

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

FERNANDA MANICHI

**ANÁLISE DO PROJETO DE SEPARADORES DE ARRASTE EXTERNOS À
COZEDORES A VÁCUO EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS**

FRANCISCO BELTRÃO

2018

FERNANDA MANICHI

**ANÁLISE DO PROJETO DE SEPARADORES DE ARRASTE EXTERNOS À
COZEDORES A VÁCUO EM USINAS SUCROALCOOLEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado à disciplina de Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química do Departamento Acadêmico de Engenharia Química - DAENQ - da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.
Orientadora: Prof.^a Dr.^a Larissa Maria Gatti Fernandes

FRANCISCO BELTRÃO

2018



TERMO DE APROVAÇÃO
Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2

**Análise do Projeto de Separadores de Arraste Externos à Cozedores a Vácuo
em Usinas Sucroalcooleiras**

por

Fernanda Manichi

Trabalho de Conclusão de Curso 2 apresentado às 11:00 horas, do dia 13 de junho de 2018, como requisito para aprovação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso 2, do Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. O candidato foi arguido pela Banca Avaliadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Avaliadora considerou o trabalho _____.

Banca Avaliadora:

André Zuber
Coordenador(a) do Curso

Larissa Maria Gatti Fernandes
Professor(a) Orientador(a)

Vilmar Steffen
Membro da Banca

Ana Paula Romio
Membro da Banca

Michele Di Domenico
Professora do TCC2

“O termo de aprovação assinado encontra-se na coordenação do curso”.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha mãe Rosane Aparecida Cegatti do Nascimento Manichi por todo o suporte, que sempre me incentivou a estudar e a buscar uma vida melhor e, me apoiou em todos os momentos e decisões ao longo desses cinco anos.

Agradeço também a Professora Orientadora Doutora Larissa Maria Gatti Fernandes por ter aceitado, dedicado e auxiliado na elaboração deste trabalho. Pelo suporte técnico-científico, por suas correções e por se mostrar não apenas como uma docente, mas também como amiga. Também agradeço ao Professor Doutor Marcel Joly, professor responsável pelo Trabalho de Conclusão de Curso 1 na época, que ajudou muito na elaboração deste trabalho com suas dicas e conselhos.

A Usina em estudo, por me possibilitar uma visita para o conhecimento do processo e que eu desenvolvesse meu Trabalho de Conclusão de Curso baseado em seus dados. Pela ajuda nas dúvidas que surgiram durante o desenvolvimento do projeto e pela transmissão de experiência e conhecimento que cresceram em minha vida acadêmica e profissional.

A Universidade Tecnológica Federal do Paraná – Campus Francisco Beltrão, professores, servidores e comunidade acadêmica pela oportunidade de capacitar-me, e por permitir-me realizar um curso de graduação com excelência.

Agradeço de modo geral a todas as pessoas que contribuíram para minha formação, professores, colegas, amigos, entre outras pessoas que fizeram e continuarão fazendo parte da minha vida.

RESUMO

MANICHI, Fernanda. Análise do Projeto de Separadores de Arraste Externos à Cozedores a Vácuo em Usinas Sucroalcooleiras. 2018. 61 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso Superior de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Francisco Beltrão. Francisco Beltrão, 2018.

Este trabalho consiste em analisar a eficiência e a perda de carga de um separador de arraste de placa com dados reais de uma Usina Sucroalcooleira pela metodologia dos autores Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011). Os resultados obtidos foram 0,9871 para a eficiência e 326,4301 Pa para a perda de carga. Estes foram ótimos resultados, pois a eficiência foi bem próxima de 1 e a perda de carga próxima do esperado pelo fabricante. Estes parâmetros também foram estudados variando alguns dados geométricos, como o espaçamento, número de curvatura e o ângulo dessas curvaturas, para analisar o comportamento destes, ou seja, o que cada um desses dados influencia na eficiência e na perda de carga do equipamento. Logo, obteve-se que com o aumento do espaçamento entre as placas, conseqüentemente houve uma diminuição da perda de carga e também da eficiência de remoção das gotículas. Em relação à variação do ângulo de curvatura, observou-se que com o seu aumento houve uma melhora na eficiência, porém, aumentou também a perda de carga. E, para as variações do número de curvaturas obteve-se que quanto mais curvaturas houver nas placas, melhor será a eficiência, entretanto, aumentará também a perda de carga. Uma análise econômico-financeira para este estudo também foi realizada, analisando três decisões de investimento, o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR) e o período *Payback* descontado. A partir destes dados, pode-se concluir que o projeto é economicamente viável e seguro, pois o tempo de retorno do seu investimento é relativamente curto, o qual diminui também a probabilidade de riscos para a Usina nesse período.

Palavras-chave: Usina Sucroalcooleira. Separador de arraste. Eficiência. Econômico-financeira.

ABSTRAT

MANICHI, Fernanda. Analysis of the Design of External Mist Eliminators to Vacuum Evaporators in Sugar and Alcohol Factory. 2018. 61 f. Monograph (Project Course Conclusion) - Graduation in Chemical Engineering, Federal University of Technology - Paraná, Campus Francisco Beltrão. Francisco Beltrão, 2018.

This Project consists of analyzing the efficiency and pressure loss of a wave-plate mist eliminator with real data from a Sugar and Alcohol Factory by the methodology of the authors Banitabaei, Rahimzadeh and Rafee (2011). The results obtained were 0.9871 for the efficiency and 326.4301 Pa for the pressure loss. These were excellent results, because the efficiency was close to 1 and the pressure loss close to that expected by the manufacturer. These parameters were also studied by varying some geometric data, such as spacing, bending number and the angle of these curvatures to analyze their behavior, that is, what each one these influence on the efficiency and the pressure loss of the equipment. Therefore, it was found that with increasing spacing between the plates therefore there was a decrease in pressure loss and also the droplet removal efficiency. In relation to the variation of the angle of curvature, it was observed that with its increase there was an improvement in efficiency, but also the loss of pressure increased. And, for the variations in the number of curvatures, it has been obtained that the more curvatures on the plates, the better the efficiency, however, the pressure loss will also increase. An economic-financial analysis for this study was also performed by analyzing three investment decisions, the Net Present Value (NPV), the Internal Rate of Return (IRR) and the discounted Payback period. From these data, it can be concluded that the project is economically viable and safe, because the time of return of its investment is relatively short, which also decreases the probability of risks to the Factory in that period.

Keywords: Sugar and Alcohol Factory. Mist eliminator. Efficiency. Economic-financial.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Separador de arraste externo	14
Figura 2 - Fluxograma da produção de açúcar e etanol de cana	16
Figura 3 - Descrição de um cozedor a vácuo convencional	19
Figura 4 - Esboço do condensador multijato	21
Figura 5 - Separador de fluxo reverso	22
Figura 6 - Separador centrífugo	23
Figura 7 - Separador de arraste tipo malha de arame.....	24
Figura 8 - Geometria de placas chevron para separadores	25
Figura 9 - Diagrama geométrico de um separador de arraste de placa	25
Figura 10 - Volume de controle do separador de arraste em estudo	32
Figura 11 - Placas de um separador de arraste com canais de drenagem	36
Figura 12 - Fluxograma do retorno do investimento gerado pelo equipamento	38
Figura 13 - Relação entre o espaçamento das placas e a eficiência de coleta.	41
Figura 14 - Relação entre o coeficiente total de perda de carga e o espaçamento das placas.....	42
Figura 15 - Relação entre o ângulo de curvatura e a eficiência de coleta.....	43
Figura 16 - Relação entre o número de curvaturas e o coeficiente total de perda de carga.	44
Figura 17 - Relação entre a eficiência de coleta e o número de curvaturas.....	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características de projeto do Separador de Arraste para Cozedores - 800 hl massas A, A/B e B.....	32
Tabela 2- Orçamento dos módulos dos separadores de arraste.....	37
Tabela 3 - Parâmetros obtidos para o cálculo da eficiência.	39
Tabela 4 - Fluxos de caixa do investimento	45
Tabela 5 – Critérios técnico-econômico	46

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 OBJETIVOS	14
2.1 OBJETIVO GERAL	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
3.1 FUNCIONAMENTO DA USINA SUCROALCOOLEIRA	15
3.2 DIFERENÇAS DA ETAPA DE EVAPORAÇÃO E COZIMENTO	18
3.3 COZEDORES A VÁCUO.....	18
3.4 CONDENSADORES MULTIJATO	20
3.5 SEPARAÇÃO DE ARRASTE	21
3.5.1 Tipos de Separadores de Arraste.....	22
3.5.1.1 Separadores de Fluxo Reverso.....	22
3.5.1.2 Separadores Centrífugos	22
3.5.1.3 Separador de Malha de Arame	23
3.5.1.4 Separadores de Placa Chevron	24
3.6 METODOLOGIA SUGERIDA.....	25
3.7 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA	28
3.7.1 Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna De Retorno (TIR)	28
3.7.2 Período de Recuperação de Capital	29
4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS	31
4.1 ANÁLISE DOS DADOS.....	31
4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO	33
4.2.1 Desenvolvimento Metodológico.....	33
4.3 ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	39
5.1 RESULTADOS OBTIDOS PELA METODOLOGIA	39

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA.....	45
6 CONCLUSÃO	47
7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	49
REFERÊNCIAS.....	50
ANEXO A – EFICIÊNCIA E PERDA DE CARGA.....	54
ANEXO B – EFICIÊNCIA <i>VERSUS</i> ESPAÇAMENTO	55
ANEXO C – EFICIÊNCIA <i>VERSUS</i> ÂNGULO.....	56
ANEXO D – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA <i>VERSUS</i> CURVATURA	57
ANEXO E – PERDA DE CARGA <i>VERSUS</i> ESPAÇAMENTO	58
ANEXO F – EFICIÊNCIA <i>VERSUS</i> CURVATURAS	59
ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA-FINANCEIRA.....	60

1 INTRODUÇÃO

A cana-de-açúcar é uma gramínea oriunda das regiões temperadas quentes e tropicais da Ásia e que hoje é cultivada em vários países tropicais e subtropicais (MACHADO, 2014). Sua produtividade varia de uma área para outra, dependendo da variedade da cana, fatores climáticos, disponibilidade de água, práticas de cultivo e da duração do ciclo da cultura, podendo variar de 50t/ha em condições desfavoráveis e de 200t/ha em condições favoráveis. Dela extrai-se a sacarose, produto básico para a produção de açúcar e etanol, com um rendimento variando de 5 a 25t/ha. Com o seu bagaço pode-se também produzir energia. (REIN, 2013).

A cultura da cana-de-açúcar faz parte da história do Brasil. Apesar dos ciclos econômicos do pau-brasil, ouro e café, a cana sempre teve destaque no cenário econômico brasileiro (BARBOSA et al., 2011). Essa cultura desenvolveu-se gradativamente modificando o cenário econômico nacional, o que propiciou elevados lucros com a exportação realizada dos produtos oriundos da cana, tanto para a metrópole portuguesa, como também para a economia brasileira, quando esta deixou de ser colônia (MILANEZ et al, 2010 apud ARAUJO; SANTOS, [201-]). Após o Império, o Brasil perdeu posições na produção mundial de açúcar com o destaque do aumento da produtividade desses cultivares nas ilhas do Caribe e nas Antilhas, mas após a Segunda Guerra Mundial, o Brasil volta a direcionar sua produção para a cana-de-açúcar. A possibilidade do Brasil se inserir no mercado internacional, fez com que o governo interviesse na situação agrária, redefinindo a produção nacional (ZANZARINI et al., 2008).

Durante muito tempo no Brasil, a cana era cultivada com ênfase para a produção de açúcar, porém essa situação se alterou na segunda metade do Século XX com o preço do açúcar caindo no mercado internacional e com o interesse do governo federal em diminuir as importações de petróleo. Com isso, a produção do etanol passa a ser estimulada e em 1975 foi criado o Pró Etanol, programa fundado para suprir o país com um combustível alternativo e menos poluente que os derivados do petróleo (BIODIESEL, 2010). O Pró Etanol começou a perder força no início da década de 1990, visto que os preços do petróleo sofriam fortes alterações, tornando o etanol um combustível pouco rentável e então, em 1995 o programa foi desativado

(MAPA, 2008). Porém, nos últimos anos a cana-de-açúcar volta a fazer parte do cenário econômico do país, pois as atenções para os biocombustíveis voltam, em especial para o etanol de cana-de-açúcar, sendo necessário aumentar a produção de cana (BARBOSA et al., 2011).

O plantio da cana-de-açúcar ampliou-se para além das áreas tradicionais, espalhando-se pelos cerrados e também pelo Centro-Oeste mineiro, com um crescimento de 51% entre 2006 e 2007 (FAEMG, 2008). O setor sucroalcooleiro faz do Brasil o único país do mundo a implantar em larga escala um combustível alternativo ao petróleo, sendo o maior produtor mundial de açúcar (MAPA, 2009). O Brasil além de maior produtor de cana é também o maior exportador de açúcar, e segundo a CONAB (Companhia Nacional de Abastecimento), em 2017, a produção de cana no país chegou a 694 milhões de toneladas.

A conjuntura dos preços no mercado mundial do açúcar estarem baixos e concomitantemente a alta dos custos de produção, acarreta uma significativa diminuição na margem operacional no setor sucroenergético. Uma alternativa para mitigar esta situação é a diminuição das perdas no processo industrial com aumentos de eficiências e conseqüentemente, quantidades maiores dos produtos acabados (açúcar e etanol).

Um ponto de perda no processo industrial é no setor de cozimento, onde ocorre arraste de açúcares nos cozedores à vácuo. Uma forma de diminuir este problema é a instalação de separadores de arraste para separar a fase líquida do fluxo de vapor, os quais são baseados em interações no balanço entre as forças de arraste e gravitacional, e podem ser instalados internamente no topo do vaso, na linha de vapor de um vaso para o seguinte ou ainda, no condensador (REIN, 2013). Um sistema que utiliza um separador de arraste interno e também um externo consegue diminuir ainda mais as perdas do produto (açúcar).

Os separadores de arraste fazem o uso de um ou mais mecanismos de separação, sendo eles a gravidade, força centrífuga, mudança de direção, interceptação e coalescência e impacto inercial. Os dispositivos de uso comum são os separadores de fluxo reverso, separadores centrífugos, separadores de malha de arame e os separadores de placa Chevron (REIN, 2013).

O dispositivo de estudo nesse trabalho foi o separador de arraste do tipo placa Chevron de fluxo horizontal, estudando a viabilidade da sua implantação em vasos entre os cozedores a vácuo e os condensadores e também, analisando o

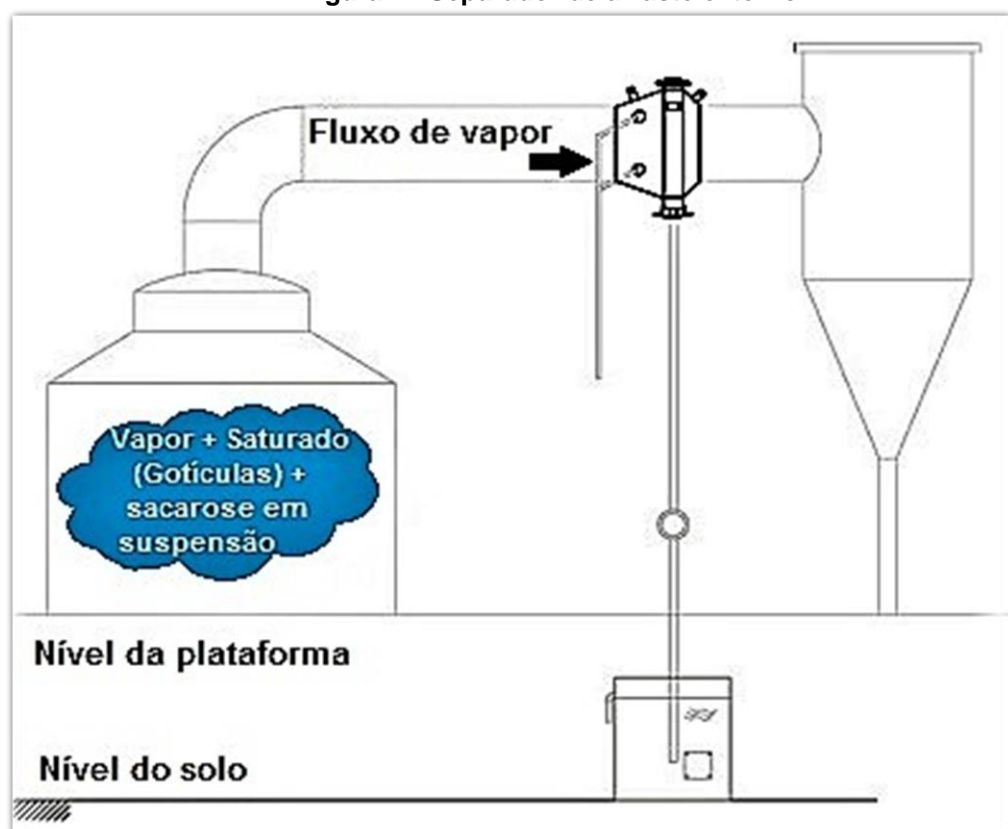
comportamento da corrente de vapor que sai desses cozedores e que foi arrastada para os devidos equipamentos, recuperando a sacarose.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a implantação de separadores de arraste externamente em cozedores a vácuo (na linha de vapor entre o cozedor e o multijato, como mostra a Figura 1) e analisar sua viabilidade financeira.

Figura 1 - Separador de arraste externo



Fonte: Adaptado de Lopes (2017).

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Calcular a eficiência e a perda de carga do separador de arraste através dos dados fornecidos pela Usina;
- Analisar, por meio de critérios de análises econômico-financeira (TIR, VPL e *Payback*), a viabilidade da implantação de três módulos de separadores de arraste para cozedores de capacidade de 800 hl (hectolitro).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

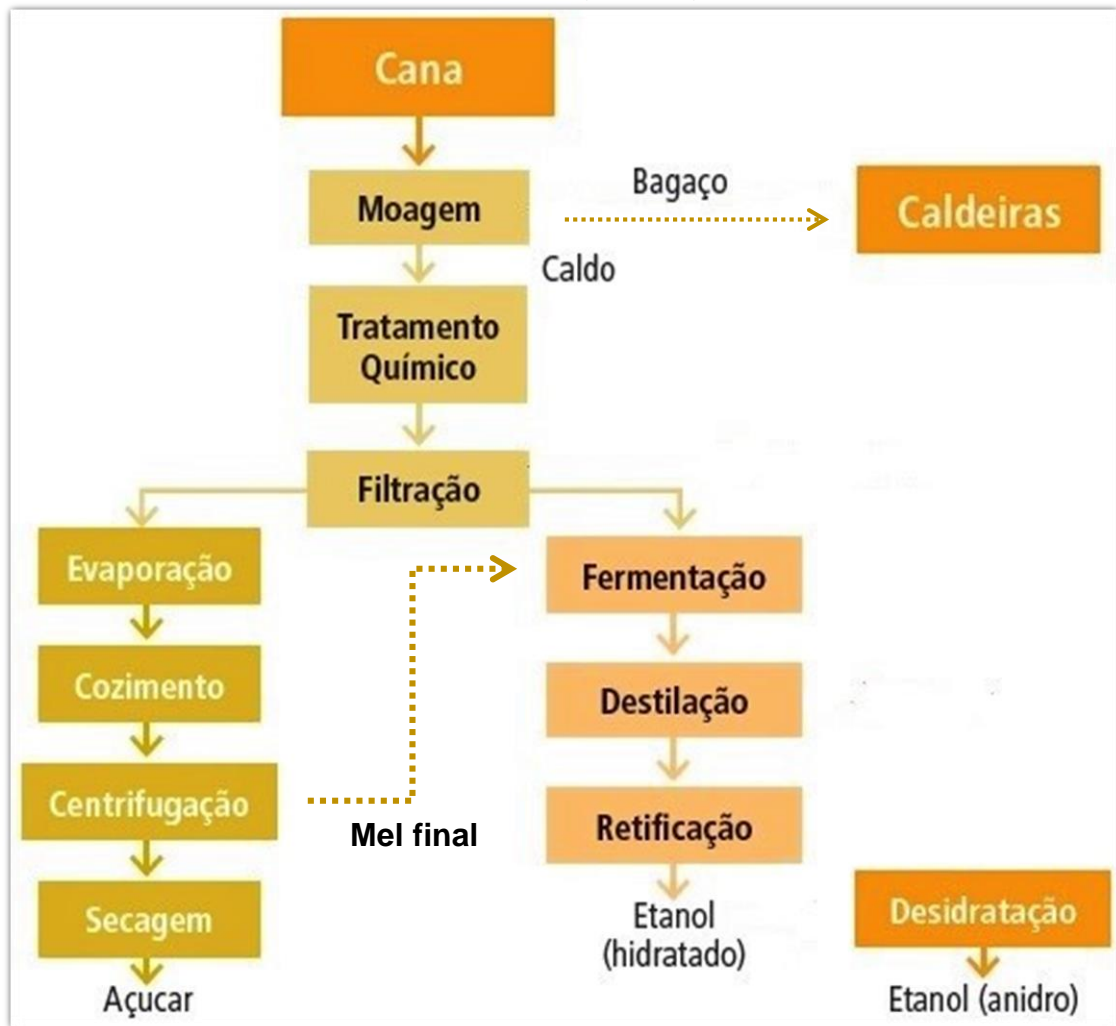
3.1 FUNCIONAMENTO DA USINA SUCROALCOOLEIRA

A cana-de-açúcar é colhida manualmente ou mecanicamente, após atingir seu ponto de maturação. No corte mecânico, dispensa-se a queima das palhas antes da colheita, mas ainda há uma pequena parcela da cana-de-açúcar colhida manualmente. No estado de São Paulo toda a cana já é colhida mecanicamente sem queima.

A cana quando chega na usina passa por um processo de limpeza nas mesas alimentadoras para eliminação de matérias estranhas, removendo pontas e folhas de cana, raízes e brotos, areia ou terra, pedras e rochas (REIN, 2013). Depois, a cana é conduzida por uma esteira metálica para os picadores e desfibradores, os quais tem a função de quebrar a estrutura dura e de romper as células para facilitar a retirada dos açúcares na moagem. A cana desfibrada é conduzida até as unidades de moagem por uma esteira de borracha, sendo esta de borracha por que possui um eletroímã para eliminação das partes metálicas, para posteriormente não danificar os rolos esmagadores (RIBEIRO, 2003).

Na moagem o caldo contendo a sacarose é separado do restante da cana (REIN, 2013). A moenda na Usina em estudo, possui 6 unidades de moagem em série, que são chamadas de ternos. A cana é conduzida de um terno a outro extraíndo o caldo e também produzindo o bagaço, que no final desse processo será utilizado como combustível nas caldeiras (NOVA CANA, 2017) (Figura 2). O bagaço é queimado para a produção de vapor d'água, que é utilizado no acionamento de turbinas a vapor, transformando energia térmica em energia mecânica (GRUPO MORENO).

Figura 2 - Fluxograma da produção de açúcar e etanol de cana



Fonte: Adaptado de Machado (Portal do Biogás, 2014).

Posteriormente, esse caldo deve passar por um tratamento e clarificação. A primeira fase do tratamento é o tratamento físico, o qual remove os sólidos insolúveis como areia, argila e bagacilhos, por meio de peneiras. A segunda fase é o tratamento químico, onde irá remover as impurezas insolúveis que não foram eliminadas na primeira fase e as impurezas coloidais e solúveis, por meio da adição de substâncias químicas e calor. Após o aquecimento há a coagulação, floculação e precipitação destas impurezas, que posteriormente serão eliminadas por sedimentação. É necessário também, nessa etapa, fazer a correção do pH para evitar inversão e decomposição da sacarose (NOVA CANA, 2017).

O tratamento fornece um caldo clarificado e este caldo é composto por açúcar, água e impurezas. Como já se eliminou parte das impurezas na etapa anterior, agora é preciso remover a água por evaporação, concentrando o caldo clarificado. A concentração do caldo é realizada em duas etapas. A primeira em evaporadores

produzindo o xarope, e a segunda realiza-se nos cozedores, onde o caldo entra na forma de xarope e sai na forma de massa cozida, na qual a sacarose apresenta-se cristalizada (RIBEIRO, 2003).

A massa cozida é descarregada do cozedor e é deixada em repouso nos cristalizadores para completar a formação dos cristais. Após o repouso, a cristalização é interrompida e essa massa é centrifugada por turbinas para separar os cristais de açúcar do mel (RIBEIRO, 2003). Este mel escoia pelas perfurações do cesto e os cristais ficam retidos na parte de dentro. Os cristais ainda são lavados com um jato de água quente e vapor para auxilia na remoção do mel. Então, esse açúcar é secado, peneirado e armazenado (GRUPO MORENO).

O lastro restante do processo de produção de açúcar, definido como mel final, será utilizado para a produção de etanol. Ele é diluído com água para formar o mosto e depois é enviado para as dornas de fermentação, onde é adicionado o levedo (fermento), iniciando a fermentação alcoólica. Após a fermentação alcoólica, o mosto torna-se vinho, pois não possui mais sacarose, e este será centrifugado para a separação do fermento. O fermento separado é tratado e reutilizado nas próximas fermentações (RIBEIRO, 2003).

O vinho, já centrifugado, é bombeado para a torre de destilação com retificação, a qual irá extrair o excesso de água obtendo como produto o etanol hidratado (96%), que é o etanol encontrado nos postos de combustíveis. Porém, para se obter o etanol anidro (puro), que é o adicionado na gasolina, é preciso ainda passar por mais um processo, a destilação extrativa. O etanol etílico e a água formam uma mistura azeotrópica, ou seja, apresentam a uma certa composição um ponto de ebulição constante e fixo como se fosse uma substância pura. Assim, utiliza-se peneira molecular para a retirada da água presente no etanol hidratado produzindo o etanol anidro.

Tanto o etanol hidratado como o etanol anidro, após a saída das colunas, são enviados para o tanque de medição e posteriormente para os tanques de armazenamento (RIBEIRO, 2003).

3.2 DIFERENÇAS DA ETAPA DE EVAPORAÇÃO E COZIMENTO

Ambas as etapas, evaporação e cozimento, têm a finalidade de evaporar a água do caldo. A medida em que a água é extraída, o açúcar se concentra até aproximar-se do seu ponto de saturação, que é o ponto em que se inicia a nucleação dos cristais de açúcar na massa. Essa etapa de concentração é separada em duas fases: evaporação e cozimento (RIBEIRO, 2003).

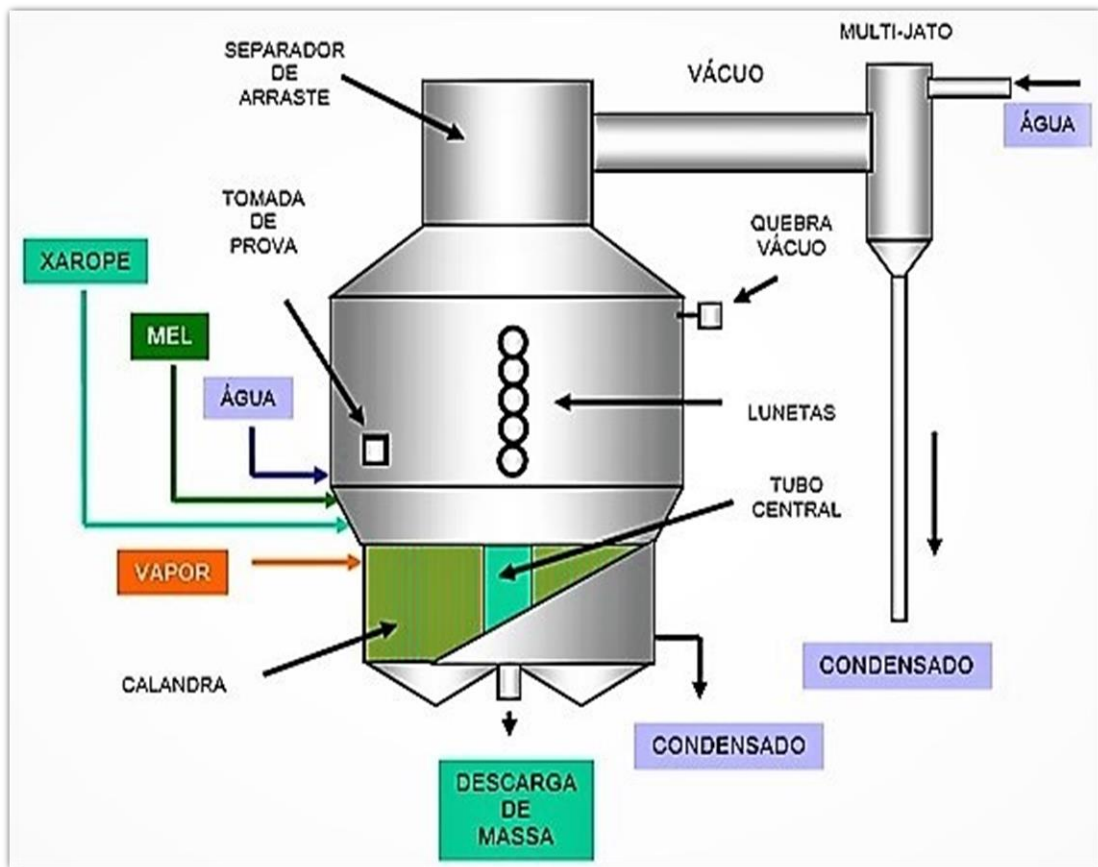
Na evaporação, que ocorre em evaporadores de múltiplos efeitos, o caldo clarificado é concentrado até formar o xarope, trabalhando apenas com um produto líquido. No cozimento, que ocorre em evaporadores de simples efeito, o xarope é concentrado até formar a massa cozida, onde sua concentração é elevada até seu ponto máximo, onde a constituição da massa transforma-se do estado líquido a um estado meio sólido, perdendo sua fluidez e aumentando sua viscosidade. Assim, esse equipamento já é fabricado com a função de manipular materiais densos e viscosos (RIBEIRO, 2003).

Na evaporação o caldo é concentrado até conter uma concentração em média de 65° brix e esse xarope formado segue para o cozedor, onde será concentrado até nuclear os cristais de açúcar, nas proximidades de 78° à 80° brix, que é ponto de cristalização do caldo de cana (RIBEIRO, 2003).

3.3 COZEDORES A VÁCUO

A consistência da massa cozida não permite mais fazê-la circular facilmente de um vaso para ao outro, por isso utiliza-se um cozedor à vácuo (Figura 3) (RIBEIRO, 2003).

Figura 3 - Descrição de um cozedor a vácuo convencional



Fonte: Ribeiro (2003).

Primeiramente, para fazer esse equipamento funcionar, deve-se abrir a válvula de água através do condensador multijato para conseguir o vácuo desejável. Esse sistema consiste em reduzir a pressão do interior do vaso abaixo da pressão atmosférica, “aspirando” o xarope (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999). Essa redução de pressão permite que a temperatura de ebulição do caldo diminua, e como consequência, reduz também a quantidade de calor utilizada no processo de ebulição e de condensação e evita a degradação do açúcar pela exposição do caldo a altas temperaturas por um longo intervalo de tempo (RIBEIRO, 2003).

Os vapores dos cozedores vão diretamente para os condensadores (RIBEIRO; BLUMER; HORII, 1999).

A proporção de sacarose extraída de uma massa cozida chama-se esgotamento. Esse esgotamento da sacarose é realizado em várias etapas e o processo empregado é o de duas massas, que consiste em dois tipos de cozimentos: cozimento A e o cozimento B. O cozimento A, conhecido como cozimento de primeira, esgotar a sacarose do xarope que contém uma pureza média de 80 a 90 brix. Este cozimento tem início com a adição das sementes (açúcar triturado com etanol), estes

cristais introduzidos à massa irão orientar o crescimento de todos os cristais, que ao crescerem, esgotam a sacarose do licor-mãe. Ao final do cozimento, o açúcar A deve ter um tamanho de 0.8 a 1 milímetro e deve estar com uma pureza menor, cerca de 68 a 72 brix. Essa massa cozida A será centrifugada para separação do açúcar e seu licor-mãe (mel rico). O açúcar produzido dessa massa é o de melhor qualidade possível na planta, pois seu esgotamento nesse cozimento é muito eficiente, esgotando em média de 50 a 60% da sacarose do xarope (RIBEIRO, 2003).

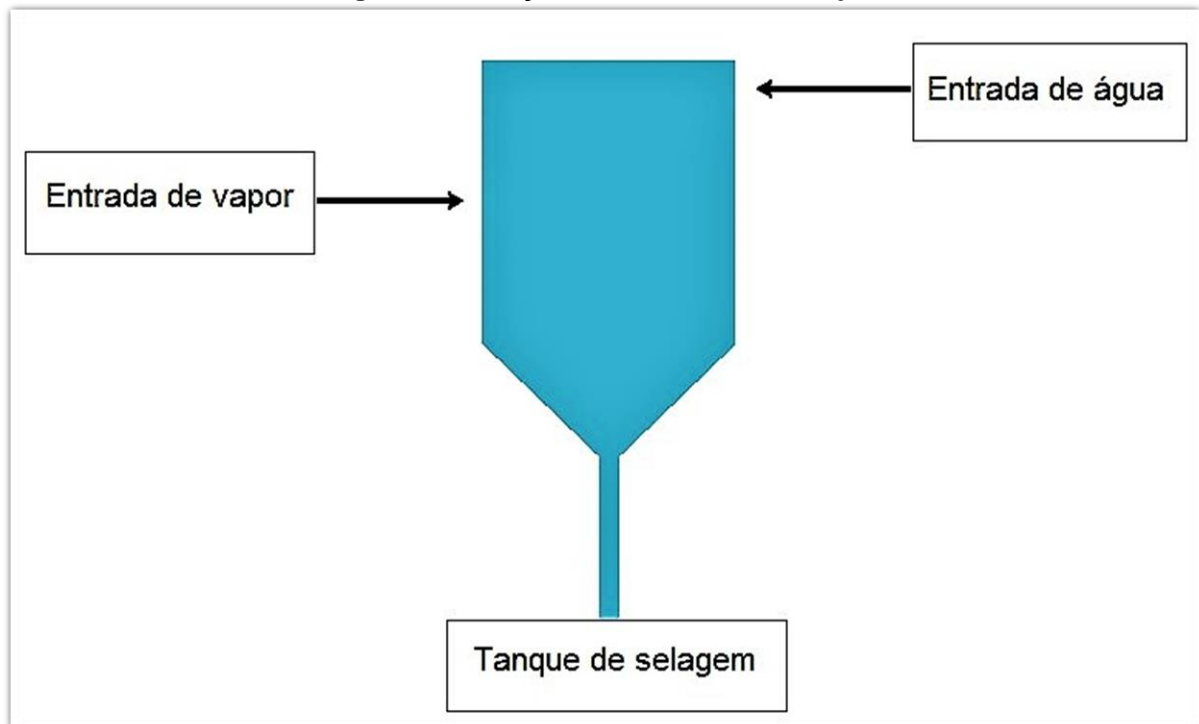
O cozimento B, conhecido como cozimento de segunda, esgota a sacarose do mel rico extraído do cozimento A. Este cozimento tem início com a adição das sementes e o processo é igual ao cozimento A, porém ao final do cozimento, o açúcar B deve ter um tamanho médio de 0.7 milímetros e deve estar com uma pureza de cerca de 56 a 60 brix. Essa massa cozida B será centrifugada para separação do açúcar e seu licor-mãe, formando o mel pobre. O esgotamento deste cozimento é menor, devido a maior viscosidade da massa B, esgotando em média de 40 a 50% da sacarose do mel rico. O açúcar B por ser mais pobre normalmente não é comercializado, ele é refundido para ser misturado ao xarope ou para fabricação do açúcar refino granulado (RIBEIRO, 2003).

3.4 CONDENSADORES MULTIJATO

Para obter vácuo, os vapores liberados pela evaporação devem ser condensados, por isso, condensadores e equipamentos de vácuo são necessários em cozedores a vácuos. Nesse equipamento a água fria entra em contato direto com o vapor a ser condensado (REIN, 2013). A mistura formada da água fria e o condensado dos vapores sai na parte inferior por uma tubulação até o tanque de selagem e está água é enviada para a torre de resfriamento, a qual depois volta novamente para o condensador, fechando um circuito (RIBEIRO, 2003).

O condensador multijato (Figura 4) introduz a água fria no condensador através de jatos de alta velocidade, na forma de spray e com isso, arrasta também com a água, os gases incondensáveis para a coluna barométrica, sendo estes eliminados. Conseqüentemente, não há a necessidade de se utilizar uma bomba a vácuo no sistema (CASTRO; ANDRADE, 2007).

Figura 4 - Esboço do condensador multijato



Fonte: Autoria própria (2018).

3.5 SEPARAÇÃO DE ARRASTE

A escolha do separador de arraste é influenciada pela dimensão da gota, perda de carga e pela habilidade do separador de drenagem ou de propensão a entupir, forma de arraste e o custo total do equipamento (REIN, 2013).

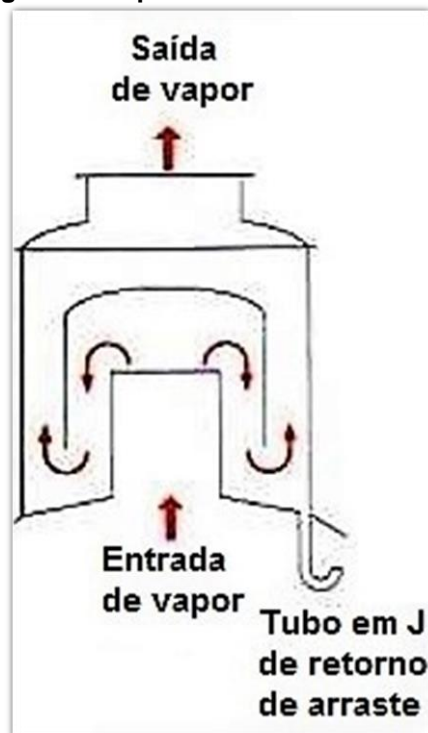
Para minimizar o efeito do arraste, algumas ações mitigadoras podem ser efetuadas, como evitar a elevação do vácuo a valores desnecessários, alimentar o xarope pelo fundo da calandra, equipar o evaporador e o cozedor com um separador de arraste eficiente, manter a alimentação uniforme e instalar o separador a uma altura de 2 a 2,5 vezes a altura da calandra. Além de que todo separador de arraste deve ter um sistema de limpeza para manter as tubulações de retorno desobstruídas (REUNION ENGENHARIA).

3.5.1 Tipos de Separadores de Arraste

3.5.1.1 Separadores de Fluxo Reverso

Esse tipo de separadores (Figura 5) apoiam-se na mudança de direção do fluxo de vapor para que as mesmas se choquem com uma superfície e passem a escorrer pela mesma, ou seja, as gotas são removidas por impacto inercial sobre superfícies sólidas. Devem ser dimensionados de modo que a área de fluxo em vazão de vapor máxima não tenha a velocidade de re-arraste das gotas excedidas. As gotas são coletadas e devolvidas ao líquido em ebulição (REIN, 2013).

Figura 5 - Separador de fluxo reverso

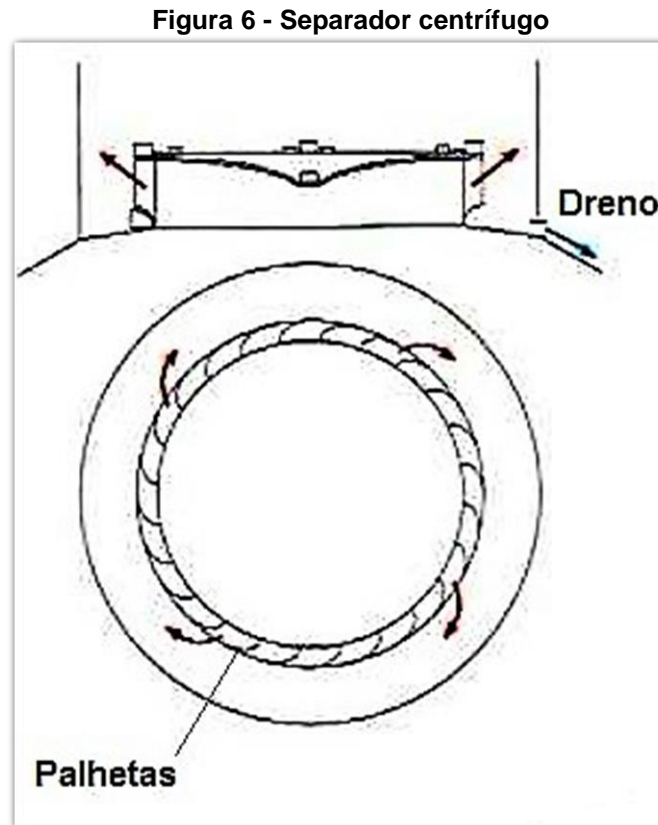


Fonte: Rein (2013).

3.5.1.2 Separadores Centrífugos

São montados no interior de evaporadores e cozedores, utilizando a força centrífuga para separar as gotas. Oferecem superfícies curvas e de área de passagem decrescente, acelerando as partículas de caldo contra suas paredes mais externas,

as quais são coletadas e por gravidade voltam para o corpo do vaso (REUNION ENGENHARIA). Esse tipo de separador é mostrado na Figura 6.



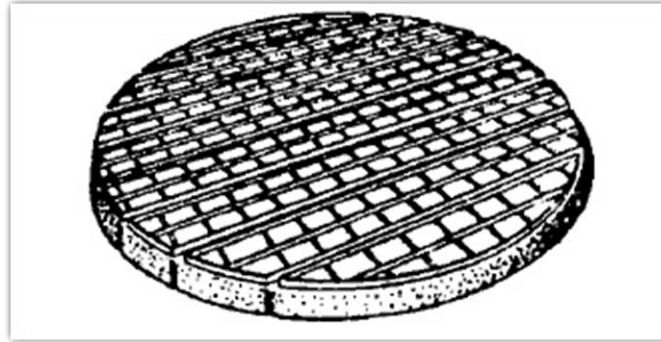
Fonte: Rein (2013).

3.5.1.3 Separador de Malha de Arame

Consistem em um bloco de arame entrelaçado (Figura 7), os quais são contidos em chassis de suporte ou grade para serem colocados em suportes de aço e então colocados no vaso. São normalmente instalados horizontalmente para fluxo ascendente vertical e seus blocos precisam ser montados juntos e bem ajustados, pois se houver abertura entre as seções, velocidades localizadas altas ocorrem e aumentam o arraste (REIN, 2013).

O principal mecanismo de captação das gotas nesse tipo de separador é por impacto inercial. O vapor passa pelo separador fazendo com que gotas colidam contra a superfície dos blocos, onde estas ficam retidas até se aglutinarem e formarem gotas maiores. Quando elas atingem um certo tamanho, se rompem com a malha de arame e caem contra a corrente do fluxo de vapor (ANDRADE, 2014).

Figura 7 - Separador de arraste tipo malha de arame



Fonte: Campbell (1992) apud Andrade (2014).

3.5.1.4 Separadores de Placa Chevron

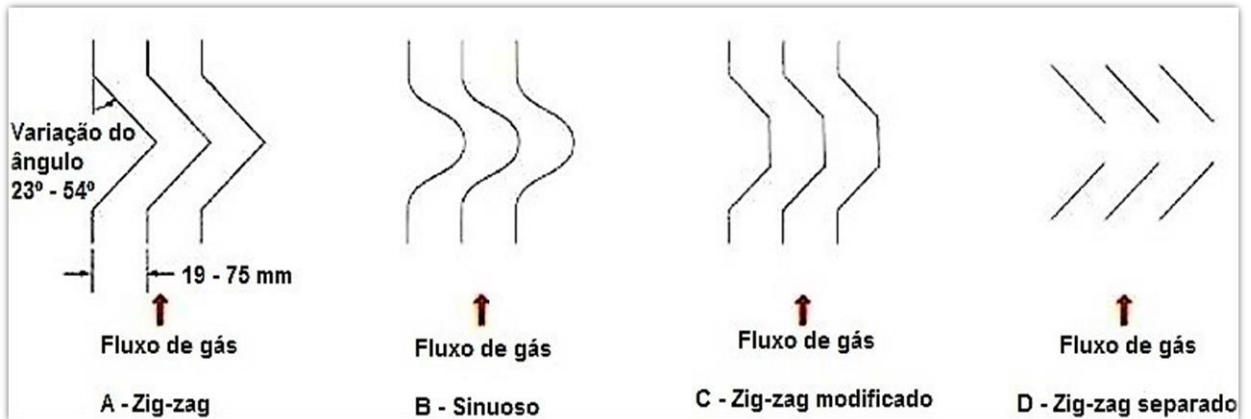
Consistem em uma série de placas ou defletores onde o vapor flui (REIN,2013). Nas suas placas há ranhuras de precisão, ocasionando a acumulação do líquido a ser drenado. O líquido acumulado nas ranhuras escorre até as bordas, formando grandes gotas e caindo contra o fluxo do vapor (MUNTERS BRASIL, 2004).

Esses separadores de arraste podem ser instalados para fluxo vertical ou horizontal. A vazão máxima de vapor é determinada pelo re-arraste das gotas na superfície do separador, em ambos os casos (REIN, 2013).

Possuem a vantagem de não precisarem de uma tubulação de retorno de arraste, pois, as gotas caem do fundo do separador de volta a massa cozida (REIN, 2013).

As formas da placa Chevron são mostradas na Figura 8.

Figura 8 - Geometria de placas Chevron para separadores



Fonte: Rein (2013).

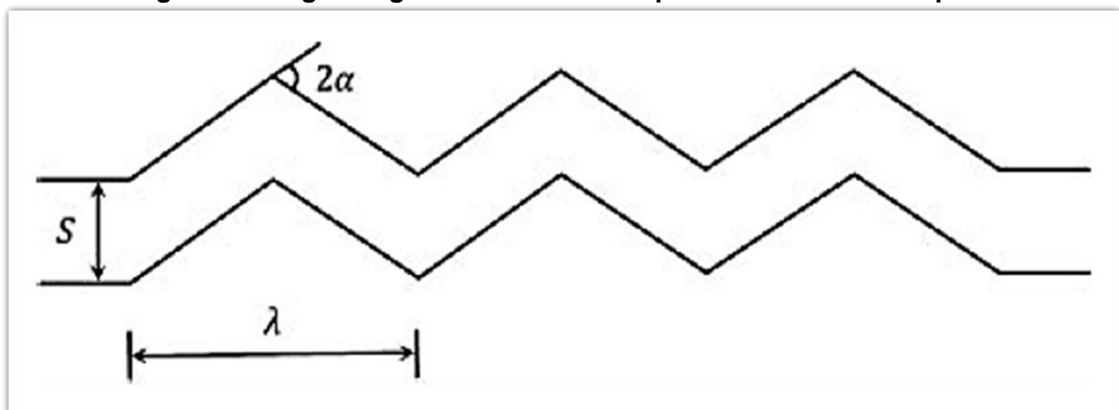
3.6 METODOLOGIA SUGERIDA

Segundo Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011), para uma avaliação de desempenho de qualquer separador de arraste deve-se considerar os seguintes parâmetros:

- Perda de carga do fluxo de ar;
- Eficiência de remoção das gotas.

Estes dois pontos dependem dos parâmetros geométricos do equipamento e, para este caso que é um separador de arraste de placa, as principais características são o espaçamento entre as placas (S), o ângulo de curvatura (α) e o número de curvaturas em cada placa (n) (Figura 9).

Figura 9 - Diagrama geométrico de um separador de arraste de placa



Fonte: Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011).

A perda de carga do fluxo de ar para este tipo de separador de arraste com canais de drenagem é representada pela Equação (1) (GALLETTI; BRUNAZZI; TOGNOTTI, 2008).

$$\Delta P = \frac{1}{2} C_{PD} \rho_g \left(V_g \frac{S}{S \sin \alpha - I_{DC}} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:

C_{PD} = Constante para correlação de perda de carga;

ρ_g = Densidade do vapor (kg/m³);

V_g = Velocidade do vapor na entrada (m/s);

S = Espaçamento entre as placas (mm);

I_{DC} = Largura do canal de drenagem (mm);

α = Ângulo da curvatura (rad).

No equipamento em estudo não há canais de drenagem de líquido, pois as gotículas de sacarose retornam ao cozedor pela gravidade, logo $I_{DC} = 0$.

O coeficiente total de perda de carga para este separador de arraste também pode ser calculado e foi proposto por Wilkinson (1990) pela Equação (2).

$$C_P = 2C_{pb}(\alpha) + nC_{pb}(2\alpha) + (n + 1)C_{ps} \quad (2)$$

Onde C_{pb} e C_{ps} são os coeficientes de perda de carga para as curvaturas do equipamento e para canais diretos (sem drenagens), respectivamente. Esses valores são obtidos pelas Equações (3) e (4)

$$C_{pb} = \begin{cases} \left(0,0649 + \frac{22,3}{\sqrt{Re_g}} \right) (2\alpha) , & \text{quando } Re_g < 7760 \\ 0,318(2\alpha) , & \text{quando } Re_g > 7760 \end{cases} \quad (3)$$

$$C_{ps} = \frac{0,008325}{\left[\log_{10} \left(\frac{10,7}{Re_g^{0,9}} \right) \right]^2} \frac{\lambda}{2S \cos \alpha^2} \quad (4)$$

Em que:

Re_g = número de Reynolds para o vapor.

Para o cálculo da eficiência de remoção de gotículas, há vários estudos e trabalhos a respeito na literatura. Para casos em que há uma mistura de vapor e gotículas, como o estudado, Calvert et al. (1974) e Burkholz (1989) propuseram um modelo simples para a eficiência da coleta dessas gotas. Neste modelo, a eficiência global (η), demonstrada na Equação (5), é dada em termos de η_B , Equação (6), que é a eficiência para uma curvatura.

$$\eta = 1 - (1 - \eta_B)^n \quad (5)$$

e

$$\eta_B = \frac{\rho_d V_g d^2}{18 \mu_g S} \alpha \quad (6)$$

Em que:

n = número de curvaturas em cada placa;

ρ_d = Densidade da gota de sacarose (kg/m^3);

V_g = Velocidade do gás na entrada (m/s);

d = Diâmetro da gota de sacarose (μm);

μ_g = Viscosidade do vapor (kg/m s);

S = Espaçamento entre as placas (mm);

α = Ângulo da curvatura (rad).

3.7 CRITÉRIOS PARA ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA

A análise da viabilidade econômica por meio dos critérios VPL (Valor Presente Líquido), TIR (Taxa Interna de Retorno) e *Payback* (tempo de retorno) permite identificar o lucro, se a taxa de retorno do projeto estudado é maior que a taxa mínima de atratividade (TMA), também conhecida como custo de oportunidade e quanto tempo é necessário para que o investimento retorne.

Este estudo de avaliação envolve três etapas: projeção do fluxo de caixa, cálculo da TMA e aplicação das técnicas de avaliação. Posteriormente, com os resultados obtidos, analisa-se os ganhos oferecidos, concluindo se o projeto é viável ou não.

3.7.1 Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna De Retorno (TIR)

Todas as empresas realizam análises de viabilidade econômica em seus projetos de investimentos, aplicando-se critérios para a tomada de decisões de longo prazo. O estudo de viabilidade de qualquer negócio é iniciado pela esfera econômica com várias alternativas de investimentos e posteriormente, há a identificação do projeto mais viável. Para as análises terem consistência é preciso que ela seja feita com base em estimativas coerentes e confiáveis dos elementos de custos e de receitas (EICK, 2010).

Existe uma infinidade de variáveis que afetam o desempenho de um negócio, por isso, torna-se importante levar em consideração as diferenças que cada projeto possui. Os principais métodos de avaliação de projetos consideram o período necessário para a recuperação do investimento inicial, à taxa de retorno decorrente do investimento feito e o lucro decorrente do capital investido. Os critérios mais utilizados para uma análise de viabilidade de um projeto são: VPL e TIR (EICK, 2010).

O VPL é utilizado para calcular o valor presente de uma série de pagamentos futuros descontando uma taxa de custo de capital estipulada. É uma técnica de análise de orçamento de capital que considera o valor do dinheiro no tempo. Ou seja, consiste em trazer para a data zero, usando como taxa de desconto o custo de oportunidade, que se refere ao retorno mínimo exigido pelos investidores, denominada de TMA. O

VPL é um critério de referência nas decisões de investimentos, quanto maior o VPL mais lucrativo será o projeto. Portanto, esse fato indica que os fluxos futuros trazidos e somados a valor presente superará os investimentos (EICK, 2010).

A TIR é uma medida relativa expressa em percentual, que demonstra como a taxa de desconto que faz com que o VPL de uma oportunidade de investimento se iguale a zero, já que o valor presente das entradas de caixa é igual ao investimento inicial. Esse percentual é obtido através do fluxo de caixa projetado do projeto, não tendo necessidade de arbitrar um valor para a taxa de desconto. Método muito utilizado pela facilidade de interpretar o seu resultado: um percentual de rentabilidade do projeto que está sendo analisado. Quanto maior a TIR, melhor e mais lucrativo será o projeto, ou seja, se a TIR de um projeto de investimento for superior ao custo de capital para financiá-lo, o projeto superará os investimentos (EICK, 2010).

3.7.2 Período de Recuperação de Capital (*Payback*)

O período de recuperação de capital é conhecido como *Payback*. Este é o tempo necessário para que as entradas de caixa do projeto se igualem ao valor inicial a ser investido, ou seja, o tempo de recuperação do investimento realizado, que é o tempo necessário para um investimento ser restituído (PRATES, 2016).

Para esse cálculo, leva-se em consideração que quanto maior for o horizonte temporal, maiores são as incertezas, fazendo com que as empresas procurem diminuir seus riscos optando por projetos que tenham um retorno do capital em um período de tempo razoável. Não se pode afirmar um valor para o prazo de retorno ideal, apenas um limite de aporte de capital do investidor, que precisa estudar suas próprias possibilidades financeiras (PRATES, 2016).

Quando o *payback* é calculado sem descontar os fluxos de caixa futuros é chamado de *payback* simples. Quando o cálculo utiliza uma taxa de desconto (TMA - taxa mínima de atratividade), então é chamado de período de *payback* descontado (PRATES, 2016).

Apesar da simplicidade e rapidez, o critério *payback* simples não é recomendado devido ele não considerar o valor do dinheiro no tempo e não levar em conta o custo de capital da empresa. Sendo assim, o mais utilizado e o que será calculado neste trabalho será o *payback* descontado, pois, neste critério, todos os

fluxos de caixa futuro devem ser descontados pela taxa em relação ao período ao qual o fluxo está atrelado (PRATES, 2016).

4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Para a identificação das atividades, procedimentos operacionais e identificação do problema a ser investigado foi realizada uma visita técnica à Fábrica para o conhecimento do processo industrial. Depois, foram debatidos os problemas e as propostas da mesma para que possam ser tomadas medidas de correção e minimização.

A metodologia para o desenvolvimento do conjunto de ações para o estudo da viabilidade da implantação dos separadores de arraste na Usina foi baseada nos itens apresentados a seguir:

- Análise dos dados;
- Método de cálculo;
- Estudo da viabilidade econômico-financeira.

4.1 ANÁLISE DOS DADOS

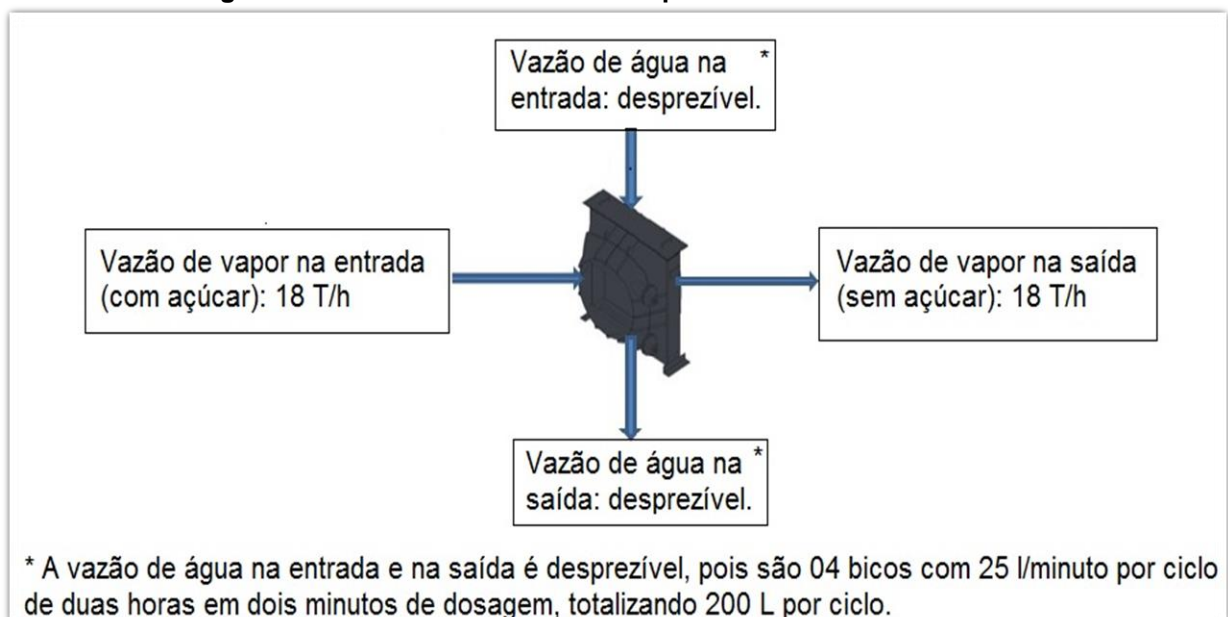
Os dados do módulo do separador de arraste (Tabela 1) e uma figura demonstrativa do volume de controle que será estudado desse módulo (Figura 10) foram fornecidos pela própria Usina para maior entendimento do problema e para o desenvolvimento do trabalho. Esses dados representaram a motivação para o início da pesquisa, direcionando para a escolha de uma metodologia e em como utilizá-los.

Tabela 1 - Características de projeto do Separador de Arraste para Cozedores - 800 hl massas A, A/B e B

ESPECIFICAÇÕES DE PROJETO	
MATERIAL DO MÓDULO SEPARADOR	Aço inox AISI-304
NÚMERO DE CURVATURAS	1
SENTIDO DO FLUXO DO VAPOR	Horizontal
DIMENSÕES DO CONJUNTO DAS PLACAS	212 x 1430 x 1451 mm
ESPESSURA DA PLACA	0,8 mm
TEMPERATURA DO VAPOR	65°C
PRESSÃO DO VAPOR	0,25 bar
VAZÃO DE VAPOR	18 T/h
DIÂMETRO DA GOTA	Até 25 µm
PERDA DE CARGA ESTIMADA	567,8050 Pa

Fonte: Dados obtidos pela Usina em estudo (2017).

Figura 10 - Volume de controle do separador de arraste em estudo



Fonte: Dados obtidos pela Usina em estudo (2017).

4.2 METODOLOGIA DE CÁLCULO

O estudo desenvolvido neste trabalho é um conjunto de ações propostas para analisar os fenômenos que acontecem nesse processo em estudo e suas variáveis, com foco na avaliação da eficiência do separador de arraste e da sua perda de carga.

Para realizar o objetivo da pesquisa, o trabalho foi baseado em Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011), que trouxeram ao estudo fontes teóricas para dar suporte ao resultado que foi obtido.

A adoção deste método deve-se ao fato deste simular e utilizar equações para separadores de arraste de placas de fluxo horizontal, sendo este do mesmo tipo do separador em estudo, adaptando-se melhor aos objetivos do trabalho e evitando a dispersão dos resultados finais.

Esta metodologia foi adaptada para a situação em estudo, avaliando sua estrutura e os equipamentos que são utilizados, bem como suas condições de uso, para assim adquirir o resultado desejado e chegar a uma conclusão bem embasada.

4.2.1 Desenvolvimento Metodológico

Primeiramente foi elaborada uma planilha eletrônica com todos os dados obtidos pela Usina para uma maior organização e para facilitar a visualização das considerações a serem realizadas.

Com os valores da temperatura e da pressão do vapor na condição de vácuo do cozedor, que foram apresentados na Tabela 1, calculou-se a densidade e a viscosidade do vapor pelo *Water and Steam Properties (WASP)*.

Posteriormente, foram elaboradas as considerações dos dados faltantes, valores para o ângulo da curvatura e do espaçamento entre as placas. Esses dados foram obtidos do livro “Engenharia do Açúcar de Cana”, em que, segundo Rein (2013), o espaçamento entre as placas nesse tipo de equipamento varia de 22 a 75 mm e o ângulo entre 23 a 54°, porém o mais comum entre esses equipamentos é um espaçamento de 22 mm e um ângulo de 45°. Considerou-se para os cálculos os valores que o autor do livro afirma ser mais comum.

Para o cálculo da densidade da gota de sacarose, utilizou-se a Equação (7) (NETO et al., 2012), que foi obtida pelos autores por um ajuste de dados de Densidade *versus* Temperatura para o mel final de cozimento do açúcar.

$$\rho = -0,00004 T^2 + 0,00327 T + 1,34771 \quad (7)$$

Em que:

ρ = Densidade do mel final (g/mL);

T = Temperatura (°C).

Substituiu-se os valores de pressão e temperatura da situação em estudo e obteve-se uma densidade para as gotículas de açúcar.

Foi necessário também calcular a velocidade do vapor na entrada do equipamento que passa entre as placas, pois na Equação (6) o cálculo é para uma curvatura e não no equipamento em geral. Para isso precisou-se calcular a área livre em que o vapor passa. Então, dividiu-se a largura das placas do separador (1430 mm) pela soma do espaçamento mais a espessura destas para obter-se a quantidade de placas existentes no módulo do equipamento. Com um total de 62 placas, multiplicasse esse valor pela própria área das placas (espessura por altura), obtendo-se a área que estas ocupam e assim, diminuindo-as da área total do equipamento. Sabendo, então, a área em que o vapor passa dentro do equipamento, calcula-se a velocidade do vapor pela Equação 8.

$$V = \frac{Q}{\rho_g A} \quad (8)$$

Em que:

V = Velocidade (m/s);

Q = Vazão de vapor (kg/s);

ρ_g = Densidade do vapor (kg/m³);

A = Área (m²).

Agora, com todos esses dados, substitui-se esses na Equação (6), considerando λ (tamanho da curvatura) o comprimento da própria placa, 214 mm, já que esta tem apenas uma curvatura. Em relação ao diâmetro da gota, foi dado pelo catálogo do equipamento (MUNTERS BRASIL) que estes são de até 25 μm e não um valor fixo. Logo, na planilha eletrônica elaborada, foram inseridos na equação todos os valores de uma faixa de 10 a 25 μm para escolher o valor que melhor se adaptou para esta situação. Outros parâmetros como o espaçamento entre as placas e o ângulo de curvatura foram considerados de outra fonte, por isso não foi garantido valores para o diâmetro das gotas maiores que 16 μm .

Com todos os parâmetros definidos, obtém-se um valor para a eficiência em uma curvatura (η_b) e assim, substitui-se na Equação (5) e encontra-se a eficiência global (η) para a coleta das gotículas de açúcar (Anexo A)

Para realizar o cálculo da perda de carga, demonstrado pela Equação (1), primeiramente deve-se obter o número de Reynolds para o vapor, Equação (9).

$$Re_g = \frac{\rho_g V_g S}{\mu_g} \quad (9)$$

Em que:

ρ_g = Densidade do vapor (kg/m^3);

V_g = Velocidade inicial do vapor (m/s);

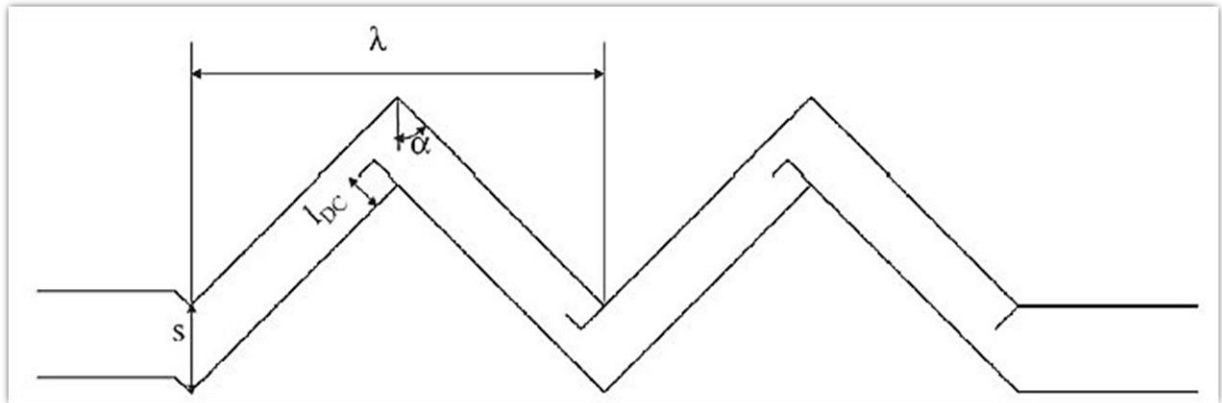
S = Espaçamento entre as placas (m);

μ_g = Viscosidade do vapor ($\text{kg}/\text{m s}$).

Para o coeficiente C_{PD} da Equação (1), não foi encontrado nenhuma metodologia para obter seu valor, então, considerou-se o valor de 9,4, assim como o trabalho de Galletti, Brunazzi e Tognotti (2008). No caso do trabalho destes autores, há canais de drenagens nas placas do separador de arraste estudado por eles, que são como se fossem “ganchos” nas curvaturas do equipamento, como mostra a Figura 11. Apesar de coeficiente C_{PD} ser para separadores de arraste com canais de drenagens, o mesmo valor pode ser utilizado para o caso em estudo, pois pelo fato de não haver canais de drenagens a perda de carga é menor, não possuindo a mesma

dificuldade para a passagem do vapor. Logo, utiliza-se este mesmo valor, considerando-se que este é um cálculo conservativo, que adota uma margem de segurança.

Figura 11 - Placas de um separador de arraste com canais de drenagem



Fonte: Galletti, Brunazzi e Tognotti (2008).

Como já foi dito, a variável $I_{DC} = 0$, pelo fato do separador de arraste em estudo não ter os canais de drenagens. Assim, com todos os parâmetros definidos, obtém-se um valor para a perda de carga total do equipamento (Anexo A).

O coeficiente total de perda de carga, Equação (2), também foi calculado. Este varia com o espaçamento entre as placas e com o número de curvaturas existentes nelas, tornando possível observar a influência desses parâmetros na perda de carga. Logo, calculou-se as variáveis da Equação (2) pelas Equações (3) e (4). Posteriormente, calculou-se os valores do coeficiente de perda de carga para uma faixa de valores, gerando gráficos para análise em relação a suas variáveis. Calculou-se também os valores da eficiência para uma faixa de valores em relação ao espaçamento entre as placas, ângulo de curvatura e quantidade de curvaturas nas placas.

As faixas de valores consideradas para a construção desses gráficos foram baseadas no livro “Engenharia do Açúcar de Cana”, do autor Rein (2013) e estão demonstradas no Anexo B, C, D, E e F deste trabalho.

4.3 ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

Para o estudo da viabilidade técnico-econômica da instalação dos separadores de arraste, foi fornecido pela Usina dados do orçamento desses equipamentos, os quais são mostrados na Tabela 2.

Tabela 2- Orçamento dos módulos dos separadores de arraste

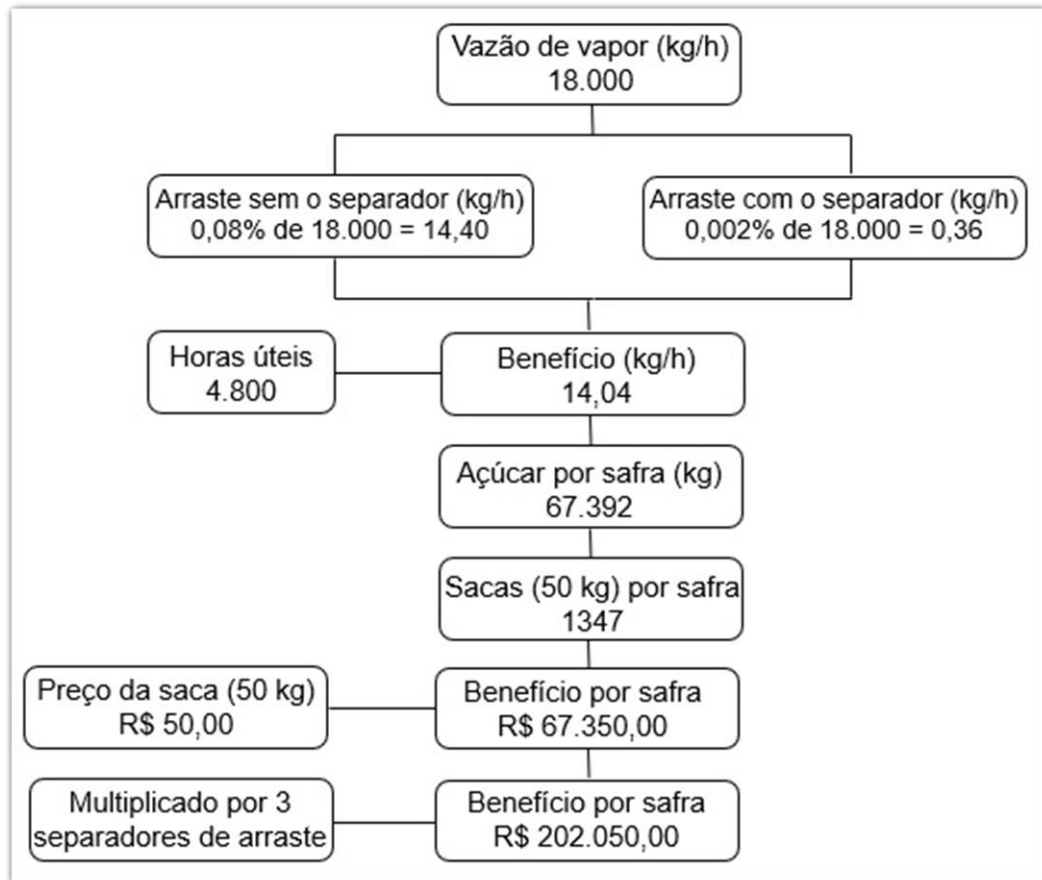
VALORES UNITÁRIO E O TOTAL DOS SEPARADORES DE ARRASTE COM IMPOSTOS INCLUSOS	
MÓDULO+CAIXA+BICO	R\$ 53.450,00
MATERIAIS E MÃO DE OBRA	R\$ 46.550,00
TOTAL POR MÓDULO	R\$ 100.000,00
TOTAL PARA OS 3 MÓDULOS	R\$ 300.000,00

Fonte: Autoria própria (2018).

Foi obtido, também, pela empresa fornecedora do equipamento, que a perda de vapor no cozedor a vácuo sem o separador de arraste é de 0,08% e com ele instalado diminui para 0,002%, além das horas úteis por safra que a Usina funciona, que é de 4.800 horas.

Com as porcentagens de perda e com a vazão de vapor que sai do cozedor a vácuo (18.000 kg/h), calculou-se a quantidade de vapor que é perdido nas duas situações: 14,40 kg/h sem o equipamento instalado e 0,36 kg/h com ele instalado. Subtraindo esses valores, encontra-se o benefício de vapor que ele gera e que este multiplicado pelas horas úteis de funcionamento do equipamento mostra a quantidade de açúcar que é recuperada por safra, que é de 67,392 kg. Como uma saca tem 50 kg de açúcar, dividiu-se, então, a quantidade de açúcar recuperado por 50 para obter esse benefício em sacas. Sabe-se que o valor da saca é de aproximadamente R\$ 50,00 (RURAL BR, 2018), logo o benefício que esse vapor recuperado pela instalação do separador de arraste gera é de aproximadamente R\$ 67.350,00 para cada módulo, ou seja, para os três módulos o valor do retorno investido será de R\$ 202.050,00 (Figura 12).

Figura 12 - Fluxograma do retorno do investimento gerado pelo equipamento



Fonte: Autoria própria (2018).

Para os cálculos e a análise dos critérios TIR, VPL e *Payback* considerou-se um tempo de seis safras (ocorre uma safra por ano) e uma taxa mínima de atratividade (TMA) de 22,56% (Equação 10). A TMA foi calculada com base em um empréstimo para pessoa jurídica, com um capital de giro com prazo superior a 365 dias e para encargo pré-fixado, obtendo-se uma taxa de 15,04% anualmente (BANCO CENTRAL DO BRASIL) e, considerou-se também um retorno de 50% exigido sem a taxa de juros.

$$TMA = 0,1504 * 1,5 = 22,56\% \quad (10)$$

Com todos os dados de custos, retorno do investimento, TMA e as considerações feitas, fez-se os cálculos em uma planilha eletrônica (Anexo G).

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 RESULTADOS OBTIDOS PELA METODOLOGIA

Foram obtidos os valores das variáveis da Equação (6) para o cálculo da eficiência da coleta de gotículas de sacarose para uma curvatura (η_B) e, estes são mostrados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros obtidos para o cálculo da eficiência

PARÂMETROS PARA O CÁLCULO DA EFICIÊNCIA	
DENSIDADE DO VAPOR (kg/m ³)	0,1612
VISCOSIDADE DO VAPOR (kg/m.s)	0,00001074
DENSIDADE DA GOTA DE AÇÚCAR (kg/m ³)	1392
VELOCIDADE DO VAPOR QUE PASSA ENTRE AS PLACAS (m/s)	15
ESPAÇAMENTO ENTRE AS PLACAS CONSIDERADO (m)	0,022
ÂNGULO DE CURVATURA CONSIDERADO (rad)	0,785398
DIÂMETRO DA GOTÍCULA DE AÇÚCAR (m μ)	16

Fonte: Autoria própria (2018).

A partir desses valores, calculou-se uma eficiência de remoção de 0,987 para uma curvatura (η_B) e, conseqüentemente, o mesmo valor para a eficiência global (η), já que há apenas uma curvatura nas placas no separador de arraste em estudo. O separador de arraste, nas situações consideradas neste trabalho, apresentou um ótimo rendimento, visto que o valor da sua eficiência foi bem próximo de 100%.

Atualmente, com a economia globalizada e com a grande competitividade no mercado, as indústrias estão cada vez mais procurando se adequar às exigências dos clientes, significando maior produção, com menos recursos e com mais agilidade. Assim, faz-se necessário que as indústrias busquem melhorar a eficácia de seus equipamentos, identificando e eliminando as perdas e os problemas de produção e,

consequentemente, reduzindo custos de fabricação. Por isso a análise da eficiência global se torna tão importante (CHIARADIA, 2004).

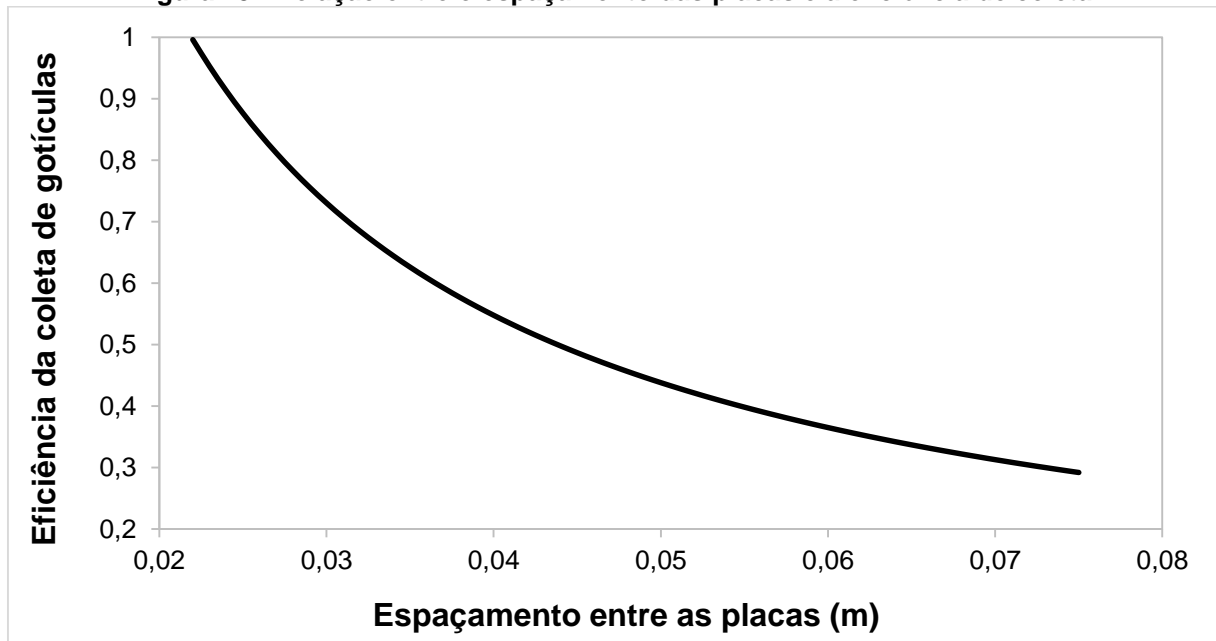
Para o cálculo da perda de carga, calculou-se o número de Reynolds pela Equação (9), obtendo-se um valor de aproximadamente 4953, valor que indica as forças predominantes no escoamento, sendo este um escoamento turbulento (valor maior que 2000) (BIRD; STEWART, 2014). Os mesmos dados de espaçamento, ângulo de curvatura e velocidade inicial do vapor entre os espaçamentos que foram utilizados no cálculo da eficiência foram considerados neste cálculo e, com o coeficiente $C_{PD} = 9,4$, obteve-se uma perda de carga para o fluxo de ar de aproximadamente 326 Pa.

O valor esperado da perda de carga pelo fabricante do equipamento é de aproximadamente 568 Pa (Tabela 1). Tal desvio já era de se esperar entre os valores, justamente pelo fato de o ângulo da curvatura e o espaçamento entre as placas não serem o mesmo do equipamento e serem considerados de outra fonte. Outro motivo para esse desvio pode ser por considerar o coeficiente C_{PD} de um separador com canais de drenagens e o de estudo ser sem drenagens. Contudo, apesar dessas variáveis de processo, o desvio entre o valor obtido e o valor esperado não foi tão grande, sendo valores relativamente próximos.

É muito importante o estudo das perdas de carga, pois pela sua análise consegue-se a minimização dos custos de projetos e a obtenção de uma maior eficiência para os sistemas. Para que as operações sejam viáveis, é necessário que ela apresente a menor perda de carga para uma maior eficiência possível de retenção de gotículas (CORBINE, 2012)

Algumas análises dos parâmetros que interferem na eficiência de coleta e na perda de carga do fluxo de vapor, foram realizadas por meio de gráficos, facilitando a observação desses comportamentos. O primeiro gráfico construído foi de Eficiência *versus* Espaçamento entre as placas, obtendo-se este na Figura 13.

Figura 13 - Relação entre o espaçamento das placas e a eficiência de coleta



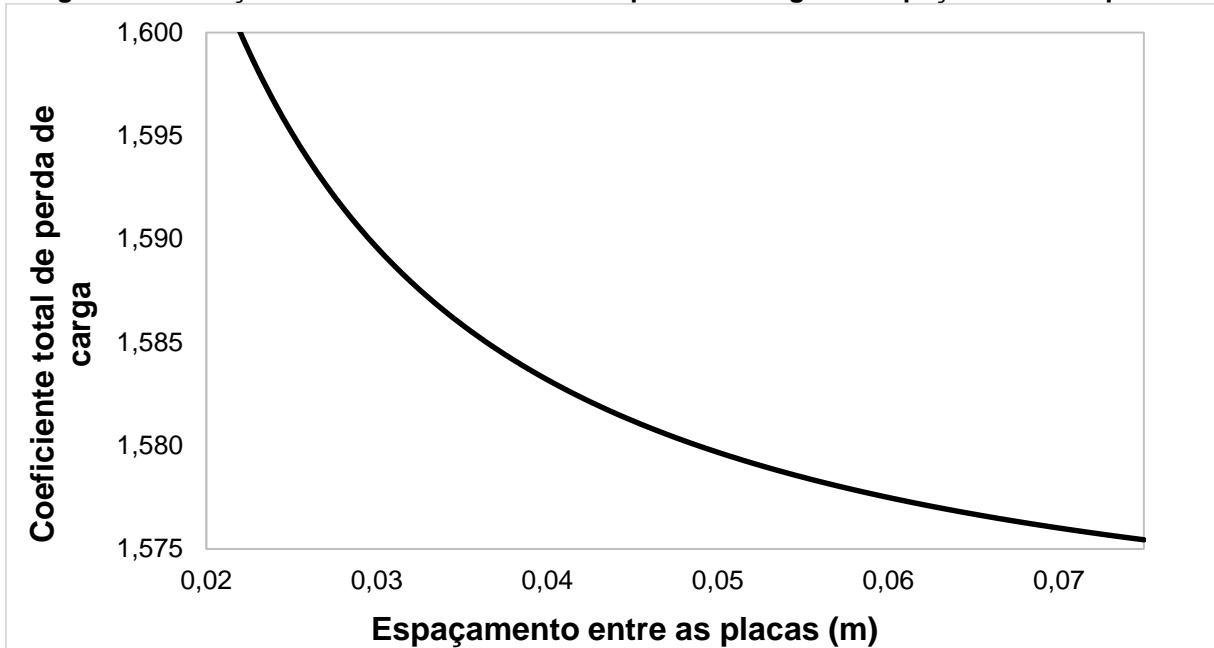
Fonte: Autoria própria (2018).

Verlaan (1991), quando discutiu como esses parâmetros afetam o desempenho do separador de arraste, notou em seus estudos que ao diminuir o espaçamento entre as placas, aumentará a eficiência de coleta. O mesmo pode ser notado ao observar a Figura 13, que quanto maior for o espaçamento entre as placas, menor será a eficiência da coleta das gotículas de açúcar.

De acordo com a teoria de Burkholz (1989), a eficiência de um separador de arraste de placa de onda pode ser calculada utilizando a Equação (5), conforme foi calculado neste trabalho. Entretanto, Azzopardi *et al.* (2000) relatou que esta equação contém algumas limitações no cálculo da eficiência de remoção e que essa equação é mais indicada para a comparação da eficiência entre separadores de arraste com diferentes espaçamentos de placa, como é mostrado na Figura 13. O mesmo comportamento foi estudo de Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011), em que construíram um gráfico de Eficiência da coleta *versus* Tamanho das gotas para diferentes espaçamentos de placa. Estes autores concluíram o mesmo observado na Figura 13, que ao diminuir o espaçamento entre as placas há um aumento na eficiência de remoção de gotículas.

Ainda em relação ao espaçamento entre as placas, construiu-se também um gráfico de Coeficiente total de perda de carga *versus* Espaçamento entre as placas (Figura 14).

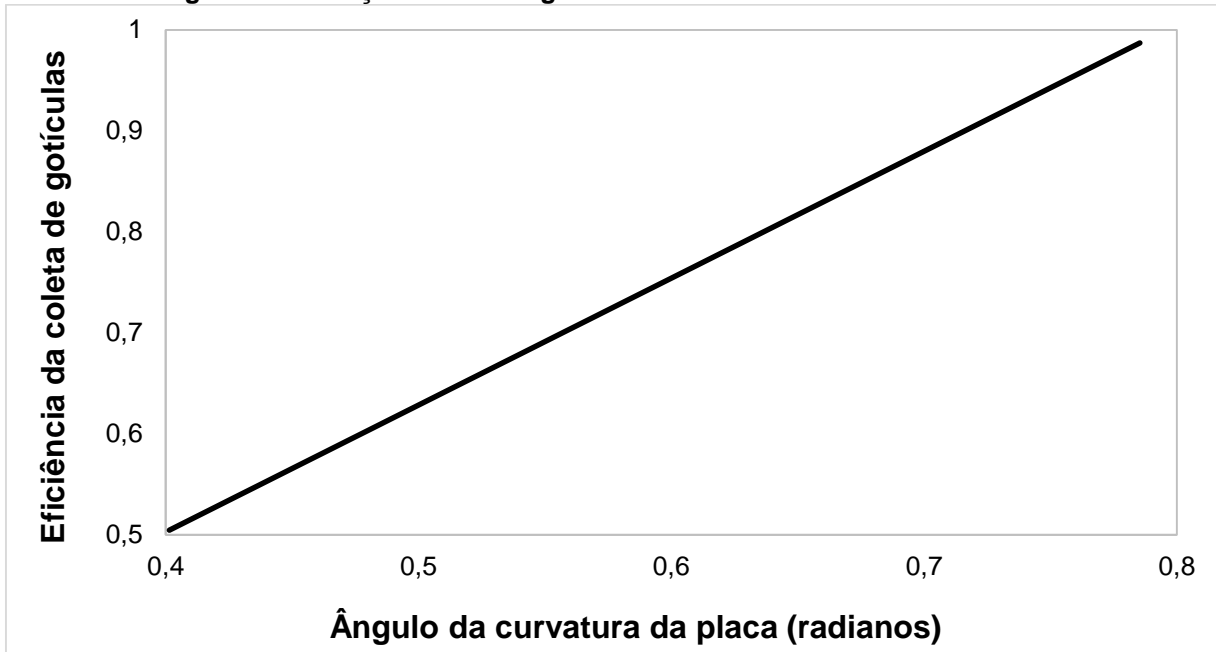
Figura 14 - Relação entre o coeficiente total de perda de carga e o espaçamento das placas



Fonte: Autoria própria (2018).

No trabalho de Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011) ainda foi observado esse comportamento por meio de gráfico e estes concluíram que o espaçamento entre placas afeta a perda de carga do fluxo de ar, pois ficou evidente que a diminuição no espaçamento resultará em uma perda de carga aumentada. Na Figura 14 pode-se observar o mesmo comportamento, que quanto maior o espaçamento entre as placas, menor será perda de carga. Ou seja, analisando a Figura 13 e 14 em conjunto, pode-se observar que aumentando o espaçamento entre placas, é fornecida uma área mais ampla para o arraste das gotículas de açúcar com o vapor e, assim, a perda de carga é reduzida, pelo fato de esse arraste ser facilitado com o aumento do espaço.

Outro parâmetro analisado foi a influência do ângulo de curvatura na eficiência de coleta, comportamento mostrado na Figura 15.

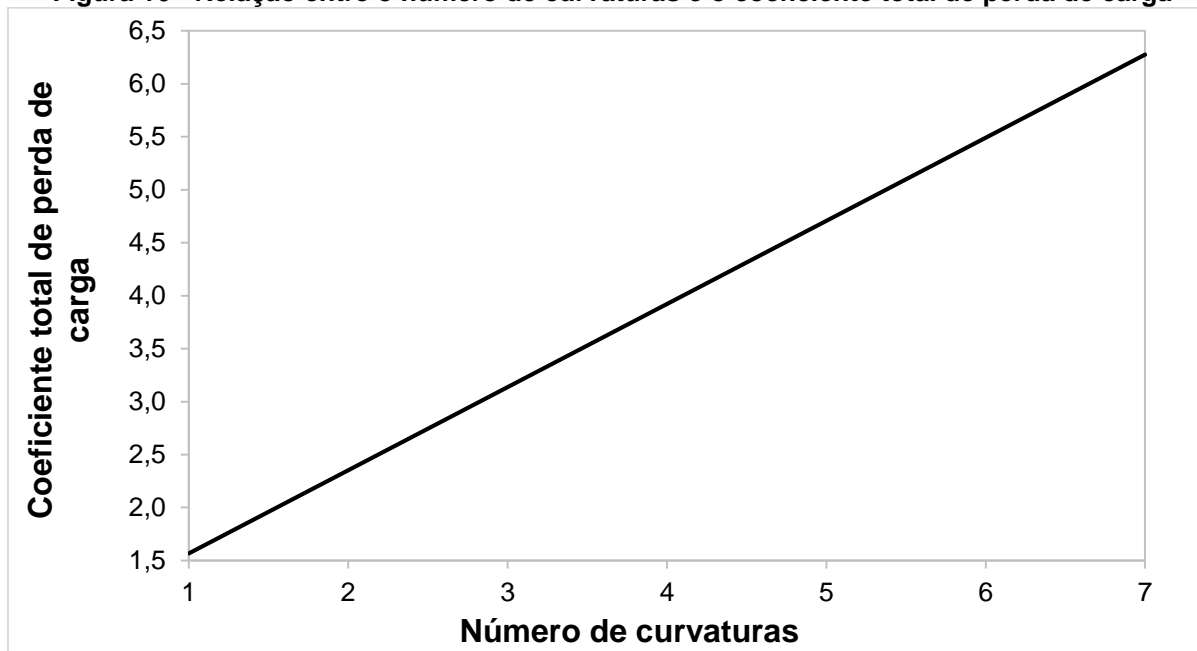
Figura 15 - Relação entre o ângulo de curvatura e a eficiência de coleta

Fonte: Autoria própria (2018).

Nesta figura pode-se observar que aumentando o ângulo de curvatura aumenta também a eficiência de coleta das gotículas de açúcar. Segundo os autores da metodologia seguida, Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011), pode-se entender que a eficiência de coleta pode ser melhorada aumentando o número de curvas em cada placa, no entanto, isso aumentará a perda de carga do fluxo de vapor. Para Narimani e Shahhoseini (2010), que investigaram o efeito do ângulo de curvatura na eficiência de separador de arraste de placa, o ângulo de curvatura leva a uma maior eficiência de separação por causa de um aumento na força centrífuga das gotas que passam nas curvas.

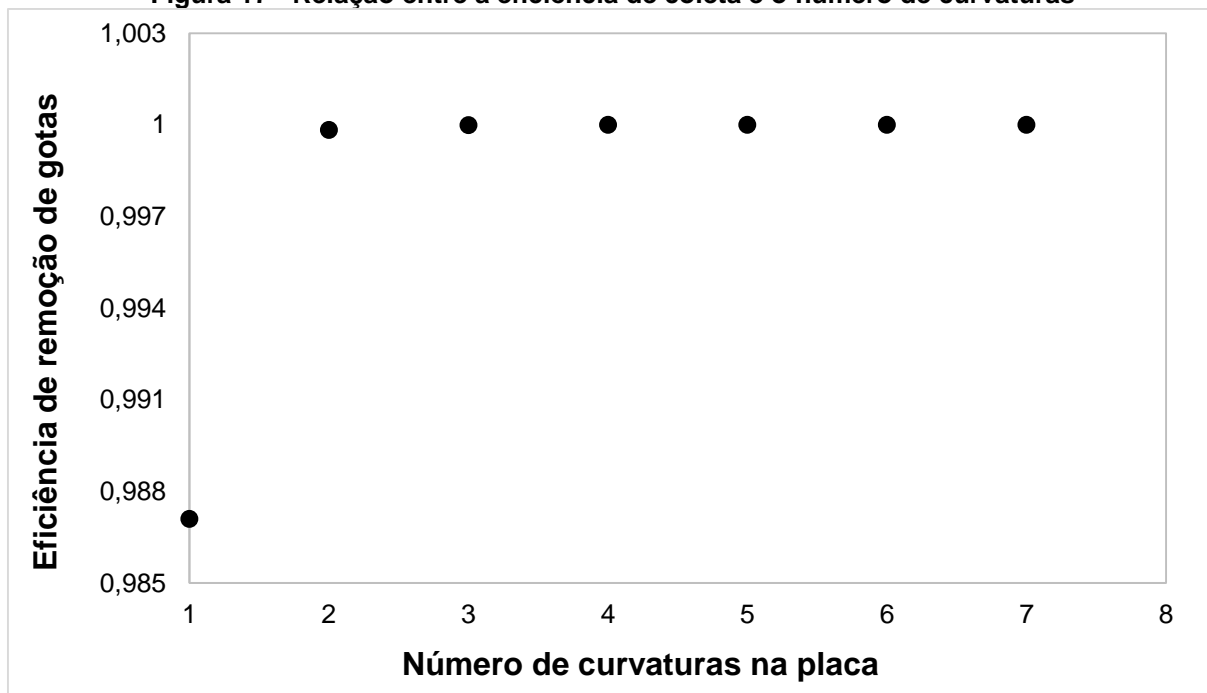
Agora, analisando as influências do número de curvaturas em relação a eficiência de coleta e a perda de carga, construiu-se um gráfico de Número de curvaturas *versus* Coeficiente total de perda de carga (Figura 16) e um de Número de curvaturas *versus* Eficiência de coleta (Figura 17).

Figura 16 - Relação entre o número de curvaturas e o coeficiente total de perda de carga



Fonte: Autoria própria (2018).

Figura 17 - Relação entre a eficiência de coleta e o número de curvaturas



Fonte: Autoria própria (2018).

Por meio destes gráficos percebe-se que a eficiência de coleta aumenta com o número de curvaturas até se manter constante no seu valor máximo, porém quanto mais curvaturas a placa tiver, maior será a perda de carga. Esse comportamento já tinha sido previsto por Banitabaei, Rahimzadeh e Rafee (2011) quando discutiram que

a eficiência de coleta pode ser melhorada ao aumentar o número de curvas em cada placa, no entanto, isso aumentará a perda de carga do fluxo de gás. Além disso, os autores provaram que aumentando o número de curvas, o tamanho do diâmetro das gotículas filtradas será menor, o que justifica o aumento da eficiência.

5.2 RESULTADOS DA ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA

Por uma planilha eletrônica criou-se a estrutura dos fluxos de caixa (Tabela 4). Na segunda coluna estão os valores do fluxo de caixa simples, o investimento inicial e o retorno por safra que o equipamento gera. Na terceira coluna, estão os valores do retorno descontados a TMA, ou seja, descontados para a data zero e, na última coluna estão os valores do saldo descontado, que é o débito do projeto com a empresa. Os valores em vermelho são os fluxos negativos, aqueles que ainda não foram recuperados.

Tabela 4 - Fluxos de caixa do investimento

FLUXO DE CAIXA DO INVESTIMENTO			
Tempo (safra)	Fluxo de caixa	Fluxo de caixa descontado	Saldo descontado
0	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00	R\$ 300.000,00
1	R\$ 202.050,00	R\$ 164.858,03	R\$ 135.141,97
2	R\$ 202.050,00	R\$ 134.512,10	R\$ 629,87
3	R\$ 202.050,00	R\$ 109.752,04	R\$ 109.122,17
4	R\$ 202.050,00	R\$ 89.549,64	R\$ 198.671,81
5	R\$ 202.050,00	R\$ 73.065,96	R\$ 271.737,77
6	R\$ 202.050,00	R\$ 59.616,48	R\$ 331.354,25

Fonte: Autoria própria (2018).

A partir desses valores, calculou-se os critérios que se pretende analisar pelos atalhos do Excel (Tabela 5).

Tabela 5 – Critérios técnico-econômico

CRITÉRIOS TÉCNICO-ECONÔMICO	
VPL	R\$ 331.354,25
TIR	64%
PAYBACK DESCONTADO	2,00 safras

Fonte: Autoria própria (2018).

O critério usado para a aceitação ou não do projeto referente a análise do valor do VPL é o seguinte: se este for maior que zero, aceita-se o projeto e se este for menor que zero, rejeita-se o projeto (COSTA, 1987). O VPL calculado foi maior que zero, isso significa que a Usina obterá um retorno maior do que seu custo de capital, ou seja, o projeto cobrirá tanto o investimento inicial, bem como a remuneração mínima exigida pelo investidor, sendo um projeto economicamente viável pelo método do Valor Presente Líquido.

Agora, fazendo a análise pela TIR, o critério usado para a definição da aceitação ou não do projeto é o seguinte: se a TIR for maior que a TMA, aceita-se o projeto e, se for menor, rejeita-se o projeto (CASAROTTO e KOPPITKE, 2000). Este critério garante que o investimento esteja obtendo, pelo menos, sua taxa requerida de retorno. Neste caso, a TIR calculada foi maior que a TMA, logo o projeto também é economicamente viável pelo método da Taxa Interna de Retorno.

Para a análise do *payback* descontado, a regra básica é que quanto maior for o tempo que a empresa precisa esperar para recuperar o investimento, maior a possibilidade de perda, então, quanto menor for este período, menor será a exposição do investimento aos riscos. No processo de decisão, o período de *payback* é comparado com o padrão estabelecido pela empresa, se o valor exceder o limite fixado, o investimento é rejeitado, caso contrário, o projeto é aceito quando o *payback* for inferior ao padrão (NETO, 1992). O valor encontrado para este método foi de 2,00 safras, ou seja, o tempo que o investimento levará para se pagar é de duas safras (dois anos), tempo considerado pequeno para a espera de retorno, aumentando a segurança para o investimento. O padrão estabelecido pela Usina foi de no máximo dois para o *payback* e, como o calculado neste trabalho apresentou o mesmo valor que o padrão, o projeto é aceito.

6 CONCLUSÃO

Uma metodologia foi seguida para estudar a eficiência e a perda de carga de um separador de arraste de placa com valores reais obtidos de uma Usina Sucroalcooleira. Foram obtidos ótimos resultados, pois o valor encontrado para a eficiência foi próximo de 100%, indicando um bom rendimento, e o valor para a perda de carga foi próximo do esperado pelo fabricante do equipamento, indicando que as considerações e os cálculos realizados foram coerentes.

Há vários autores na literatura que estudaram este equipamento, porém, eles se dedicaram mais em estudos relacionados ao fluxo do vapor e em simulações para analisar o comportamento deste vapor entre as placas. Já neste trabalho, a análise realizada para os parâmetros eficiência e perda de carga foi baseada nos dados geométricos do equipamento, além de analisar o comportamento destes parâmetros em função da variação desses dados geométricos, ou seja, em função da variação do espaçamento, do número de curvaturas e do ângulo destas curvaturas nas placas.

O espaçamento das placas foi variado usando uma faixa de valores e, com isso, percebeu-se que com o aumento desse espaçamento conseqüentemente houve uma diminuição da perda de carga e também da eficiência de remoção das gotículas. Em relação a variação do ângulo de curvatura, observou-se que com o seu aumento houve uma melhora na eficiência, porém, aumentou também a perda de carga. E, para as variações do número de curvaturas obteve-se que quanto mais curvaturas houver nas placas, melhor será a eficiência, entretanto, aumentará também a perda de carga.

Uma análise econômico-financeira também foi realizada, analisando três decisões de investimento. Pelo critério Valor Presente Líquido (VPL) obteve-se um valor positivo, o qual indica que o investimento será recuperado ao longo do tempo e ainda haverá um ganho. Pela Taxa Interna de Retorno (TIR) obteve-se um valor maior que a Taxa Mínima de Atratividade (TMA), demonstrando que o projeto irá gerar um retorno maior que o percentual mínimo. Para o período *Payback* descontado foi encontrado um período de duas safras, que é exatamente o período máximo exigido pela Usina para o investimento inicial se pagar.

A partir dos dados obtidos por esses três critérios analisados, pode-se concluir que o projeto é economicamente viável, sendo também um projeto seguro, pelo fato

do curto período para o retorno do seu investimento, diminuindo a probabilidade de riscos ao longo do tempo.

7 SUGESTÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

Cabe ressaltar que, a partir dos resultados apresentados e, ainda, diante do que se tem a explorar sobre o tema, há a possibilidade de futuros estudos mais abrangentes.

Como sugestão para novas pesquisas, cita-se a inclusão de outros métodos de cálculos para a obtenção da eficiência e da perda de carga.

Como não se fez um estudo do fluxo do vapor, é interessante o uso de *softwares* de simulação de fluidodinâmica, como o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), para validar os resultados obtidos, assim como os dados e os cálculos utilizados neste trabalho. Principalmente para validar o cálculo da perda de carga, que apesar do desvio deste com o esperado não ser relativamente grande, fez-se necessário utilizar um outro valor para a realização deste trabalho.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, Micaela de Freitas. **Dimensionamento de Vasos Separadores de Petróleo**. 2014. 37 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Engenharia de Petróleo) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2014.

ARAUJO, Edilaine da Silva; SANTOS, Juliana Agustineli Pereira. **O Desenvolvimento da Cultura da Cana-de-Açúcar no Brasil e sua Relevância da Economia Nacional**. [201-]. Artigo publicado. Curso de Administração. Faculdade de Colíder - FACIDER. Colíder - Mato Grosso.

AZZOPARDI, B.J. *et al.* **Performance of Wave Plate Demisters**. Conf. On Multiphase Flows in Industrial Plants, Itália, 2000.

BARBOSA, Ronaldo dos Reis et al. **Histórico do setor sucroalcooleiro no Brasil: Implantação de uma usina alcooleira em Bambuí-MG**. 2011. Disponível em: <https://www.bambui.ifmg.edu.br/jornada_cientifica/2011/resumos/outras/53.pdf>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

BANITABAEI, Sayed Abdolhossein; RAHIMZADEH, Hassan; RAFE, Roohollah. Determination of minimum pressure drop at different plate spacings and air velocity in a wave-plate mist eliminator. **Asia-Pacific Journal Of Chemical Engineering**, Iran, 2011, 10.1002/apj.611.

BIODIESEL. **Uma fonte renovável de energia**. 2010. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

BIRD, R. Byron; STEWART, Warren E. **Fenômenos de Transporte**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2014.

BURKHOLZ, A. **Droplet Separation**. Nova York: VCH, 1989.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Expansão da cana-de-açúcar**. 2008. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Projeções do Agronegócio Brasileiro período de 2009 a 2020**. 2009. Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

CALVERT, S; JASHNANI, I. L.; YUNG, S. Entrainment Separators for Scrubbers, **Journal of the Air Pollution Control Association**, Canadá, 1974, 967–975.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITCKE, Bruno H. **Análise de Investimentos**. 9. ed. São Paulo: Atlas, 2000.

CASTRO, Sebastião Beltrão de; ANDRADE, Samara Alvachian Cardoso. **Tecnologia do Açúcar**. 1. ed. Recife: Editora Universitária, 2007.

CORBINI, Leticia Xavier. **Granular em Escala Bancada para Remoção de Particulados Oriundos da Gaseificação/Combustão de Carvões**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2012.

COSTA, Paulo Henrique S.; ATTIE, Eduardo V. **Análise de Projetos**. Rio de Janeiro: Editora da Fundação Getúlio Vargas, 1987.

CHIARADIA, A. **Utilização do indicador de eficiência global dos equipamentos na gestão de melhoria contínua dos equipamentos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Escola de Engenharia. Porto Alegre, 2004.

EICK, Guilherme. **Viabilidade Econômica e Financeira de uma Pequena Central Hidrelétrica no Brasil**. 2010. 69 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso de Ciências Econômicas) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

GALLETTI, Chiara; BRUNAZZI, Elisabetta; TOGNOTTI, Leonardo. A model for liquid film flow and separation in a wave-plate mist eliminator. **Chemical Engineering Science Journal**, Itália, 2008, 63, 5639–5652.

GRUPO MORENO. **Açúcar cristal branco**. Disponível em: <<http://www.usinamoreno.com.br/produtos/14/25/A%C3%A7%C3%BAcar>>. Acesso em: 31 de agosto de 2017.

MACHADO, Gleysson B. **Fabricação de Açúcar e Etanol a partir da Cana-de-açúcar**. 2014. Disponível em: <<http://www.portaldobiogas.com/fabricacao-de-acucar-e-etanol-partir-da-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

MINAS GERAIS. Federação da Agricultura. **Safra agrícola de Minas Gerais**. 2008. Disponível em: <<http://www.faemg.org.br>>. Acesso em: 26 de agosto de 2017.

MUNTERS BRASIL. **Eliminador de Gotas de Fluxo Vertical**: catálogo. Curitiba, 2004.

NARIMANI, E.; SHAHHOSEINI, S. Optimization of vane mist eliminators. **Applied Thermal Engineering**, Iran, 2011, 188e193.

NOVA CANA. **Como é feito o processamento da cana-de-açúcar nas usinas**. Revista Nova Cana. São Paulo: Editora Copyright, 2017. Disponível em: <<https://www.novacana.com/usina/como-e-feito-processamento-cana-de-acucar/>>. Acesso em: 31 de agosto de 2017.

NETO, Alexandre Assaf. **Os métodos quantitativos de análise de investimentos**. 1992. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-92511992000300001>. Acesso em: 29 de abril de 2018.

PRATES, Wladimir. **Engenharia econômica: payback, valor presente líquido (VPL) e taxa interna de retorno (TIR)**. 2016. Disponível em: <<http://www.wrprates.com/engenharia-economica-payback-valor-presente-liquido-vpl-e-taxa-interna-de-retorno-tir/>>. Acesso em: 28 de abril de 2018.

REIN, Peter. **Engenharia do Açúcar de Cana**. São Paulo: Editora Bartens, 2013.

REUNION ENGENHARIA. **Curso de Evaporação de Caldo**. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/doc/42713571/Evaporacao>>. Acesso em: 03 de setembro de 2017.

RIBEIRO, Carlos A. F.; BLUMER, Solange A. B.; HORII, Jorge. **Fundamentos De Tecnologia Sucroalcooleira: Tecnologia Do Açúcar**. 1999. Disponível em: <https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/1874954/mod_resource/content/1/apostila%20a%C3%A7ucar.pdf>. Acesso em: 01 de setembro de 2017.

RIBEIRO, Paulo Roberto. **A Usina de Açúcar e sua Automação**. 2. ed. São Paulo: Editora Copyright, 2003.

VERLAAN, Cornelis Christoffel Johannes. **Performance of Novel Mist Eliminators**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Delft University of Technology. Holanda, 1991.

WILKINSON, D. Optimizing the design of waveplates for gas-liquid separation. **IMechE Journal**, Reino Unido, 1999, 213(4), 265–274.

ZANZARINI, R. M. et al. **A Expansão da cana-de-açúcar no Triângulo Mineiro.**
Uma Análise das Alterações de Cultivo. Araguari. 2008.

ANEXO A – EFICIÊNCIA E PERDA DE CARGA

Diâmetro da gota (m)	0,000016	Eficiência para uma curva (η_b)	0,9871
Densidade da gota (kg/m³)	1392	Eficiência da coleta (η)	0,9871
Viscosidade do vapor (kg/m s)	0,00001074	Reynolds	4953,0726
Velocidade do vapor por placa(m/s)	15	Perda de carga (Pa)	326,4301
Tamanho da curvatura (m)	0,214	<p>Quantidade de placas 1430/22,8 = 62</p> <p>A (mm²) 1430*1451 = 2074930 mm²</p> <p>Área total descontando área das placas (mm²) 2074930-(0,008*1451*62) = 2002960,4</p> <p>A (m²) 2,0029604</p> <p>V (m/s) (18000/(0,1612*2,0029604))/3600 = 15</p>	
Densidade do vapor (kg/m³)	0,1612		
Ângulo (rad)	0,785398		
Espaçamento (m)	0,022		
n	1		
Vazão do vapor (T/h)	18		

ANEXO B – EFICIÊNCIA VERSUS ESPAÇAMENTO

Diâmetro da gota (m)	Espaçamento (m)	Eficiência para uma curva com S variando	Eficiência da coleta
0,000016	0,022	0,9871	0,9871
	0,023	0,9442	0,9442
Densidade da gota (kg/m³)	0,024	0,9048	0,9048
1392	0,025	0,8686	0,8686
	0,026	0,8352	0,8352
Viscosidade do vapor (kg/m s)	0,027	0,8043	0,8043
0,00001074	0,028	0,7756	0,7756
	0,029	0,7488	0,7488
Velocidade do vapor (m/s)	0,03	0,7239	0,7239
15	0,031	0,7005	0,7005
	0,032	0,6786	0,6786
Tamanho da curvatura (m)	0,033	0,6581	0,6581
0,214	0,034	0,6387	0,6387
	0,035	0,6205	0,6205
Ângulo (rad)	0,036	0,6032	0,6032
0,785398	0,037	0,5869	0,5869
	0,038	0,5715	0,5715
n	0,039	0,5568	0,5568
1	0,04	0,5429	0,5429
	0,041	0,5297	0,5297
	0,042	0,5171	0,5171
	0,043	0,5050	0,5050
	0,044	0,4935	0,4935
	0,045	0,4826	0,4826
	0,046	0,4721	0,4721
	0,047	0,4620	0,4620
	0,048	0,4524	0,4524
	0,049	0,4432	0,4432
	0,05	0,4343	0,4343
	0,051	0,4258	0,4258
	0,052	0,4176	0,4176
	0,053	0,4097	0,4097
	0,054	0,4022	0,4022
	0,055	0,3948	0,3948
	0,056	0,3878	0,3878
	0,057	0,3810	0,3810
	0,058	0,3744	0,3744
	0,059	0,3681	0,3681
	0,06	0,3619	0,3619
	0,061	0,3560	0,3560
	0,062	0,3503	0,3503
	0,063	0,3447	0,3447
	0,064	0,3393	0,3393
	0,065	0,3341	0,3341
	0,066	0,3290	0,3290
	0,067	0,3241	0,3241
	0,068	0,3194	0,3194
	0,069	0,3147	0,3147
	0,07	0,3102	0,3102
	0,071	0,3059	0,3059
	0,072	0,3016	0,3016
	0,073	0,2975	0,2975

0,074	0,2935	0,2935
0,075	0,2895	0,2895

ANEXO C – EFICIÊNCIA VERSUS ÂNGULO

Diâmetro da gota (m)	Ângulo (rad)	Eficiência da coleta	Eficiência para uma curva com \hat{A} variando
0,000016	0,401426	0,5045	0,5045
	0,418879	0,5265	0,5265
Densidade da gota (kg/m³)	0,436332	0,5484	0,5484
1392	0,453786	0,5703	0,5703
	0,471239	0,5923	0,5923
Viscosidade do vapor (kg/m s)	0,488692	0,6142	0,6142
0,00001074	0,506145	0,6361	0,6361
	0,523599	0,6581	0,6581
Velocidade do vapor (m/s)	0,541052	0,6800	0,6800
15	0,558505	0,7019	0,7019
	0,575959	0,7239	0,7239
Tamanho da curvatura (m)	0,593412	0,7458	0,7458
0,214	0,610865	0,7677	0,7677
	0,628319	0,7897	0,7897
Espaçamento (m)	0,645772	0,8116	0,8116
0,022	0,663225	0,8336	0,8336
	0,680678	0,8555	0,8555
n	0,698132	0,8774	0,8774
1	0,715585	0,8994	0,8994
	0,733038	0,9213	0,9213
	0,750492	0,9432	0,9432
	0,767945	0,9652	0,9652
	0,785398	0,9871	0,9871

ANEXO D – COEFICIENTE DE PERDA DE CARGA *VERSUS* CURVATURA

Viscosidade do vapor (kg/m s)	n	Coefficiente de perda de carga (Cp)
0,00001074	1	1,5693
Densidade do vapor (kg/m³)	2	2,3539
0,1612	3	3,1385
Espaçamento (m)	4	3,9232
0,022	5	4,7078
Ângulo (rad)	6	5,4924
0,785398	7	6,2771
Velocidade do vapor (m/s)		
15		
Reynolds		
4953,072626		
Tamanho da curvatura (m)		
0,214		
Cpb		
0,499513128		
Cps		
1,85873E-06		

ANEXO E – PERDA DE CARGA *VERSUS* ESPAÇAMENTO

Viscosidade do vapor (kg/m s)	Espaçamento (m)	Reynolds	Cps	Coefficiente de perda de
0,00001074	0,019	4277,6536	0,0187	1,60668
	0,02	4502,7933	0,0175	1,60419
Densidade do vapor (kg/m³)	0,021	4727,9330	0,0164	1,60197
0,1612	0,022	4953,0726	0,0154	1,59999
	0,023	5178,2123	0,0145	1,59821
Velocidade do vapor (m/s)	0,024	5403,3520	0,0137	1,59661
15	0,025	5628,4916	0,0129	1,59516
	0,026	5853,6313	0,0123	1,59384
Tamanho da curvatura (m)	0,027	6078,7709	0,0117	1,59264
0,214	0,028	6303,9106	0,0111	1,59154
	0,029	6529,0503	0,0106	1,59053
Cpb	0,03	6754,1899	0,0102	1,58959
0,499513128	0,031	6979,3296	0,0097	1,58873
	0,032	7204,4693	0,0093	1,58793
Ângulo (rad)	0,033	7429,6089	0,0090	1,58719
0,785398	0,034	7654,7486	0,0086	1,58650
	0,035	7879,8883	0,0083	1,58585
n	0,036	8105,0279	0,0080	1,58525
1	0,037	8330,1676	0,0077	1,58468
	0,038	8555,3073	0,0074	1,58415
	0,039	8780,4469	0,0072	1,58366
	0,04	9005,5866	0,0070	1,58319
	0,041	9230,7263	0,0067	1,58274
	0,042	9455,8659	0,0065	1,58233
	0,043	9681,0056	0,0063	1,58193
	0,044	9906,1453	0,0061	1,58156
	0,045	10131,2849	0,0060	1,58120
	0,046	10356,4246	0,0058	1,58086
	0,047	10581,5642	0,0056	1,58054
	0,048	10806,7039	0,0055	1,58024
	0,049	11031,8436	0,0053	1,57995
	0,05	11256,9832	0,0052	1,57967
	0,051	11482,1229	0,0051	1,57941
	0,052	11707,2626	0,0049	1,57916
	0,053	11932,4022	0,0048	1,57891
	0,054	12157,5419	0,0047	1,57868
	0,055	12382,6816	0,0046	1,57846
	0,056	12607,8212	0,0045	1,57825
	0,057	12832,9609	0,0044	1,57805
	0,058	13058,1006	0,0043	1,57785
	0,059	13283,2402	0,0042	1,57766
	0,06	13508,3799	0,0041	1,57748
	0,061	13733,5196	0,0040	1,57731
	0,062	13958,6592	0,0039	1,57714
	0,063	14183,7989	0,0039	1,57698
	0,064	14408,9385	0,0038	1,57683
	0,065	14634,0782	0,0037	1,57668
	0,066	14859,2179	0,0036	1,57653
	0,067	15084,3575	0,0036	1,57640
	0,068	15309,4972	0,0035	1,57626
	0,069	15534,6369	0,0034	1,57613
	0,07	15759,7765	0,0034	1,57600
	0,071	15984,9162	0,0033	1,57588

0,072	16210,0559	0,0032	1,57577
0,073	16435,1955	0,0032	1,57565
0,074	16660,3352	0,0031	1,57554
0,075	16885,4749	0,0031	1,57543

ANEXO F – EFICIÊNCIA *VERSUS* CURVATURAS

Diâmetro da gota (m)	n	Eficiência para uma curva (η_b)	Eficiência da coleta com n variando (η)
0,000016	1	0,9871	0,9871
	2		0,9998
Densidade da gota (kg/m³)	3		1,0000
1392	4		1,0000
	5		1,0000
Viscosidade do vapor (kg/m s)	6		1,0000
0,00001074	7		1,0000
Velocidade do vapor (m/s)			
15			
Ângulo (rad)			
0,785398			
Espaçamento (m)			
0,022			

ANEXO G – ANÁLISE ECONÔMICA-FINANCEIRA

Custo	Benefício
R\$300.000,00	R\$202.050,00

Tempo (safra)	Fluxo de caixa	Saldo	Fluxo descontado	Saldo descontado
0	-R\$ 300.000,00	-R\$ 300.000,00	-R\$300.000,00	-R\$300.000,00
1	R\$ 202.050,00	-R\$ 97.950,00	R\$164.858,03	-R\$135.141,97
2	R\$ 202.050,00	R\$ 104.100,00	R\$134.512,10	-R\$629,87
3	R\$ 202.050,00	R\$ 306.150,00	R\$109.752,04	R\$109.122,17
4	R\$ 202.050,00	R\$ 508.200,00	R\$89.549,64	R\$198.671,81
5	R\$ 202.050,00	R\$ 710.250,00	R\$73.065,96	R\$271.737,77
6	R\$ 202.050,00	R\$ 912.300,00	R\$59.616,48	R\$331.354,25

i a.a	22,56%
TIR	64%
VPL	R\$ 331.354,25
Pay back simples	1,48
Pay back descontado	2,00