. O hidrociclone retira uma pequena parte dos sólidos da miscela, os quais arrastam consigo uma pequena quantidade de miscela, daí retornarem ao extrator.

Na maior parte dos casos, a miscela proveniente de um hidrociclone operando corretamente é suficiente para manter os equipamentos da destilação limpos e em condições de operação. (Harten, 2018)

No entanto, o hidrociclone da empresa não é suficiente para garantir a qualidade das lecitinas, sendo necessário remover o máximo de sólidos possível. Para este efeito existem várias alternativas:

- Filtração do óleo cru;
- Clarificação do óleo cru;
- Filtração da miscela;
- Clarificação da miscela.

Filtração do óleo cru

A filtração do óleo cru antes da desgomagem exige de uma grande área de instalação, pois, normalmente, são necessários dois filtros e alguns tanques. Os filtros de folhas verticais costumam ser usados para este propósito assim como um auxiliar de filtração (terra de diatomáceas) de modo a aumentar a taxa de filtração. Para operação, manutenção e limpeza destes filtros é necessária mão-de-obra especializada.

Com o aumento do desgaste do filtro, as perdas de óleo vão sendo cada vez maiores. A principal desvantagem deste tipo de filtração prende-se com o manuseio dos sólidos e resíduos.

Clarificação do óleo cru

A clarificação do óleo cru através de separação centrífuga de alta velocidade é um processo contínuo que não recorre ao uso de filtros. O separador centrífugo requer menos espaço do que os filtros de folhas e não necessita de mão-de-obra especializada para a sua operação, mas requer para a sua manutenção.

As perdas de óleo na clarificação são mínimas e os sólidos podem ser adicionados ao bagaço no DTS. No entanto, tem um custo de investimento superior ao da filtração.

Filtração da miscela

A filtração da miscela envolve caudais maiores e, conseqüentemente, são necessários filtros de maiores dimensões. Além disso, é mais fácil manusear o produto e os sólidos sem a presença do solvente.

A filtração da miscela permite que os sólidos retornem diretamente ao extrator, que haja menos perdas de óleo e se proteja o sistema de destilação do hexano.

No caso de existir algum problema ou avaria, a intervenção será mais difícil devido à presença do hexano.

Clarificação da miscela

A clarificação da miscela, tal como a clarificação do óleo cru, pode ser efetuada numa centrífuga e tem a vantagem de proteger a destilação do hexano, tal como a filtração da miscela.

As perdas de óleo são insignificantes e este processo é, normalmente, mais eficiente do que a filtração do óleo cru.

Não é exigido muito espaço para a instalação da clarificação nem é necessária mão-de-obra especializada.

Os custos de investimento envolvidos no processo de clarificação são superiores aos da filtração, tanto da miscela como do óleo.

De modo a determinar qual a melhor opção para a remoção dos sólidos, fez-se uma análise com base nos seguintes critérios:

- Viscosidade do fluido - dependendo da zona do processo, o fluido a filtrar/clarificar tem viscosidades variadas devido à presença ou ausência de hexano. A miscela apresenta uma menor viscosidade que o óleo, o que facilita o processo de remoção dos sólidos.
- Caudal do fluido – quanto maior for o caudal do fluido maiores serão os equipamentos necessários o que implica mais espaço disponível e maiores custos.
- Área de instalação – a área necessária para a instalação da unidade é um dos critérios a ter em atenção, dado que se terá que adaptar ao espaço disponível na fábrica.
- Número de equipamentos – pretende-se o menor número de equipamentos possível, principalmente quanto ao equipamento principal (número de filtros ou número de centrífugas de clarificação).
- Tubagem – quanto menos tubagem for necessária, menores serão os custos de tubagem e montagem.
- Destino dos sólidos removidos – um dos fatores importantes a considerar é o destino dos sólidos que são removidos e que arrastam óleo consigo. O ideal será sempre reciclar os sólidos ao processo (ao extrator ou ao DTS) para se recuperar o óleo arrastado. No entanto, é necessário ter em conta a composição da corrente de sólidos de modo a não perturbar e/ou contaminar o processo. Quando é impossível efetuar esta reciclagem, as perdas de óleo são maiores e terá de se dar outro destino a esta corrente.
- Proteção da destilação – uma filtração/clarificação a montante da destilação de hexano tem como vantagem a proteção dos equipamentos de destilação, que passam a receber um fluido mais limpo.

- Perdas de óleo – as perdas de óleo devem ser minimizadas para que o processo de clarificação/filtração não tenha um elevado impacto no rendimento global de extração do óleo vegetal.
- Presença de hexano – a presença de hexano, apesar de diminuir a viscosidade do fluido, constitui um problema se for necessária alguma intervenção por motivo de avaria ou qualquer outro problema. Além disso, é mais fácil manusear o produto (e os sólidos removidos) sem a presença do solvente dado o risco de explosão.
- Equipamento de filtração/clarificação “auto-limpante” – o equipamento de filtração ou clarificação deve ser “auto-limpante” para que o processo seja mais autónomo e contínuo. No caso de não ser “auto-limpante”, é necessária a presença de um operador periodicamente para descarregar os sólidos e resíduos. Além disso, o facto de não ser “auto-limpante” acarreta mais custos de manutenção e limpeza.
- Uso de auxiliar de filtração – a necessidade de usar um auxiliar de filtração aumenta os custos de operação.
- Acessibilidade – a acessibilidade é um fator importante a ter em conta, dado que condiciona a supervisão e controlo do processo assim como a manutenção e limpeza. Por exemplo, no caso da filtração da miscela, dependendo do tipo de filtro, esta pode ser instalada em cima do extrator, após o hidrociclone, estando assim sob condições de acessibilidade mais difíceis do que um processo de clarificação com centrífuga que é instalado no solo.
- Manutenção – o nível de manutenção necessária influencia os custos de operação e os tempos de paragem do processo.
- Mão-de-obra especializada – principalmente no caso da filtração, muitas vezes é necessária mão-de-obra especializada para a operação e manutenção da unidade.
- Automação – é necessária alguma automação para um correto controlo do processo, mas quanto mais automação for necessária, maiores serão os custos envolvidos.
- Eficiência – quanto mais eficiente for o processo de remoção dos sólidos, maior qualidade terão as lecitinas à saída do processo de secagem e arrefecimento.
- Custo de investimento – o custo de investimento é sempre um critério importante, dado que quanto maior o investimento, maior será o tempo de recuperação do mesmo, o que influencia a viabilidade económica do processo. No entanto, deve-se ter em conta a relação entre o custo e a qualidade/eficiência do processo em questão.

Atribuiu-se um fator de ponderação entre 1 e 10 a cada um dos critérios supracitados, tendo os critérios com um fator de ponderação superior maior peso na hierarquização das hipóteses analisadas para a remoção dos sólidos a montante da secagem das lecitinas. Os valores atribuídos encontram-se apresentados no diagrama da **Figura 34**.

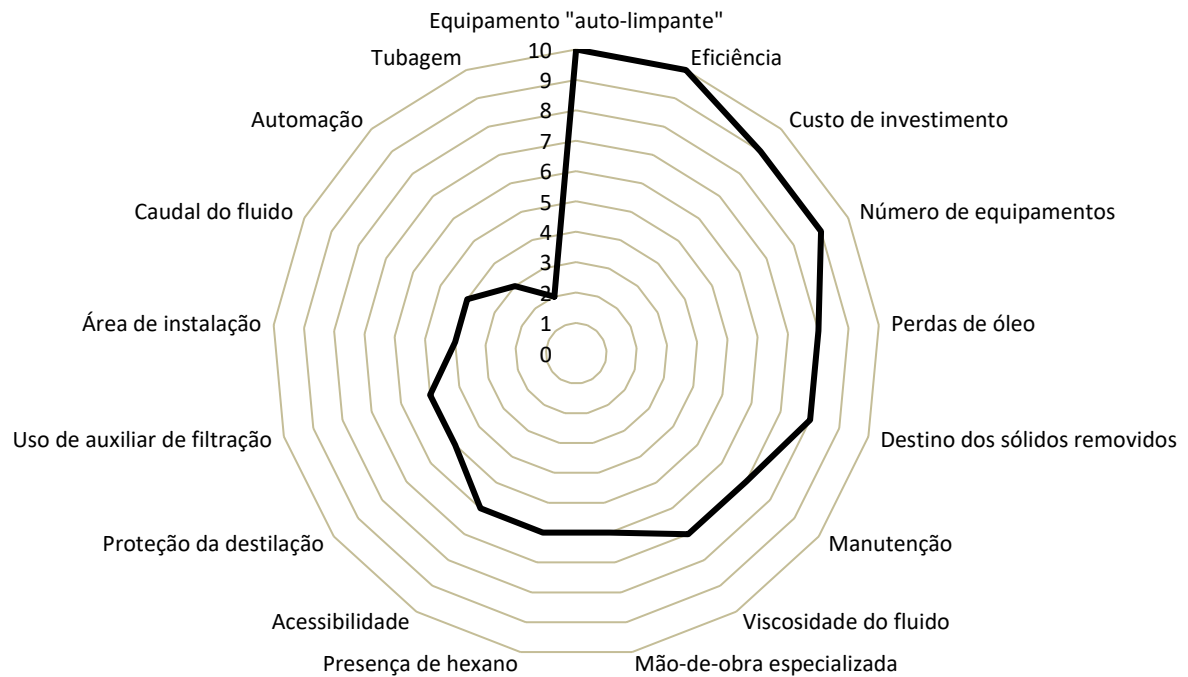


Figura 34 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização da filtração/clarificação da miscela/óleo para remoção dos sólidos a montante da secagem das lecitinas.

As quatro hipóteses foram comparadas entre si e a cada um dos critérios atribuiu-se um valor numa escala de 0 a 10, onde 10 corresponde à melhor classificação e 0 à pior.

Na **Tabela 8** encontram-se os valores atribuídos a cada um dos critérios das hipóteses, em que a classificação final de cada uma, corresponde ao somatório dos produtos entre o fator de ponderação e a classificação atribuída a cada critério.

Tabela 8 – Fator de ponderação e classificação atribuída a cada critério, para a filtração/clarificação da miscela/óleo e respetiva classificação final.

| Crítérios | Fator de ponderação | Filtração do óleo cru | Clarificação do óleo cru | Filtração da miscela | Clarificação da miscela |
|-------------------------------|----------------------------|------------------------------|---------------------------------|-----------------------------|--------------------------------|
| Viscosidade do fluido | 7 | 6 | 6 | 8 | 8 |
| Caudal do fluido | 4 | 10 | 10 | 0 | 0 |
| Área de instalação | 4 | 0 | 10 | 0 | 5 |
| Número de equipamentos | 9 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| Tubagem | 2 | 3 | 5 | 10 | 8 |
| Destino dos sólidos removidos | 8 | 0 | 6 | 10 | 8 |
| Proteção da destilação | 5 | 0 | 0 | 10 | 10 |
| Perdas de óleo | 8 | 0 | 8 | 10 | 8 |
| Presença de hexano | 6 | 9 | 9 | 0 | 0 |
| Equipamento "auto-limpante" | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Uso de auxiliar de filtração | 5 | 0 | 10 | 0 | 10 |
| Acessibilidade | 6 | 10 | 10 | 5 | 10 |
| Manutenção | 7 | 5 | 8 | 2 | 8 |
| Mão-de-obra especializada | 6 | 0 | 10 | 0 | 10 |
| Automação | 3 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| Eficiência | 10 | 7 | 9 | 10 | 9 |
| Custo de investimento | 9 | 10 | 3 | 5 | 0 |
| Classificação final | | 557 | 861 | 635 | 806 |

Pela análise da **Tabela 8** concluiu-se que a clarificação é mais vantajosa face à filtração. De entre as duas hipóteses de clarificação consideradas, a clarificação do óleo cru antes da desgomagem é a mais indicada para o propósito em questão.

Para a clarificação de óleo será utilizada uma centrífuga de disco de eixo vertical, a alta velocidade, que usa forças centrífugas muito altas para separar de forma contínua e eficientemente, uma corrente de fase pesada muito pequena de uma corrente de fase leve muito maior.

3.3. Checklist

Com base no estudo prévio realizado, listaram-se todas as alterações a efetuar na unidade de extração atual da fábrica, para a instalação das unidades de secagem e filtração/clarificação. Essa listagem foi organizada num documento designado "*Checklist*" que foi depois enviado aos fornecedores escolhidos para a respetiva orçamentação.

No caso particular deste projeto, a *checklist* reúne as necessidades e algumas especificações em termos de:

- Tubagens e acessórios necessários – especificação de comprimentos de tubagens, produto a transportar, material de fabrico, número de flanges e curvas e sua localização.
- Isolamento de tubagens e equipamentos.
- Obras de civil necessárias para a instalação das unidades processuais e dos tanques de armazenamento assim como de reparações no terreno na zona destinada à carga do produto – incluindo equipamento e material necessário para os trabalhos, como meios elevatórios.
- Instalação elétrica, instrumentação, automação e cablagem necessárias – incluindo sistema de controlo da nova unidade instalada a integrar no sistema já existente na fábrica; iluminação a instalar; potência consumida na operação dos novos equipamentos.
- Transporte e instalação dos equipamentos e respetivo local de implementação.
- Especificações da composição das lecitinas à entrada e à saída do processo de secagem.
- Documentação necessária a ser facultada pelo fornecedor e que deve estar explícita na proposta.

Para elaboração de uma proposta e orçamento preliminares, foram agendadas reuniões *in situ* com os fornecedores, de modo a analisar os locais previstos para a implementação das novas unidades processuais e a esclarecer eventuais dúvidas.

3.4. Propostas de fornecedores relativamente à secagem e filtração ou clarificação

Contactaram-se vários fornecedores especialistas em tecnologias de secagem e no processo de produção de lecitinas, solicitando-lhes orçamentos (*turn-key*) para o processo de secagem das lecitinas e para a filtração/clarificação da miscela/óleo.

Dos contactos efetuados e após excluir os fornecedores que não responderam e os que não estavam disponíveis para fornecer este tipo de tecnologia, reuniram-se quatro propostas de fornecedores distintos (A, B, C e D).

Proposta do fornecedor A

Relativamente à secagem das lecitinas, este fornecedor propôs um evaporador de filme vertical a operar sob vácuo. O sistema de vácuo gera um vácuo de 80 a 93 mbar e é constituído por ejetores a vapor multi-estágio com inter-condensadores.

Para a remoção dos sólidos do óleo/miscela, o fornecedor A aconselhou a clarificação do óleo antes da desgomagem usando uma centrífuga clarificadora.

Proposta do fornecedor B

O fornecedor B propôs um evaporador de filme a operar horizontalmente sob vácuo. O sistema de vácuo é do tipo bomba de vácuo de anel líquido de um estágio e gera um vácuo de 60 a 70 mbar.

Até à data da escrita desta dissertação, o fornecedor B não enviou uma proposta para a remoção dos sólidos.

Proposta do fornecedor C

O fornecedor C propôs o uso de um evaporador de filme horizontal que opera sob vácuo (muito semelhante ao do fornecedor B). O sistema de vácuo proposto inclui uma bomba de vácuo de anel líquido e gera um vácuo de 40 a 70 mbar.

Até à data da escrita desta dissertação, o fornecedor C não disponibilizou uma proposta para a remoção dos sólidos.

Proposta do fornecedor D

A proposta do fornecedor D inclui um evaporador de filme a operar verticalmente sob vácuo. O sistema de vácuo híbrido é constituído por um ejetor de vapor e uma bomba de anel líquido e gera um vácuo de cerca de 55 mbar.

Para a remoção dos sólidos, o fornecedor D propôs a filtração do óleo cru antes da desgomagem com o uso de dois filtros de folhas verticais a operar continuamente e recorrendo a um auxiliar de filtração (terra de diatomáceas) que atua como pré-cobertura do meio filtrante.

Após a secagem das lecitinas, estas devem ser arrefecidas até uma temperatura entre os 55°C e os 60°C para se manter a sua qualidade e cor durante o tempo de armazenamento. Para isso, os fornecedores A, B e C propuseram a utilização de um permutador de calor de superfície raspada, enquanto o fornecedor D propôs um permutador de calor de placas.

Os fornecedores A e D incluíram nas suas propostas dois tanques de armazenamento para as lecitinas, que devem ser de fundo cónico, aquecidos e com agitação.

3.5. Viabilidade técnica

3.5.1. Tecnologia de evaporação de filme agitado (*thin film*) («Horizontal Thin Film Dryer | GIG Karasek USA», 2018; «Thin Film Drying Plants | GIG Karasek USA», 2018)

Tal como foi discutido e concluído em **3.1. Seleção do tipo de evaporador**, a melhor tecnologia para a secagem das lecitinas é o evaporador de filme fino agitado (**Figura 35**).

O evaporador de filme horizontal é projetado para secagem contínua de pastas, lamas, suspensões e sólidos húmidos industriais e municipais.

Um evaporador de filme fino é constituído por um invólucro horizontal ou vertical (sendo o horizontal mais adequado para a secagem das lecitinas como foi concluído anteriormente) com

bocais para alimentação, produto, vapores e fluido de aquecimento (neste caso, vapor saturado), bem como por um sistema de rotor especial.

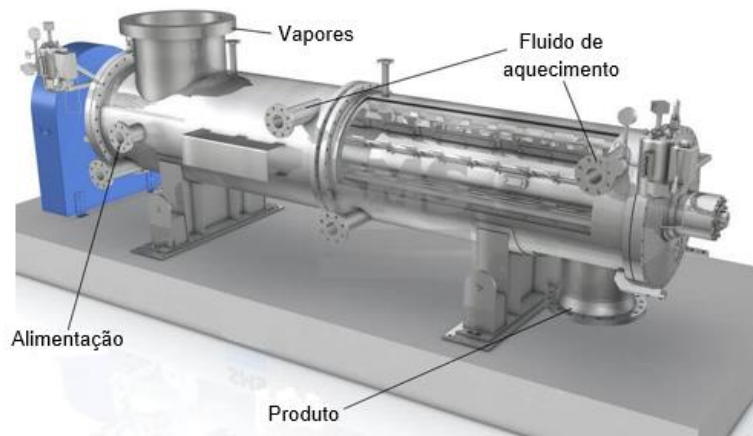


Figura 35 - Representação de um evaporador de filme horizontal. («Horizontal Thin Film Dryer - Buss-SMS-Canzler GmbH», 2018)

O sistema de rotor deste tipo de secador é equipado com limpadores (ou lâminas) dispostos em fileiras.

O produto é continuamente distribuído ao longo da circunferência da parede de aquecimento como uma camada fina de espessura uniforme (< 1 mm). O contacto com a parede é continuamente renovado pelos elementos especiais de limpeza e, ao mesmo tempo, o filme de produto é transportado para a secção final do evaporador, por gravidade (tipo vertical) ou pelo sistema limpador (tipo horizontal).

Os limpadores do rotor (**Figura 36**) não tocam na superfície de aquecimento (existe uma folga). No entanto, mantêm uma transferência de calor eficaz através da limpeza constante das incrustações na superfície de aquecimento, que ocorrem durante a evaporação de um líquido que contenha partículas sólidas. Além disso, devido ao *design* especial de baixo desgaste, os limpadores possuem uma longa vida útil.

A este tipo de rotor, que apresenta uma folga e nunca contacta com a parede de aquecimento, dá-se o nome de rotor de folga fixa (**Figura 37**). («Thin Film / Wiped Film Evaporator | LCI Corporation», 2018)

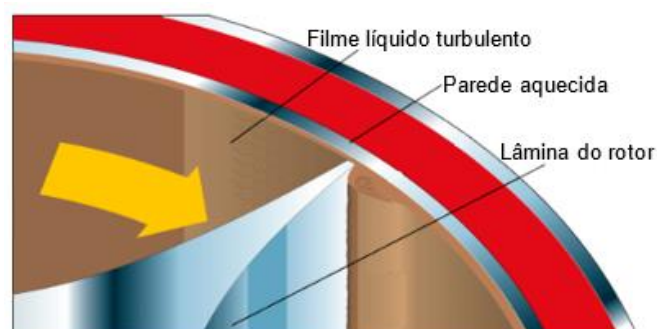


Figura 36 - Representação da secção transversal de um evaporador de filme. («Thin Film / Wiped Film Evaporator | LCI Corporation», 2018)



Figura 37 - Rotor de folga fixa. («Thin Film / Wiped Film Evaporator | LCI Corporation», 2018)

Os vapores gerados circulam em contracorrente com a corrente de produto e, geralmente, são removidos perto do bocal de alimentação, por um sistema de vácuo. («Horizontal Thin Film Dryer - Buss-SMS-Canzler GmbH», 2018)

O tempo de permanência do produto neste tipo de evaporadores é de 1 a 10 minutos no máximo, dependendo da secagem que se pretende e da quantidade de limpadores. Podem ser atingidos níveis de humidade inferiores a 1% no produto final. («Horizontal Thin Film Dryer - Buss-SMS-Canzler GmbH», 2018)

O evaporador pode ser interrompido a qualquer momento e reiniciado com o produto, sem necessidade de atividades de limpeza ou manutenção.

O evaporador de filme fino é caracterizado por um baixo consumo de energia, superfícies de aquecimento “auto-limpantes” e fácil acessibilidade.

Após a secagem das lecitinas, estas abandonam o evaporador a uma temperatura demasiado elevada para ser armazenada, a qual varia entre os 115°C e os 135°C (dependendo também da origem das lecitinas).

Para que as lecitinas não sofram deterioração durante o armazenamento, são arrefecidas até uma temperatura entre os 55°C e os 60°C. O permutador de calor que melhor se adequa a este propósito é o de superfície raspada por ser capaz de lidar com as características e sensibilidade do produto.

O permutador de calor de superfície raspada (**Figura 38**) é adequado para o arrefecimento e aquecimento de produtos da indústria alimentar que possuam elevada viscosidade, como é o caso das lecitinas. («Trocador de calor de superfície raspada», 2018) Este tipo de permutador tem como principais vantagens: («Trocadores de calor de superfície raspada NEAEN VarioT - Thermal food processing equipment», 2018)

- manuseio suave, rápido e altamente eficiente do produto;
- transferência de calor eficaz resultante da contínua raspagem da superfície;
- grande superfície de aquecimento por unidade de área ocupada;
- baixa resistência à circulação de líquido;
- manutenção expedita (substituição rápida e fácil dos raspadores);

- sem perdas de produto.

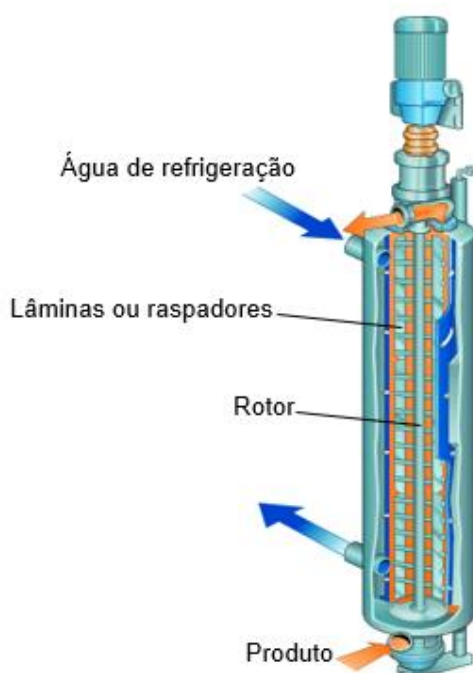


Figura 38 - Permutador de calor de superfície raspada para arrefecimento das lecitinas. («RheoHeat - Scraped surface heat exchanger», 2018)

3.5.2. Comparação técnica das propostas

Com o objetivo de organizar as propostas recebidas hierarquicamente, da mais para a menos adequada, tendo em conta tudo o que foi estudado até aqui, analisaram-se as mesmas detalhadamente com base nos seguintes critérios:

- Tecnologia de secagem – tendo em conta as conclusões anteriores (**3.1. Seleção do tipo de evaporador**), as propostas que incluem um evaporador de filme horizontal são preferenciais.
- Tipo de sistema de vácuo – segundo a análise feita em **2.1. Sistema de vácuo**, um sistema de vácuo do tipo bomba de anel líquido é o que apresenta mais vantagens.
- Tipo de permutador de calor para o arrefecimento das lecitinas – dadas as características das lecitinas, um permutador de calor de superfície raspada é o mais indicado para o arrefecimento das lecitinas.
- Tanques de armazenamento – são necessários dois tanques de fundo cónico, agitados e aquecidos, para que as lecitinas não percam as suas propriedades e qualidade.
- Consumo de utilidades – quanto menor o consumo de utilidades, mais eficiente é o processo energeticamente (menos custos de operação).

- Conexão das tubagens entre a nova unidade e o processo já existente – muitas vezes os fornecedores não incluem nas suas propostas as conexões das tubagens, ficando este trabalho a cargo do cliente (pior alternativa).
- Tubagem dentro dos limites definidos para a implementação – ainda que as conexões das tubagens possam não estar incluídas na proposta, é importante que, dentro dos limites definidos, as tubagens sejam da responsabilidade do fornecedor.
- Conexão dos cabos elétricos da unidade até ao quadro elétrico na sala de quadros – assim como as ligações das tubagens, a ligação dos cabos elétricos nem sempre é incluída nas propostas.
- Instrumentação – a instrumentação é uma das partes mais importantes do processo, sendo fundamental estar incluída na proposta.
- Produto final com a especificação pretendida – é condição obrigatória que o fornecedor garanta a especificação pretendida do produto à saída consoante as condições do produto à entrada.
- Traçagem nas tubagens onde circulam as lecitinas – todas as tubagens onde circulam as lecitinas devem possuir traçagem elétrica.
- Isolamento das tubagens e equipamentos – todos os equipamentos e tubagens devem ser isolados para diminuir significativamente as perdas de calor.
- Equipamentos preparados para serem instalados em zona classificada como ATEX (atmosfera explosiva) – tanto a unidade de secagem como a de filtração ou clarificação serão instaladas numa zona ATEX e, portanto, todos os equipamentos devem estar devidamente preparados.
- Material de construção dos equipamentos e tubagens – pretende-se que todos os equipamentos e tubagens sejam resistentes e com uma longa vida útil, sendo importante a qualidade do seu material de construção e que este consiga suportar as características dos produtos com que contacta. Assim, os equipamentos devem ser em aço inoxidável, as tubagens em aço inoxidável 316 (devido à presença de enxofre na colza), exceto a tubagem de azoto que deverá ser em cobre e a tubagem de vapor que poderá ser em aço inoxidável 304 ou aço carbono.
- Quadro elétrico local – deve ser instalado um quadro elétrico local e “botões de emergência” na zona de instalação do processo, para um controlo local eficaz e para o caso de ser necessário parar a unidade de secagem das lecitinas rapidamente.
- Quadro elétrico na sala de quadros – além do quadro elétrico local, é necessário instalar o quadro elétrico principal na sala de quadros elétricos da fábrica, onde será instalado o PLC (*programmable logic controller*).

- Potência instalada – a potência instalada, tal como o consumo de utilidades, contribui para os gastos energéticos durante a operação do processo, o que significa que, quanto menor for a potência necessária, mais eficiente é o processo energeticamente.
- Integração do sistema de controlo no sistema já existente na unidade fabril – o sistema de controlo da nova unidade implementada deve ser integrado no *software* de controlo já existente na empresa.
- Bombas de deslocamento positivo (carretos) para as lecitinas – dadas as características das lecitinas, principalmente devido à sua elevada viscosidade, têm de ser utilizadas bombas de carretos para o seu bombeamento.
- Montagem e instalação da unidade no terreno – é preferível e mais vantajoso que o fornecedor inclua na sua proposta a montagem e instalação das novas unidades no terreno destinado à sua implementação; no entanto, por vezes, os fornecedores não estão disponíveis para o fazer, ficando esses trabalhos à responsabilidade do cliente, podendo o fornecedor disponibilizar a supervisão dos trabalhos.
- Entrega dos equipamentos nas instalações da unidade industrial – pretende-se que a entrega dos equipamentos na unidade industrial esteja incluída na proposta.
- Atividades de pré-comissionamento, comissionamento e *start-up* – as atividades de pré-comissionamento incluem todos os testes a realizar aos equipamentos antes das atividades de comissionamento e *start-up*. São realizados testes mecânicos aos equipamentos, testes de pressão, testes elétricos, pré-calibração e lubrificação dos equipamentos, controlo de fugas das linhas de ar de instrumentação, alinhamento de bombas, controlo da rotação dos motores e incluem todos os enchimentos iniciais necessários. As atividades de comissionamento envolvem todos os trabalhos realizados a partir do momento em que os equipamentos estão preparados para receber as matérias primas. Incluem testes às instalações de utilidades, testes eletromecânicos das bombas, testes ao *software* de controlo, controlo e calibração dos alarmes dos termómetros e manómetros, controlo dos interruptores e alarmes de temperatura e pressão, testes das válvulas pneumáticas, confirmação final de todas as atividades de montagem e pré-comissionamento, entre outros testes que sejam relevantes. O *start-up* é realizado após todos os testes aos equipamentos e tubagens terem sido efetuados. Esta fase testa o funcionamento do processo em estado estacionário na presença de todas as matérias-primas e utilidades, mede e afina todas as partes do processo para garantir os consumos e capacidades pretendidas e é normalmente realizada durante um período de 24 horas, junto dos responsáveis da obra.
- Atividades de formação de pessoal – a formação consiste em ensinar e treinar as rotinas e especificidades de operação da unidade instalada aos operadores ou

responsáveis pela mesma. Estas atividades, normalmente, são feitas durante o pré-comissionamento e comissionamento.

- Tipo de tecnologia para remoção dos sólidos a montante da desgomagem – tendo em conta as conclusões obtidas em **3.2. Filtração/clarificação da miscela e/ou do óleo**, a melhor forma de remover os sólidos a montante da desgomagem é através de uma clarificação (preferencialmente do óleo cru).

Nesta fase não se considerou custo de investimento e instalação, dado que aqui se pretende analisar unicamente a parte técnica. A viabilidade económica será analisada de seguida.

Atribuiu-se um fator de ponderação entre 1 e 10 a cada um dos critérios supracitados, tendo os critérios com um fator de ponderação superior maior peso na hierarquização das propostas. Os valores atribuídos encontram-se apresentados no diagrama da **Figura 39**.

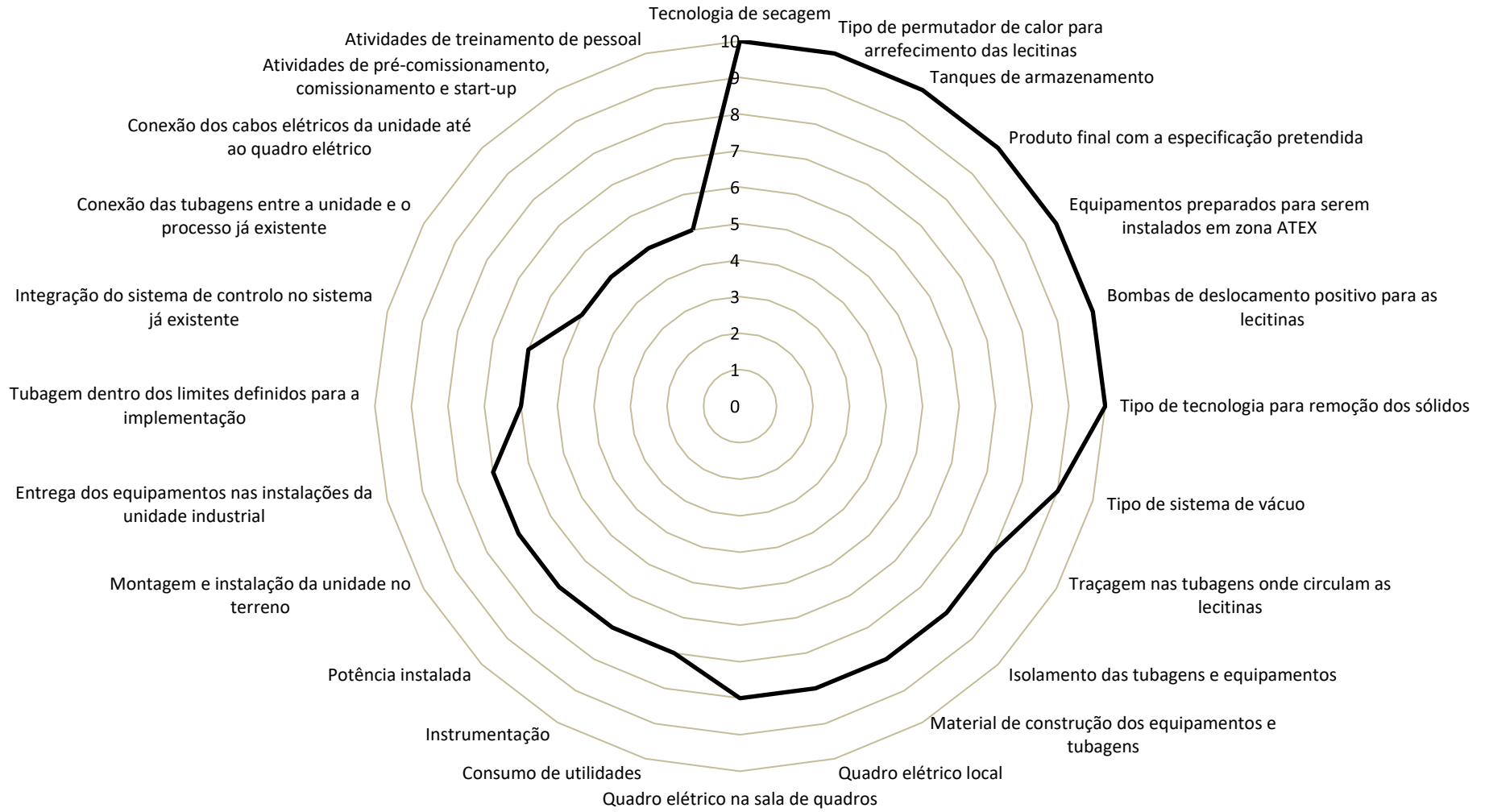


Figura 39 - Diagrama radar dos fatores de ponderação atribuídos a cada critério para hierarquização das propostas.

As quatro propostas foram comparadas entre si e a cada um dos critérios atribuiu-se um valor na escala de 0 a 10, em que 10 corresponde à melhor classificação e 0 à pior. No caso em que a informação do critério não tiver sido disponibilizada ou não se aplique, atribuiu-se classificação 0. Para os critérios quantificáveis, atribuiu-se 0 à proposta menos favorável e 10 à proposta mais favorável. A classificação para as propostas intermédias, para o mesmo critério, foi obtida por uma regressão linear. Na **Tabela 9** encontram-se os valores atribuídos a cada um dos critérios para cada uma das propostas, sendo a sua classificação final, o somatório dos produtos entre o fator de ponderação e a classificação atribuída a cada critério.

Tabela 9 – Fator de ponderação e classificação atribuída a cada critério para cada proposta e respetiva classificação final.

| Critérios | Fator de ponderação | A | B | C | D |
|---|----------------------------|------------|-------------|-------------|-------------|
| Tecnologia de secagem | 10 | 9 | 10 | 10 | 9 |
| Tipo de sistema de vácuo | 9 | 6,6 | 10 | 10 | 0 |
| Tipo de permutador de calor para arrefecimento das lecitinas | 10 | 10 | 10 | 10 | 6 |
| Tanques de armazenamento | 10 | 10 | 0 | 0 | 10 |
| Consumo de utilidades | 7 | 0 | 10 | 3,3 | 0 |
| Tubagem dentro dos limites definidos para a implementação | 6 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Conexão das tubagens entre a unidade e o processo já existente | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Conexão dos cabos elétricos da unidade até ao quadro elétrico na sala de quadros | 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| Instrumentação | 7 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Produto final com a especificação pretendida | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Traçagem nas tubagens onde circulam as lecitinas | 8 | 0 | 10 | 10 | 0 |
| Isolamento das tubagens e equipamentos | 8 | 0 | 10 | 10 | 0 |
| Equipamentos preparados para serem instalados em zona ATEX | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Material de construção dos equipamentos e tubagens | 8 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Quadro elétrico local | 8 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Quadro elétrico na sala de quadros | 8 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Potência instalada | 7 | 0 | 9,6 | 10 | 0 |
| Integração do sistema de controlo no sistema já existente na unidade fabril | 6 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Bombas de deslocamento positivo (carretos) para as lecitinas | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 |
| Montagem e instalação da unidade no terreno | 7 | 0 | 10 | 10 | 0 |
| Entrega dos equipamentos nas instalações da unidade industrial | 7 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Atividades de pré-comissionamento, comissionamento e <i>start-up</i> | 5 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Atividades de treinamento de pessoal | 5 | 0 | 10 | 10 | 10 |
| Tipo de tecnologia para remoção dos sólidos a montante da desgomagem | 10 | 10 | 0 | 0 | 5 |
| Classificação final | | 739 | 1467 | 1423 | 1110 |

Analisando os resultados apresentados na **Tabela 9**, concluiu-se que a proposta que melhor se adequa ao projeto que se pretende implementar é a do fornecedor B. No entanto, esta proposta não inclui a tecnologia para remoção dos sólidos, o que significa que teria de ser solicitada a outro fornecedor (por exemplo, ao fornecedor A que tem a melhor classificação neste critério ou a outro fornecedor da especialidade).

3.5.3. Análise de risco ao embalamento do produto

Após a secagem e arrefecimento das lecitinas, estas são armazenadas em tanques de fundo cónico, aquecidos e agitados.

A expedição do produto pode ser efetuada de várias formas, dependendo também da preferência do cliente. As lecitinas podem ser transportadas em cisternas preparadas para este tipo de produto, em bidons ou em *flexitanks/flexibags*, sendo estes últimos pouco utilizados para as lecitinas.

Nas cisternas, o sistema de carga é mais fácil, têm condições de aquecimento para manter a qualidade do produto durante o transporte, requerem menos mão-de-obra e tempo para o seu enchimento e o risco de perdas de produto é mínimo, sendo assim, um transporte mais seguro.

O embalamento em bidons requer mais mão-de-obra e tempo para o seu enchimento e transporte em empilhadores e há uma maior probabilidade de perdas de produto. No entanto, alguns clientes preferem este tipo de embalamento.

Os *flexitanks* e *flexibags* têm como principais vantagens, o carregamento mais rápido do que em bidons, menos mão-de-obra no seu enchimento e manuseamento, menor probabilidade de ocorrerem pequenas perdas de produto ou a sua contaminação e não é necessário empilhador para o carregamento e transporte. Apesar de todas estas vantagens, este tipo de embalamento é muito pouco usual para as lecitinas, pois se ocorrer um vazamento ou quebra do *flexitank* ou *flexibag*, ocorrerá a perda total do produto e será difícil manter a sua qualidade.

Realizou-se uma análise de risco a cada uma das hipóteses de expedição das lecitinas, em cisternas, bidons e *flexitanks/flexibags* e representou-se o resultado numa matriz para cada um dos casos (**Figura 40, Figura 41 e Figura 42**). Consideraram-se como riscos os seguintes:

- perda de qualidade do produto;
- perda total do produto devido a vazamento ou quebra;
- pequenos desperdícios do produto;
- contaminação do produto.

Classificou-se cada risco quanto ao seu impacto na empresa (insignificante, pouco moderado, significativo, catastrófico) e quanto à probabilidade de ocorrer (baixa, baixa-média, média, média-alta, alta).

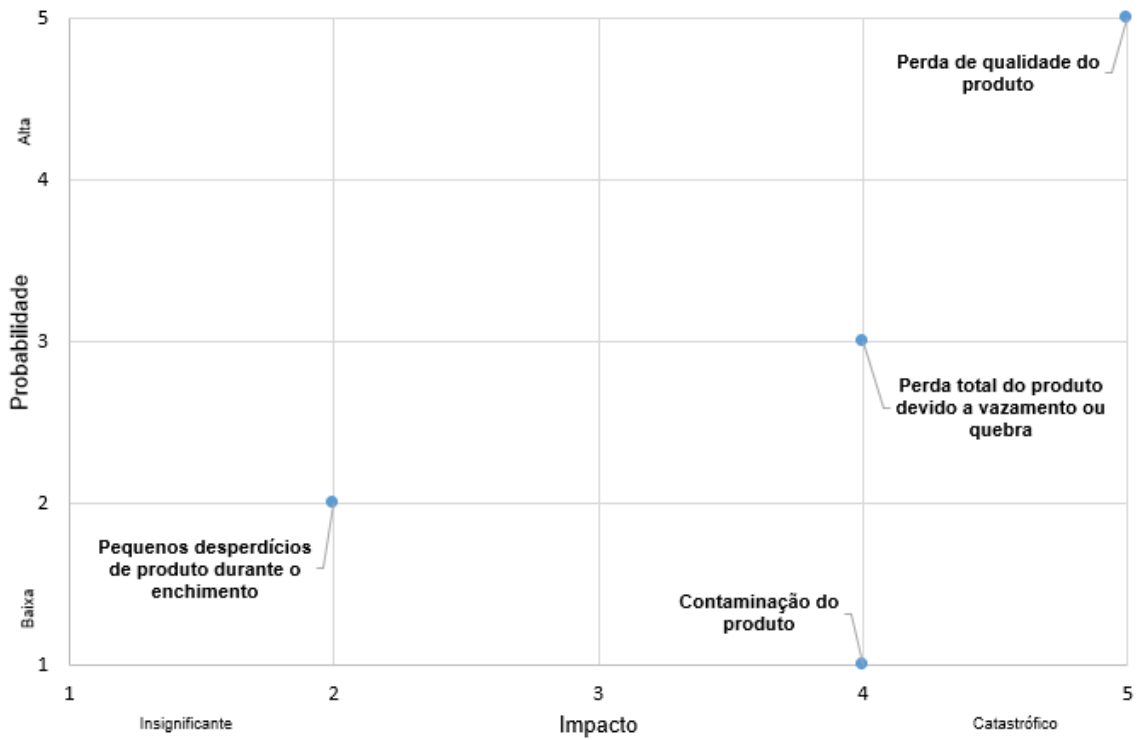


Figura 40 - Matriz de risco para embalagem em flexitanks/flexibags.

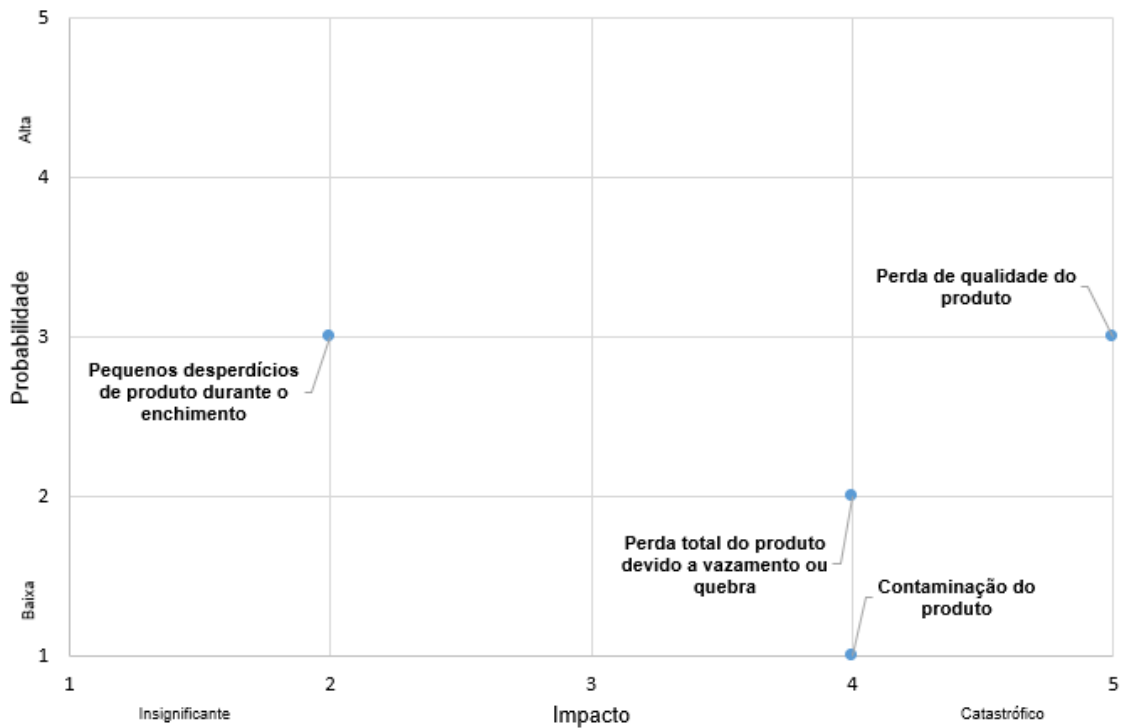


Figura 41 - Matriz de risco para embalagem em bidons.

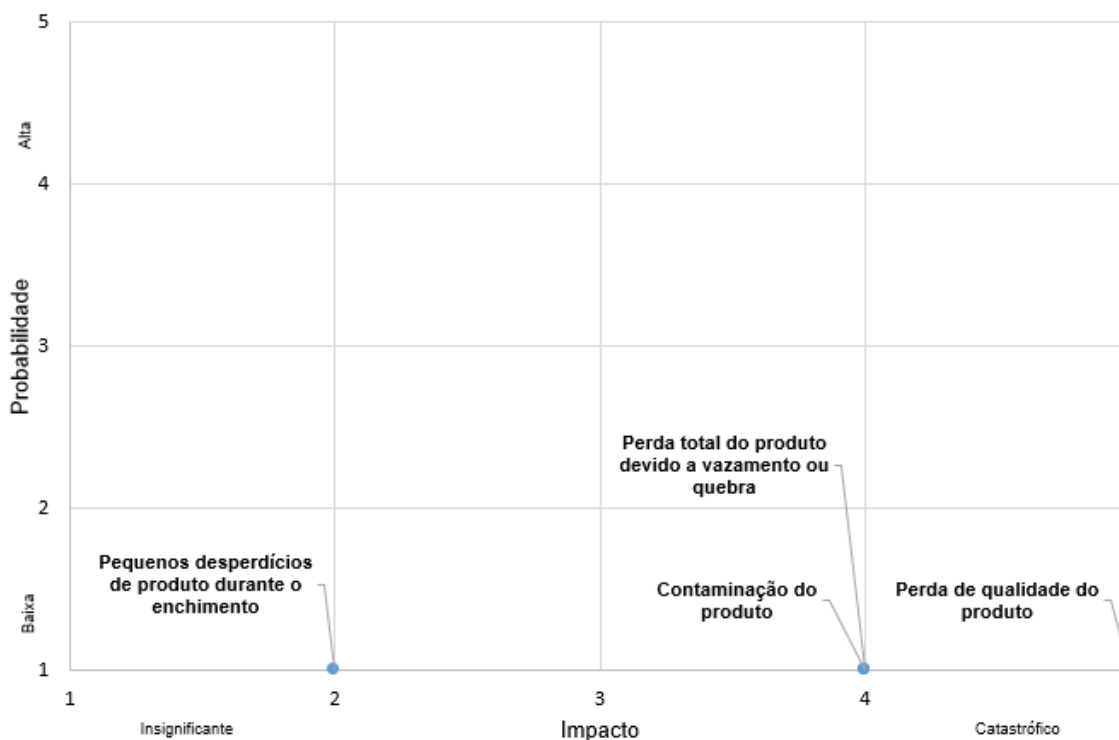


Figura 42 - Matriz de risco para expedição do produto em cisternas.

Pela análise das três matrizes, concluiu-se que a expedição do produto em cisternas é a opção que apresenta menor probabilidade dos riscos considerados ocorrerem. Relativamente ao embalagem, os bidons são uma melhor opção face à utilização de *flexitanks* ou *flexibags*.

3.6. Viabilidade económica

3.6.1. Estimativa do investimento

Para analisar a viabilidade económica da implementação da unidade de secagem de lecitinas, assim como da filtração/clarificação do óleo ou miscela, foi necessário estimar as parcelas do investimento.

Além das estimativas do investimento efetuadas pelos fornecedores A, B, C e D, algumas parcelas não incluídas nas propostas tiveram de ser estimadas para serem contabilizadas na análise económica.

Uma das parcelas estimada foi o custo das tubagens necessárias para conectar a unidade a instalar ao processo já existente, assim como o seu isolamento e traçagem (onde circulam as lecitinas). Para esta estimativa, determinaram-se no terreno os comprimentos das tubagens necessárias e o número de curvas e flanges (considerou-se que a tubagem deve ser flangeada de 6 em 6 m). Consideraram-se tubagens e acessórios em aço inox 316 de 2 polegadas e isolamento de lã de rocha.

Os tanques de armazenamento das lecitinas serão instalados numa zona onde atualmente existem tanques danificados que deverão ser removidos para se colocarem os novos. Desta forma, foi necessário estimar o custo de remoção dos tanques danificados e a colocação dos novos, tendo

em conta a mão-de-obra necessária, meios de elevação (grua) e os custos envolvidos na remoção da parte elétrica existente junto aos tanques danificados e a colocação da mesma após a instalação dos novos tanques.

O fornecedor D disponibilizou o custo dos dois tanques de armazenamento, com as respetivas bombas e agitadores. Assim, utilizou-se este custo para a análise económica às propostas dos fornecedores B e C, que incluíram esse custo no seu orçamento.

Para a proposta do fornecedor A, foi necessário também estimar o custo da montagem da unidade de secagem, da instrumentação e controlo, das instalações elétricas e dos isolamentos térmicos.

Para a proposta do fornecedor D, estimou-se o custo da montagem.

Relativamente à clarificação do óleo proposta pelo fornecedor A, estimou-se o custo das tubagens, assim como do seu isolamento e traçagem, tal como foi calculado para a secagem. Tanto para a clarificação como para a filtração do óleo proposta pelo fornecedor D, estimou-se o custo da montagem.

Como não foi recebida qualquer proposta dos fornecedores B e C para a remoção dos sólidos, consideraram-se os custos da clarificação do óleo (proposta pelo fornecedor A) na análise económica.

3.6.2. Análise económica

Analisou-se a viabilidade económica de cada uma das propostas para dois cenários distintos:

- 1º cenário: considerou-se que ambas as matérias-primas, soja e colza, são OGM (organismos geneticamente modificados), ou seja, preços de venda iguais para as lecitinas de soja e colza.
- 2º cenário: como frequentemente, a colza que chega à fábrica é não OGM, considerou-se o cenário em que se processa soja OGM e colza não OGM, isto é, o preço de venda da lecitina de colza é superior ao preço de venda da lecitina de soja, sendo a razão entre o primeiro e o segundo de 1,28.

A análise económica desenvolvida baseou-se nos seguintes pressupostos:

- Caudais anuais de grãos de soja e sementes de colza processados em 2017.
- Razão entre os preços de venda da lecitina de soja OGM e o bagaço de soja de 2,34 (dados atuais).
- Razão entre os preços de venda da lecitina de colza OGM e o bagaço de colza de 3,95 (dados atuais).
- Razão entre os preços de venda da lecitina de colza não OGM e o bagaço de colza de 5,04 (dados atuais).

- 10 anos de amortização dos ativos fixos tangíveis e 3 anos para os ativos fixos intangíveis.
- Taxa de atualização de 10,5%.
- Taxa de juro de 0,5%.
- Taxa de IRC de 25%.

Para a estimativa do custo anual associado ao consumo de utilidades, consideraram-se os consumos estimados pelos fornecedores.

Em relação à manutenção, considerou-se que o seu custo anual é 1% do custo de investimento.

Para o cálculo do proveito resultante da venda da lecitina seca que atualmente se vende ao preço do bagaço, usou-se a seguinte expressão **(3-1)**, em que $Caudal\ anual_{lectina\ seca}$ corresponde ao caudal de lecitina seca produzida num ano, $Preço_{lectina\ seca}$ é o preço por tonelada de lecitina seca e $Preço_{bagaço}$ é o preço por tonelada de bagaço. Aplicou-se esta expressão para as lecitinas de soja e colza e o proveito total obteve-se pela soma dos proveitos respetivos.

$$Proveito \left(\frac{\text{€}}{\text{ano}} \right) = Caudal\ anual_{lectina\ seca} \left(\frac{\text{ton}}{\text{ano}} \right) \times [Preço_{lectina\ seca} \left(\frac{\text{€}}{\text{ton}} \right) - Preço_{bagaço} \left(\frac{\text{€}}{\text{ton}} \right)] \quad (3-1)$$

A rentabilidade do projeto foi avaliada com base em indicadores económicos calculados a partir de *cash-flows* atualizados. Calcularam-se os seguintes indicadores económicos: VAL (valor atual líquido), que consiste no retorno monetário decorrente do investimento após este estar saldado; TIR (taxa interna de retorno), que consiste na taxa de atualização para a qual o VAL é zero; PRI ou *payback time* (período de recuperação do investimento), ou seja, tempo de operação necessário, em anos ou meses, para recuperar o dinheiro investido.

Na **Tabela 10** e na **Tabela 11** apresentam-se os indicadores económicos de cada uma das propostas para os cenários 1 e 2, respetivamente.

Tabela 10 - Indicadores económicos resultantes da análise económica a 10 anos, de cada uma das propostas, para o cenário 1.

| Propostas Indicadores | A | B | C | D |
|--------------------------|-------|---------|---------|----------|
| VAL (€) | 3 792 | -19 815 | 332 061 | -159 434 |
| TIR (%) | 11 | 10 | 15 | 8 |
| PRI (ano) | 10 | - | 8 | - |

Tabela 11 - Indicadores económicos resultantes da análise económica a 10 anos, de cada uma das propostas, para o cenário 2.

| Propostas Indicadores | A | B | C | D |
|--------------------------|---------|---------|---------|--------|
| VAL (€) | 383 805 | 360 198 | 712 075 | 220 58 |
| TIR (%) | 16 | 14 | 20 | 13 |
| PRI (ano) | 8 | 8 | 6 | 9 |

Analisando os resultados para o cenário 1 (**Tabela 10**), as propostas dos fornecedores B e D foram imediatamente excluídas, pois apresentaram um VAL negativo e uma TIR inferior à taxa de atualização de 10,5%, o que significa que seria impossível recuperar o investimento num período inferior a 10 anos. As propostas dos fornecedores A e C apresentaram ambas um VAL positivo, uma TIR superior à taxa de atualização e um PRI inferior ou igual a 10 anos, ou seja, poderiam ser hipóteses rentáveis (a longo prazo). A proposta com melhores resultados para o cenário 1 é a do fornecedor C.

Analisando os resultados para o cenário 2 (**Tabela 11**), todas as propostas apresentaram um VAL positivo, uma TIR superior à taxa de atualização e um período de recuperação do investimento inferior a 10 anos, donde se conclui que, para este cenário, todas as propostas seriam rentáveis. Mais uma vez a proposta C é a que apresenta resultados mais positivos.

Pela análise técnica das propostas em **3.5.2. Comparação técnica das propostas**, a proposta B foi a que apresentou uma melhor classificação. No entanto, economicamente, a proposta C é mais rentável do que a B. Dado que as propostas B e C são bastante semelhantes tecnicamente, concluiu-se qual seria a escolhida pelo VAL obtido para cada uma delas. Foram considerados os valores do VAL obtidos da análise efetuada com base no cenário 2 (**Tabela 12**), pois para o cenário 1 a proposta B não é viável.

Tabela 12 - Análise quantitativa às propostas B e C com base nas análises técnica e económica, para o cenário 2.

| Proposta | Classificação técnica | Cenário 2 - VAL |
|----------|-----------------------|-----------------|
| B | 1467 | 360 198 € |
| C | 1423 | 712 075 € |

Pelos resultados da **Tabela 12**, concluiu-se que a proposta do fornecedor C seria a escolhida para a implementação da unidade de secagem das lecitinas.

Considerando a hipótese de não se efetuar a purificação do óleo ou da miscela (por filtração ou clarificação), com o risco do teor de sólidos atingir o limiar da especificação final das lecitinas à saída do processo de secagem, mas ainda assim ser aceite pelo cliente, determinaram-se os indicadores económicos para os cenários 1 e 2 (sem clarificação do óleo) para a proposta C. Esta hipótese pode ser viável dado que a empresa tenciona instalar no extrator um filtro que removerá grande parte das partículas finas, contribuindo assim para a diminuição do teor de sólidos nas lecitinas. Os resultados encontram-se na **Tabela 13**.

Tabela 13 - Indicadores económicos para a proposta C, em cada um dos cenários sem incluir os custos envolvidos na clarificação do óleo.

| Proposta C sem clarificação | Cenário 1 | Cenário 2 |
|-----------------------------|-----------|-----------|
| VAL (€) | 993 393 | 1 373 406 |
| TIR (%) | 32 | 39 |
| PRI (ano) | 4 | 3 |

Portanto, considerando apenas a unidade de secagem, concluiu-se que, o período de recuperação do investimento é no máximo de 4 anos, a TIR é muito superior à taxa de atualização de 10,5% e o VAL bastante positivo. A rentabilidade e viabilidade do projeto de secagem são bastante mais favoráveis sem a filtração/clarificação do óleo ou miscela.

3.6.3. Análise de sensibilidade

Dado que a análise económica se baseou em certos pressupostos e resultou, também, de algumas parcelas estimadas, é muito importante contabilizar a incerteza e o risco associado ao projeto.

Assim, procedeu-se a uma análise de sensibilidade para avaliar o impacto da variação de determinadas variáveis fundamentais na análise económica nos indicadores económicos.

Neste caso, as variáveis de interesse que foram manipuladas para o estudo da sensibilidade deste projeto foram: o custo do investimento e o preço de venda das lecitinas.

O custo do investimento resultou das propostas dos fornecedores e da estimativa de algumas parcelas e, portanto, ainda pode sofrer alterações num estudo mais detalhado dos trabalhos a serem realizados para a implementação deste projeto, daí ser relevante analisar a sua variabilidade. O preço de venda das lecitinas depende de variáveis externas ao processo, por exemplo, da procura e oferta no mercado, devendo ser analisada a sua variação.

Desta forma, avaliou-se o impacto de cada variável individualmente, isto é, manipulou-se uma variável mantendo a outra fixa, e avaliou-se o impacto nos indicadores económicos VAL, TIR e PRI. Consideraram-se desvios positivos e negativos de 10%, 20% e 30% em cada variável.

Na **Figura 43**, encontra-se representada a sensibilidade do indicador económico PRI à variação de cada parâmetro em cada proposta e cenário. Em geral, o aumento do preço de venda das lecitinas e a diminuição do investimento diminuem o PRI. As variações que não estão representadas nos gráficos da **Figura 43**, apresentaram um PRI superior a 10 anos e por isso não foram assinaladas (propostas inviáveis).

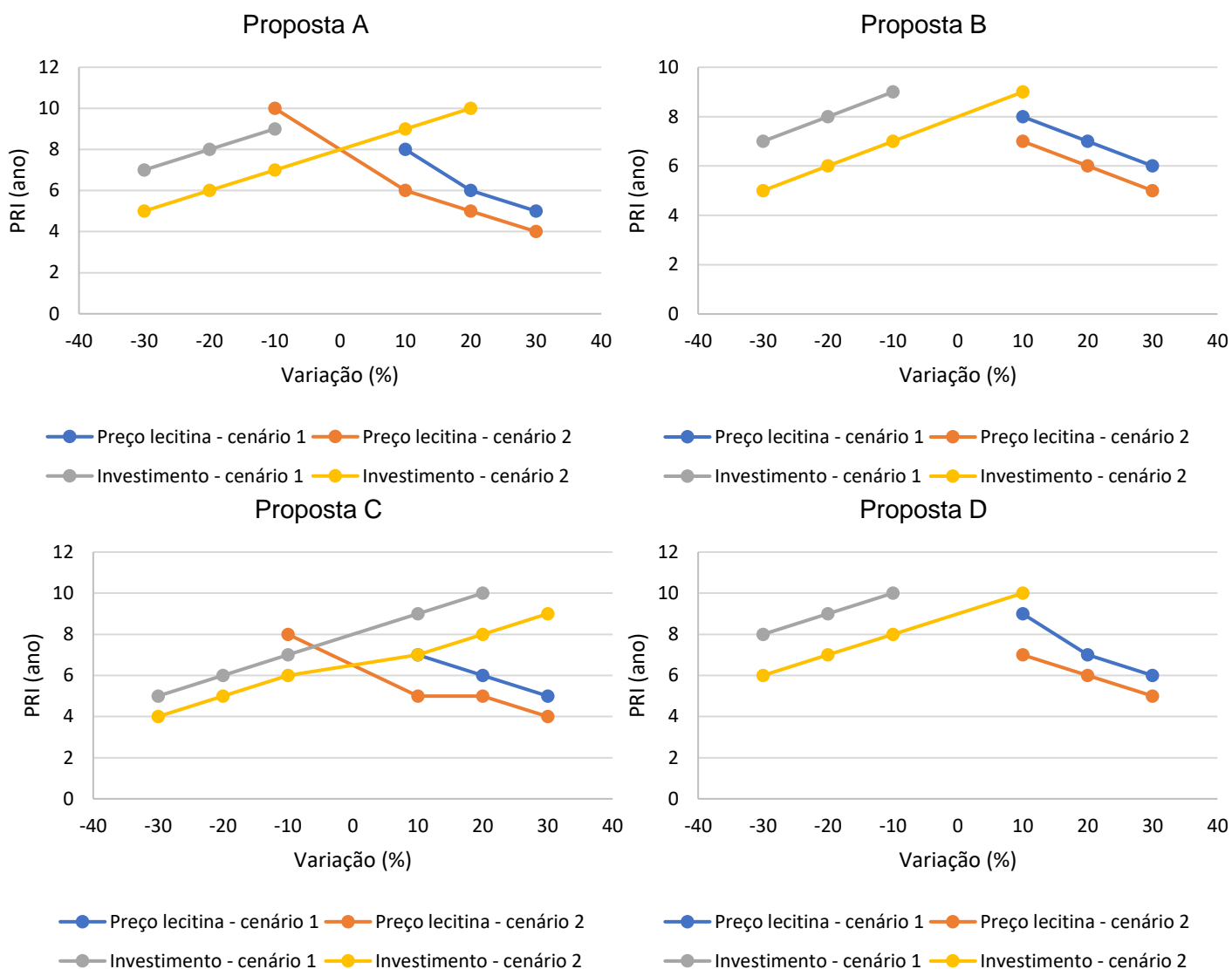


Figura 43 - Sensibilidade do indicador económico PRI à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas.

Na **Figura 44**, encontra-se representada a sensibilidade do indicador económico VAL à variação de cada parâmetro em cada proposta e cenário. Em geral, o aumento do preço de venda das lecitinas e a diminuição do investimento aumentam o VAL. As variações que não estão representadas nos gráficos da **Figura 44**, apresentaram um VAL negativo e por isso não foram assinaladas (propostas inviáveis).

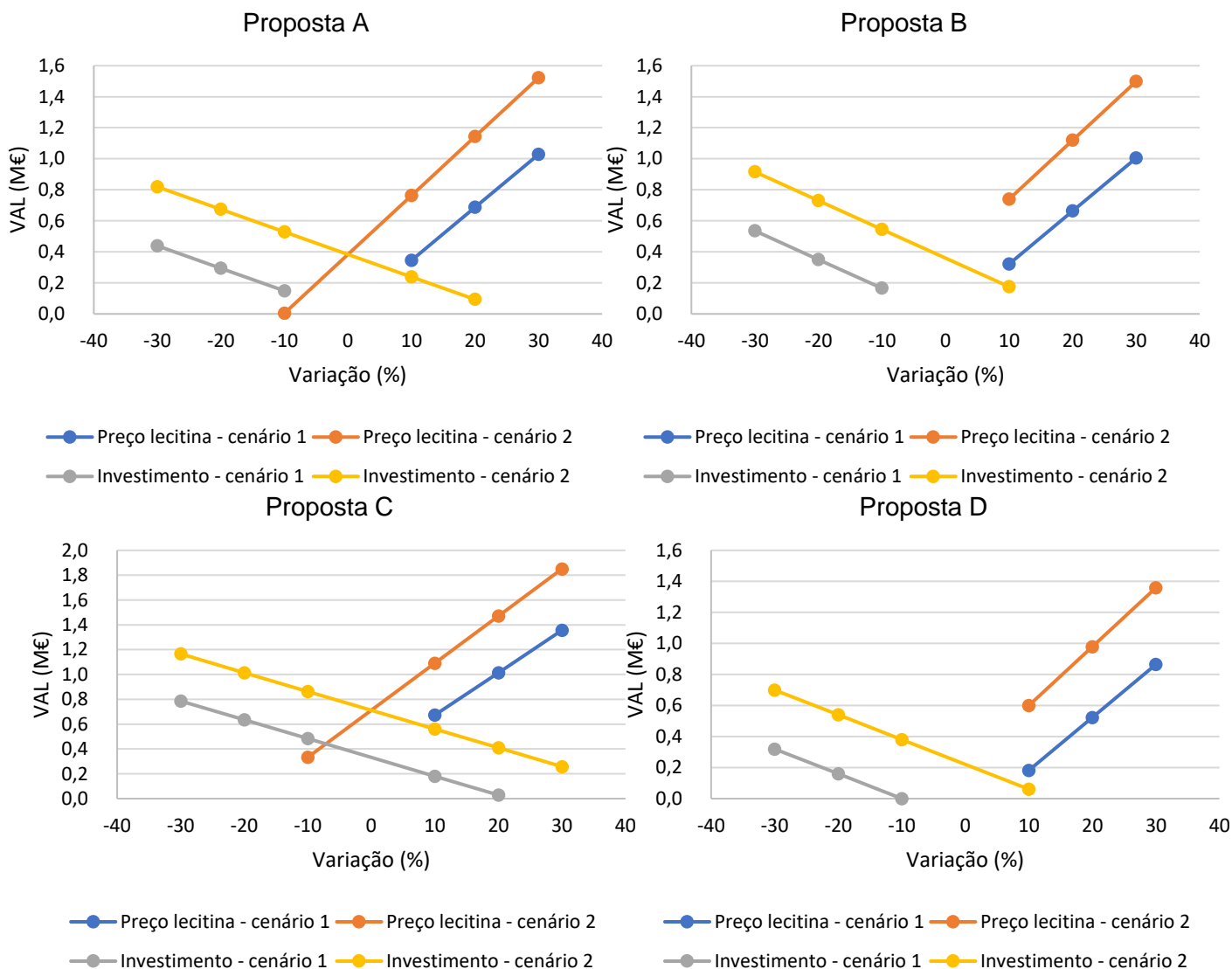


Figura 44 - Sensibilidade do indicador económico VAL à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas.

Na **Figura 45**, encontra-se representada a sensibilidade do indicador económico TIR à variação de cada parâmetro em cada proposta e cenário. Em geral, o aumento do preço de venda das lecitinas e a diminuição do investimento aumentam a TIR. As variações que não estão representadas nos gráficos da **Figura 45**, apresentaram uma TIR inferior à taxa de atualização, por isso não foram assinaladas (propostas inviáveis).

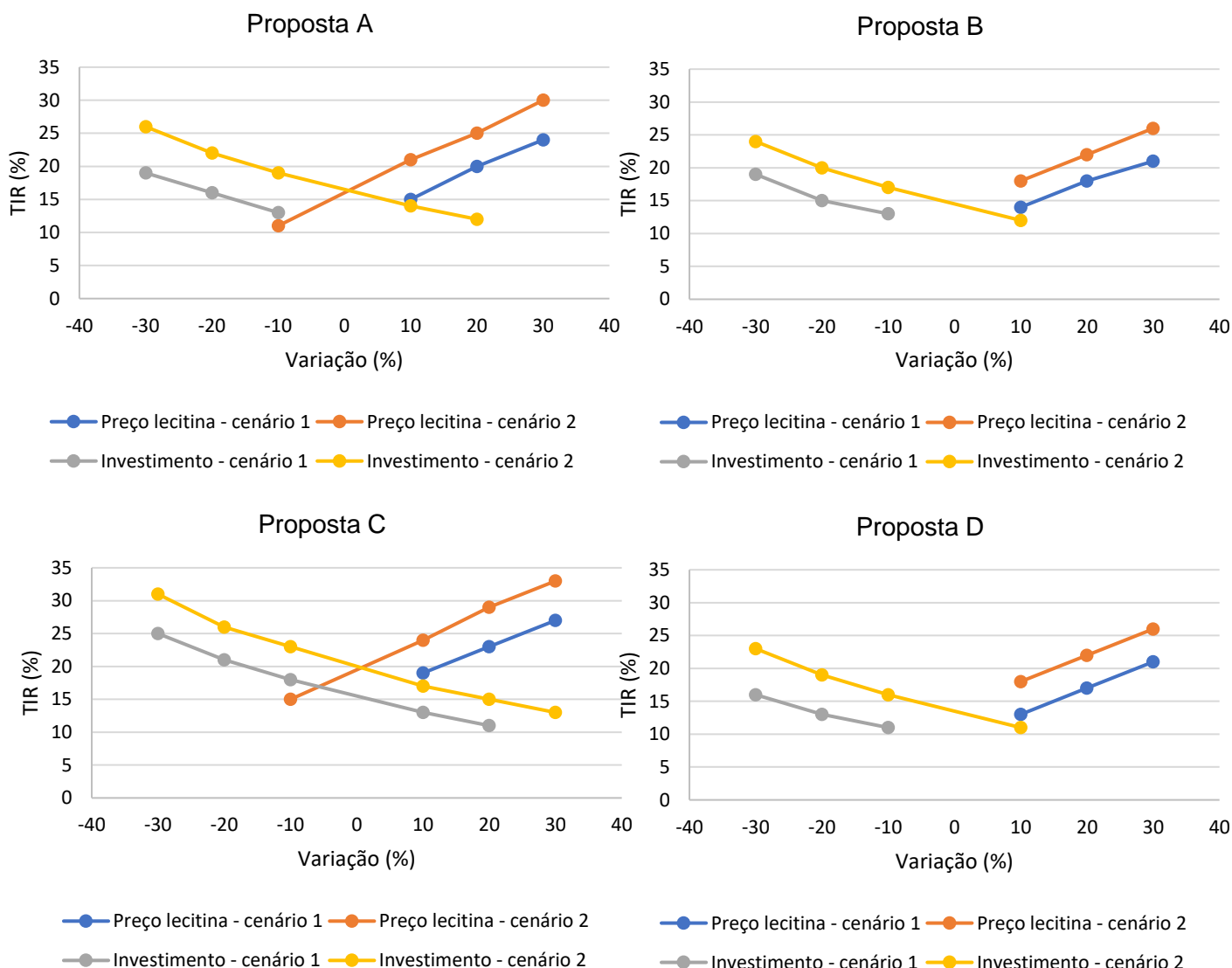


Figura 45 - Sensibilidade do indicador económico TIR à variação do preço de venda das lecitinas e do investimento, para cada um dos cenários e propostas.

Da análise dos gráficos anteriores, considerando o cenário 1, para as propostas B e D, qualquer aumento do preço de venda das lecitinas ou diminuição do investimento, tornaria o processo viável ($PRI < 10$). Para a proposta A, qualquer aumento do investimento ou diminuição do preço de venda das lecitinas, tornaria o projeto inviável a 10 anos. Para a proposta C qualquer diminuição do preço de venda das lecitinas, assim como um aumento do investimento a partir de 30%, tornaria o projeto inviável.

No cenário 2, para as propostas B e D, qualquer diminuição do preço de venda das lecitinas ou um aumento do investimento a partir de 20%, tornaria o projeto inviável. Para a proposta A, um aumento do investimento a partir de 30% ou uma diminuição do preço das lecitinas a partir de 20%, inviabilizaria o projeto. Para a proposta C, a diminuição do preço de venda das lecitinas a partir de 20%, tornaria o projeto inviável a 10 anos.

4. Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo principal o estudo técnico-económico da implementação de um processo de secagem de lecitinas numa unidade industrial. Atualmente, as lecitinas resultantes do processo de desgomagem do óleo, são adicionadas ao bagaço no DTS e vendidas juntamente com este, a um preço inferior ao preço de venda da lecitina bruta (após processo de secagem).

Estudaram-se as características e especificações das lecitinas, as suas aplicações e perspectivas de mercado. As lecitinas são um produto cada vez mais procurado devido aos seus benefícios e potenciais aplicações e por ser um produto de origem vegetal.

Com vista à produção de lecitinas *feed-grade* de boa qualidade e com as especificações do cliente, concluiu-se que o evaporador de filme fino é a tecnologia que melhor se adequa às características deste produto. As lecitinas após a desgomagem física apresentam um teor de água máximo de 50% e devem ser secas até um teor máximo de humidade de 1%.

Devido à elevada viscosidade e sensibilidade das lecitinas a altas temperaturas, a secagem tem de operar sob vácuo. No seguimento desta conclusão, estudaram-se em mais detalhe tipos de sistema de vácuo e após comparação das suas características concluiu-se que a bomba de vácuo de anel líquido será a melhor opção para a geração de vácuo neste processo.

Além do teor de humidade, existem outros parâmetros nas especificações dos clientes que devem ser respeitados, como é o caso do teor de impurezas sólidas. As lecitinas arrastam consigo ao longo do processo partículas sólidas que, se não forem removidas, comprometem a qualidade do produto final. Assim sendo, deve purificar-se o óleo ou a miscela a montante da desgomagem (e da secagem das lecitinas). Analisaram-se várias hipóteses e estudou-se detalhadamente a filtração e vários tipos de filtros, tendo-se concluído que a clarificação do óleo numa centrífuga “auto-limpante”, é a melhor hipótese para a remoção dos sólidos finos.

Com base na pesquisa efetuada sobre sistemas de vácuo e filtração, desenvolveram-se duas ferramentas em *Excel* de auxílio no dimensionamento de filtros (filtro de prensa, filtro de folhas, filtro de tambor rotativo, filtro de disco e filtro de esteira) e tipos de sistemas de vácuo (ejetores de vapor e bomba de vácuo de anel líquido).

Foram contactados fornecedores especializados neste tipo de processos e recebidas quatro propostas, duas das quais contemplando a remoção dos sólidos. Elaborou-se uma *checklist* que englobou trabalhos de instalação elétrica, trabalhos civis, tubagens, armazenamento, reparação de terreno na zona de carga, controlo e instrumentação, entre outros pontos importantes.

Após o estudo da viabilidade técnica das propostas recebidas (com base em vários critérios), concluiu-se que a proposta do fornecedor B é a mais adequada para o propósito a que se destina. Esta proposta inclui um evaporador de filme fino a operar na horizontal com um sistema de vácuo do tipo bomba de vácuo de anel líquido. No entanto, este fornecedor não enviou uma proposta da filtração e/ou clarificação para remoção dos sólidos.

Relativamente à expedição do produto, efetuou-se uma análise de risco ao embalamento em bidons, *flexitanks/flexibags* e transporte em cisternas. Concluiu-se que as cisternas acarretam menos riscos, são mais seguras e envolvem menos tempo e mão-de-obra no seu enchimento.

Para o estudo da viabilidade económica, definiram-se dois cenários, o primeiro em que se considerou que tanto a soja como a colza processadas na unidade fabril são OGM; o segundo em que se considerou soja OGM e semente de colza não OGM.

Da análise económica, para 10 anos de vida útil do projeto, no cenário 1, as propostas do fornecedores B e D são economicamente inviáveis, sendo a proposta do fornecedor C a mais viável com os seguintes indicadores económicos, VAL de 332 062 €, TIR de 15% e PRI de 8 anos. Para o cenário 2, todas as propostas são viáveis economicamente (ainda que a longo prazo) e, novamente, a proposta C é a mais viável, com um VAL de 712 075 €, TIR de 20% e PRI de 6 anos.

Pela comparação das propostas B, com a melhor classificação na análise técnica, e C, mais viável economicamente, concluiu-se que a proposta C seria a escolhida para a implementação do processo de secagem das lecitinas.

Considerou-se ainda a hipótese de implementação da proposta C sem contabilização dos custos relativos à clarificação, tendo resultado um VAL de 993 393 €, TIR de 32% e PRI de 4 anos para o cenário 1 e um VAL de 1 373 406 €, TIR de 39% e PRI de 3% para o cenário 2.

Realizou-se ainda uma análise de sensibilidade aos indicadores económicos com variação de parâmetros críticos (custo de investimento e preço de venda das lecitinas), tendo-se concluído que o projeto apresenta algum risco.

5. Trabalho futuro

No seguimento do trabalho desenvolvido, propõe-se que no futuro se analisem algumas questões no processo de secagem das lecitinas e ao processo já instalado na unidade industrial.

A primeira questão prende-se com o armazenamento e carga das lecitinas após a secagem. Os tanques de armazenamento serão instalados num local onde já existem outros, mas esta zona não está preparada para o acesso e carga dos camiões cisterna, assim como para o embalamento em bidons. Apesar de as lecitinas serem um produto de elevada viscosidade e em caso de derrame ser possível a sua limpeza antes que esta atinja os sumidouros pluviais, propõe-se que se analise a hipótese de construir uma barreira de cimento (tipo bacia de retenção) na zona onde será efetuado o enchimento do camião cisterna ou o embalamento das lecitinas.

A segunda questão relaciona-se com a remoção dos sólidos. Nesta dissertação estudaram-se várias hipóteses, concluindo-se que a clarificação do óleo antes da desgomagem é a melhor opção, seguida da clarificação da miscela (com a segunda maior classificação), a qual apresenta riscos devido à presença do hexano. Esta questão deve ser reavaliada com maior detalhe e de uma forma quantitativa, dado que foi efetuada apenas uma análise qualitativa (em **3.2. Filtração/clarificação da miscela e/ou do óleo**). Deve ser quantificada a perda de óleo para o bagaço no caso da clarificação comparativamente com a filtração da miscela (que tem a vantagem de recircular os sólidos ao extrator), para determinar a melhor escolha.

Todo o trabalho foi desenvolvido com vista à produção e venda de lecitinas *feed-grade*. No entanto, um dos fornecedores contactados disponibilizou o custo de investimento para lecitinas *food-grade*, sendo cerca de 20% superior ao investimento para *feed-grade*. Assim, seria importante obter o preço de venda das lecitinas *food-grade*, para se concluir se esta opção compensaria.

Na análise de sensibilidade (em **3.6.3. Análise de sensibilidade**) não foi considerada a influência dos caudais de grão de soja e semente de colza processados (e, conseqüentemente, os caudais de lecitinas produzidas) na rentabilidade do projeto. No entanto, deveria ser analisado até que ponto e como será possível aumentar a capacidade de produção das lecitinas, dado que quanto maior for a produção anual de lecitinas, menor será o PRI da secagem.

Quanto ao processo já instalado nesta unidade industrial, propõe-se considerar futuramente a substituição das centrífugas de desgomagem por centrífugas “auto-limpantes” para facilitar a operação e manutenção, diminuir os períodos de paragem e supervisão dos operadores.

6. Referências Bibliográficas

- 911 Metallurgist. (2018). Ceramic Vacuum Disk Filter. Obtido 25 de Julho de 2018, de <https://www.911metallurgist.com/equipment/vacuum-disk-filter/>
- Advantages of Liquid Ring Vacuum Pumps for Industrial Users. (2017). Obtido 15 de Maio de 2018, de <https://www.pfspumps.com/advantages-of-liquid-ring-vacuum-pumps-for-industrial-users/>
- Al-Kahtani, H. A. M., Hanna, M. A., & Handel, A. P. (1984). Effect of water quality on degumming and stability of soybean oil. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 61, 94–97. <https://doi.org/10.1007/BF02672054>
- Aliasso, J. (1999). Choose the Right Vacuum Pump. *Chemical Engineering*.
- Alves, Sebastião; Alves, A. M. (2014). *Folhas da disciplina de Dimensionamento de Equipamento*.
- AOCS. (2018). AOCS Your Global Fats and Oils Connection - Methods. Obtido 28 de Março de 2018, de <https://www.aocs.org/attain-lab-services/methods>
- Birgenheler, D. B., Butzbach, T. L., Bolt, D. E., Bhatnagar, R. K., Ojala, R. E., & Aglitz, J. (1993). Designing steam-jet vacuum systems. *Chemical Engineering*, 100, 116–121.
- Braverman, V. (1990). *A&G - LIBRO 10º ANIVERSARIO - Recopilación de Artículos Técnicos (1 a 41)*. República Argentina: Asociación Argentina de Grasas y Aceites.
- Carlsson, A. S., Clayton, D., Salentijn, E., & Toonem, M. (2007). *Oil crop platforms for industrial uses*. York, UK: CPL Press.
- ChemDist Process Solutions. (2018). Evaporation Technology.
- Coulson, J. M., & Richardson, J. F. (2002). *Chemical Engineering (Fifth Edit, Vol. 2)*. B.
- Coulson, J. M., Richardson, J. F., & Sinnott, R. K. (2005). *Chemical Engineering Design (4th editio)*. Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Dorsa, R. (2004). *Tecnologia de Óleos Vegetais (1ª edição)*. Campinas: Editora Ideal.
- Elsevier. (1999). Basic principles of vacuum pump selection and operation. *World Pumps*, 1999(397), 26–29. [https://doi.org/10.1016/S0262-1762\(99\)81401-1](https://doi.org/10.1016/S0262-1762(99)81401-1)
- Engineers, A. S. of P. (2012). Vacuum systems. *Read, Learn, Earn*.
- Erickson, D. R. (1995). *Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*. (D. R. Erickson, Ed.). AOCS - American Oil Chemists' Society; USB - United Soybean Board.
- Fani, M. (2016). Lecitina: Emulsionante e Lubrificante. *Aditivos & Ingredientes*, 34–39.
- Festo. (2012). Brief overview and basic principles of vacuum technology. *Whitepaper*.
- Fillho, Cesar de Araujo Góss; Leitis, G. A. (2013). Revista O Papel. *Sistema de Vácuo na Secção de Formação da Folha de Papel*, 57–61.
- Forced Circulation Evaporator. (2018). Obtido 17 de Julho de 2018, de

<https://www.gea.com/en/products/forced-circulation-evaporator.jsp>

- França, S. C. A., Santos, S. F., & Lima, S. R. M. (2007). Ensaio para medidas de cor em colorímetros Livibond e ASTM. *Tratamento de minérios: práticas laboratoriais*, 1, 543–557.
- Glover, W. B. (2004). Selecting evaporators for process applications. *Chemical Engineering Progress*, 100, 26–33.
- Gunstone, F. D., Harwood, J. L., & Dijkstra, A. J. (2007). *The Lipid Handbook* (Third Edit). CRC Press.
- Harten, B. (2018). *Best Practice of High-Quality Lecithin Production . From Miscella-Clarification to Lecithin-Powder*.
- Horizontal Thin Film Dryer - Buss-SMS-Canzler GmbH. (2018). Obtido 20 de Junho de 2018, de <https://www.sms-vt.com/technologies/drying-technology/horizontal-thin-film-dryer/>
- Horizontal Thin Film Dryer | GIG Karasek USA. (2018). Obtido 21 de Junho de 2018, de <http://www.gigkarasekusa.com/horizontal-thin-film-dryer/>
- Jet-vac technologies. (2018). Process Vacuum Pump Systems | JET-VAC® Technologies. Obtido 30 de Agosto de 2018, de <https://www.jetvactechnologies.com/product/vacuum-systems/>
- Lambourne, D., Covey, G. H., Chai, E., & Dunstan, D. (1999). Lecithin gum rheology and processing implications. *JAOCS, Journal of the American Oil Chemists' Society*, 76(1), 67–72. <https://doi.org/10.1007/s11746-999-0049-8>
- Lopez-Toledo, J. (2006). *Heat and Mass Transfer Characteristics of a Wiped Film Evaporator*.
- Ludwig, E. E. (1999). *Applied Process Design For Chemical and Petrochemical Plants* (Third Edit, Vol. 1). Butterworth-Heinemann.
- Maloney, J. O. (2008). *Perry's Chemical Engineers' Handbook* (8th Editio). McGraw-Hill. <https://doi.org/10.1036/0071511245>
- Mandarino, J. M. G., & Roessing, A. C. (2001). Tecnologia para Produção de Óleo de Soja: Descrição das Etapas, Equipamentos, Produtos e Subprodutos. *Embrapa, Londrina, PR*, 100. <https://doi.org/ISSN 1516-781X>
- McCabe, L. W., Harriott, P., & Smith, J. C. (1993). *Unit operations of chemical engineering* (5th editio). McGRAW- HILL International Editions - Chemical and Petroleum Engineering Series. [https://doi.org/10.1016/0009-2509\(57\)85034-9](https://doi.org/10.1016/0009-2509(57)85034-9)
- Moerman, F., & Desanghere, N. (2011, Junho). Water ring pumps a better solution for your wet vacuum process? *Pumps & Process Magazine*, 23–25.
- Moretto, E., & Fett, R. (1998). *Tecnologia de óleos e gorduras vegetais na indústria de alimentos*. São Paulo: Varela.
- Nutsche Filter. (2018). Obtido 6 de Junho de 2018, de <http://www.solidliquid-separation.com/pressurefilters/nutsche/nutsche.htm>
- Ozdikicierler, O., & Gumuskesen, A. S. (2018). Production and Refining of Soy Lecithin.

- Portantiolo, C. S. (2009). *Lecitina de soja*.
- Research, G. V. (2017a). Lecithin Market Size & Share | Global Industry Trends Report 2018-2025. Obtido 22 de Março de 2018, de <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/lecithin-market>
- Research, G. V. (2017b). Lecithin Market Size Worth \$1.49 Billion By 2025 | CAGR: 6.2%. Obtido 22 de Março de 2018, de <https://www.grandviewresearch.com/press-release/global-lecithin-market>
- Reynolds, C. (2014). Vacuum Systems. Obtido de <http://croll.com/products-2/vacuum-systems-2/ejector-theory/>
- RheoHeat - Scraped surface heat exchanger. (2018). Obtido 28 de Agosto de 2018, de http://www.rheoheat.se/b17_heat.html
- Shahidi, F., & Zhong, Y. (2005). *Bailey's Industrial Oil and Fat Products. Volume 2. Edible Oil and Fat Products: Edible Oils*. <https://doi.org/10.1002/047167849X>
- Sousa Nilo, R. N. (2016). Lecitina de soja é aliada do cérebro e controla o colesterol | Minha Vida. Obtido 21 de Março de 2018, de <https://www.minhavidacom.br/alimentacao/materias/20789-lecitina-de-soja-e-aliada-do-cerebro-e-controla-o-colesterol>
- SPX Corporation. (2008). Evaporator Handbook.
- Szuhaj, B. F. (1983). Lecithin production and utilization. *Journal of the American Oil Chemists' Society*, 60(2), 306–309. <https://doi.org/10.1007/BF02543508>
- Technoforce. (2018). *Product Catalogue*. <https://doi.org/10.15713/ins.mmj.3>
- Telles Moraes, P. (2015). Degomagem. Obtido 14 de Março de 2018, de <https://pt.slideshare.net/PauloTellesMoraes/degomagem>
- Thin Film / Wiped Film Evaporator | LCI Corporation. (2018). Obtido 20 de Junho de 2018, de https://lcicorp.com/thin_film_evaporation/thin_film_wiped_film_evaporator
- Thin Film Drying Plants | GIG Karasek USA. (2018). Obtido 21 de Junho de 2018, de <http://www.gigkarasekusa.com/thin-film-drying-plants/>
- Trocador de calor de superfície raspada. (2018). Obtido 9 de Agosto de 2018, de <https://www.tetrapak.com/pt/processing/heat-exchangers/contherm>
- Trocadores de calor de superfície raspada NEAEN VarioT - Thermal food processing equipment. (2018). Obtido 9 de Agosto de 2018, de <http://neaen.com/pt-br/equipamento-auxiliar/trocadores-de-calor-de-superficie-raspada-neaen-variot.html>
- Vallo, C. (2018). OMEL – Como funciona uma Bomba de Vácuo de Anel Líquido. Obtido 6 de Outubro de 2018, de <http://www.omel.com.br/artigos-tecnicos/escola-de-bombas/bombas-de-vacu-de-anel-liquido/como-funciona-uma-bomba-de-vacu-de-anel-liquido/>
- van Nieuwenhyzen, W. (2014). The changing world of lecithins. *Inform*, 25(4), 253–259. Obtido de [http://www.ilps.org/files/Download/Forms/The Changing World of Lecithins -INFORM 4-2014.pdf](http://www.ilps.org/files/Download/Forms/The%20Changing%20World%20of%20Lecithins%20-%20INFORM%204-2014.pdf)

Vertical Leaf Filter. (2018). Obtido 6 de Junho de 2018, de <http://www.solidliquid-separation.com/pressurefilters/verticalleaf/verticalleaf.htm>

Waszczynskyj, N. (2018). Lecitina (pp. 41–51).