



UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE ACADÊMICA
COORDENAÇÃO GERAL DE PÓS-GRADUAÇÃO
MESTRADO EM DESENVOLVIMENTO DE PROCESSOS AMBIENTAIS

Aziel Alves de Arruda

**OTIMIZAÇÃO DE UM HIDROCICLONE UTILIZADO NA
SEPARAÇÃO DE UMA MISTURA LÍQUIDO-LÍQUIDO**

Recife

2008

Aziel Alves de Arruda

**OTIMIZAÇÃO DE UM HIDROCICLONE UTILIZADO NA
SEPARAÇÃO DE UMA MISTURA LÍQUIDO-LÍQUIDO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento em Processos Ambientais da Universidade Católica de Pernambuco.

Área de Concentração: **Desenvolvimento em Processos Ambientais**

Linha de Pesquisa: Modelagem, e Otimização de Processos

Orientador: Prof. Dra. Eliane Cardoso de Vasconcelos

Co-orientador: Prof. Dr. Valdemir Alexandre dos Santos

Recife

2008

A779o

Arruda, Aziel Alves de

Otimização de um hidrociclone utilizado na separação de uma mistura líquido-líquido / Aziel Alves de Arruda ; orientador Eliane Cardoso de Vasconcelos ; co-orientador Valdemir Alexandre dos Santos, 2008.

40 f. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de Pernambuco. Pró-reitoria Acadêmica. Coordenação Geral de Pós-Graduação. Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais, 2008.

1. Centrifugação. 2. Separação (Processos). 3. Processos químicos. 4. Biodiesel. I. Título

CDU 66.066

COMISSÃO EXAMINADORA

Profa. Dra. Eliane Cardoso de Vasconcelos (Orientadora)
Universidade Católica de Pernambuco, Recife-PE

Prof. Dr. Carlos Costa Dantas
Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE

Prof. Dr. Francisco Luiz dos Santos
Universidade Católica de Pernambuco, Recife-PE

Dedico aos meus pais pela educação que me deram e
pela pessoa que hoje eu sou

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a DEUS, por concluir este trabalho.

À Prof^a. Dr^a. Eliane Cardoso de Vasconcelos pela orientação e oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Prof. Dr Valdemir Alexandre dos Santos pela co-orientação e os momentos de orientações a mim dedicados.

À Prof^a. Dr^a. Galba Maria de Campos Takaki, pelo apoio, atenção e dedicação ao programa, e por ter me ajudado em todos os momentos em que precisei.

Aos colegas de trabalho da seção de matemática do Colégio Militar do Recife, pela amizade e colaboração, no transcorrer deste trabalho, e por todos os momentos em que convivemos.

Aos meus colegas do Mestrado pelos momentos gratificantes.

Aos professores do Mestrado em Desenvolvimento de Processos Ambientais.

À Universidade Católica de Pernambuco, pelo acesso e utilização das instalações do laboratório de Engenharia Química.

Ao Comando do Colégio Militar do Recife.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	i
LISTA DE TABELAS	ii
LISTA DE SÍMBOLOS	iii
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
CAPÍTULO 1	6
1. 1 INTRODUÇÃO	7
1.2 OBJETIVOS	9
1. 2. 1 Objetivo Geral	9
1. 2. 2 Objetivos Específicos.....	9
1.3 REVISÃO DA LITERATURA.....	10
1.3.1 Hidrociclones	10
1.3.2 Classificação dos hidrociclones	12
1.3.3 Desempenho em hidrociclones.....	14
1.3.4 Variáveis relevantes no estudo de hidrociclones.....	15
1.3.7 Estabilidade da mistura biodiesel-glicerina	18
1.3.8 Parâmetros de otimização	21
1.4 Referências Bibliográficas.....	23
CAPÍTULO 2	27
Resumo	28
Introdução	29
Material e Métodos	30
Resultados e Discussão	35
Conclusões	37
Referências Bibliográficas.....	38

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Trajetória da suspensão no interior do hidrociclone	11
Figura 1.2	Esquema com a disposição dos componentes de um hidrociclone	12
Figura 1.3	Esquema da reação de um triglicerídeo genérico com o metanol	17
Figura 1.4	Esquema da representação do dodecilbenzenossulfonato de sódio (princípio ativo dos detergentes domésticos) e de uma micela	20
<i>Artigo</i>		
Figura 1	Componentes básicos de um ciclone adaptado de Rietema (1961)	30
Figura 2	Correlações para projeto de hidrociclones adaptado de Rietema (1961)	32

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1	Relações geométricas para Hidrociclones das famílias Krebs, Rietema e Bradley	13
	<i>Artigo</i>	
Tabela 1	Dimensões e parâmetros operacionais do hidrociclone fornecidos pela Planilha 1 em condições não otimizadas	36
Tabela 2	Dimensões e parâmetros operacionais e de dimensionamento do hidrociclone em condições otimizadas e fornecidos pela Planilha 2	36

LISTA DE SÍMBOLOS

D_i	Diâmetro de uma partícula
D_c	Diâmetro da parte cilíndrica
D_0	Diâmetro do tubo alimentação
L	η Comprimento do hidrociclone
L_1	Diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone
l	Comprimento do vórtex
D_v	Diâmetro do duto de suspensão concentrada
v	Velocidade de ascensão da gota de óleo
g	Aceleração da gravitacional
D_0	Diâmetro da gota do óleo
$\rho_w - \rho_0$	Diferença entre massas específicas da água e do óleo
C_T	Custo total
C_C	Custo capital ou custo fixo
COP	Custo operacional
α	Constante de custo
W	Peso do equipamento
α'	Parâmetro de ajuste do modelo de custo às leis de mercado
η	Eficiência de recuperação do material pelo equipamento
C_d	Custo do material não recuperado
ΔP	Queda de pressão através do hidrociclone
C_{el}	Custo da unidade de consumo de energia
ξ	Fator dimensional que depende do tipo de hidrociclone

RESUMO

A purificação do biodiesel originado do processo de produção por transesterificação de óleos e gorduras requer a remoção de resíduos de glicerina. Como metodologia de cálculos correlações que dão origem a diagramas de dimensionamento foram transformados em modelos matemáticos envolvendo importantes números adimensionais. Apresenta-se uma estratégia de separação da glicerina dispersa no biodiesel utilizando um hidrociclone otimizado da família Rietema. Foram simuladas e analisadas as condições de separação da mistura biodiesel-glicerina, etapa integrante do processo de produção desse biocombustível por transesterificação de óleos e gorduras, em condições operacionais otimizadas e não otimizadas. A estratégia de otimização foi o uso de correlações econômicas e geométricas, as quais levaram à obtenção de um custo mínimo. Uma das etapas mais importante do processo de produção de biodiesel é a de sua purificação. Um hidrociclone do tipo convencional foi proposto para a referida etapa. A estratégia usada para elaboração da função objetivo foi composta de três termos: custo de aquisição, custo de operação e o custo associado a não coleta do biodiesel, todas como função do diâmetro do equipamento. Como programas de cálculos para dimensionamento e otimização foram utilizadas a planilha eletrônica Excel e sua ferramenta solver. Os resultados mostraram que a estratégia e otimização forneceram valores de dimensionamento muito próximos dos de condição não otimizadas, demonstrando que a mesma pode ser utilizada como reforço, numa época em que os critérios econômicos são importantes justificativas de investimentos nas melhorias dos processos produtivos.

Palavras-chave: Separação centrífuga, função objetivo, hidrociclone líquido-líquido, Biodiesel.

ABSTRACT

The purification of biodiesel of the production process by transesterification of oils and fats require the removal of glycerin waste. It presents a strategy for separation of glycerin dispersed in biodiesel using an optimized hydrocyclone of the Rietema family. As calculation methodology correlations that lead to the sizing diagrams were converted into mathematical models involving significant dimensionless numbers. It presents a strategy for separation of glycerin dispersed in biodiesel using an optimized hydrocyclone of the Rietema family. They had been simulated and analyzed the conditions of separation of the mixture biodiesel-glycerin, integrant stage of the process of production of this biofuel of separation of oils and fats, in optimized and not optimized operational conditions. The optimization strategy was the use of economic and geometric correlations, which had led to the attainment of a minimum cost. One of the stages most important of the process of production of biodiesel is of its purification. One hidrociclone of the conventional type was considered for the related stage. The used strategy for elaboration of the objective function was composed of three terms: cost of acquisition, cost of operation and the associated cost does not collect of biodiesel, all as function of the diameter of the equipment. As programs of calculations for sizing and optimization the electronic spread sheet Excel and its tool had been used to solve. The results had shown that the strategy and optimization had supplied values of not optimized sizing very next to the ones of condition, demonstrating that the same one can be used as reinforcement, at a time where the economic criteria are important justifications of investments in the improvements of the productive processes.

Key words: Centrifugal separation, objective function, liquid-liquid hydrocyclone, biodiesel.

CAPÍTULO 1

1. 1 INTRODUÇÃO

Difícilmente qualquer reação química, incluindo a transesterificação, consegue ser completa e, por isso, os produtos pretendidos da reação (neste caso os ésteres) encontram-se contaminados com outros compostos. Esses compostos podem ser os triglicerídeos que não reagiram, metanol/etanol, catalisador (MENEGETTI, 2004), mono e diglicerídeos, sabão e glicerol. Por esta razão, após a transesterificação é necessária a existência de uma etapa de purificação (VARGAS et al., 1998).

Após a reação de transesterificação de óleos vegetais para obtenção do biodiesel existem dois produtos principais: a glicerina e os ésteres. Estes dois produtos têm densidades diferentes, pelo que a fase mais densa, a glicerina, pode ser separada por gravidade da fase menos densa, os ésteres, por decantação. Como alternativa à decantação pode ser utilizada uma centrifugação para separar estes dois compostos, sendo esta uma operação mais rápida e também de maior custo. A glicerina arrasta consigo a maior parte do sabão, do catalisador e do metanol/etanol. Por último, os ésteres devem ainda serem lavados. O biodiesel sofre então uma etapa de secagem antes de ser enviado para armazenagem. Em alguns sistemas, procede-se ainda à destilação do biodiesel com vista à obtenção de um produto de maior pureza (KINAST, 2003).

O objetivo da lavagem do biodiesel no processo de transesterificação é retirar o excesso de catalisador, metanol/etanol e glicerina que podem permanecer na fase de biodiesel. A glicerina pode existir na sua forma livre ou conjugada com ácidos graxos. Do ponto de vista do processo, o fator mais importante é a qualidade de separação entre as duas fases, ou seja, a capacidade de remover as impurezas do biodiesel. A maior ou menor dificuldade de separação das fases nesta etapa está associada à formação de emulsões durante a agitação da fase aquosa com a fase orgânica.

Na exploração de petróleo em alto-mar, uma fração de água salgada é retirada do poço junto com o petróleo. A corrente do poço é enviada a um separador, onde esta água é separada do óleo e gás. Muitas vezes ela ainda contém um teor de óleo disperso acima do limite estabelecido pelos órgãos de controle ambiental;

devendo ser tratada antes do descarte para evitar a poluição marinha (PÉCORA, 2002).

Os hidrociclones são equipamentos de separação que apresentam elevadas capacidades, parecendo indicados no tratamento do efluente envolvendo mistura líquido-líquido. O uso do hidrociclone hoje é considerado uma alternativa viável e atraente do ponto de vista econômico, onde o mesmo apresenta inúmeras vantagens em relação a outros meios de sua categoria , com baixo custo para sua aquisição, instalação e manutenção.

Várias pesquisas e estudos foram desenvolvidas sobre o uso do hidrociclone e sua eficiência no uso de determinadas áreas, onde pode –se observar uma necessidade de um aperfeiçoamento de novas tecnologias para determinados tipos de tratamentos. Os hidrociclones são agrupados em famílias, de acordo com as relações entre suas dimensões sendo bastante estudadas e utilizadas as famílias de Rietema e de Bradley, observa-se que cada família possui características próprias.

Em função da disponibilidade de instalações no laboratório de Engenharia Química da UNICAP, pretende-se a realização de experimentos com o objetivo de otimizar condições operacionais de um hidrociclone para separação da mistura biodiesel-glicerina (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 1995). Este tipo de estudo faz parte de uma etapa de testes para definição de métodos de técnicas de separação da referida mistura em uma unidade de purificação de biodiesel, voltada para a redução de efluentes originados no processo de transesterificação convencional.

1.2 OBJETIVOS

1. 2. 1 Objetivo Geral

Desenvolver uma estratégia para otimizar hidrociclones líquido-líquido para serem utilizados na etapa de separação da mistura biodiesel glicerina, como estratégia para reduzir o volume de efluentes na produção de biodiesel por transesterificação de ácidos graxos. .

1. 2. 2 Objetivos Específicos

- Obter dados da literatura para a caracterização de um hidrociclone líquido-líquido e a mistura biodiesel-glicerina.
- Definir variáveis relevantes para o processo de separação por hidrociclone..
- Elaborar uma função objetivo para otimização das condições técnicas e econômicas de um hidrociclone líquido-líquido.
- Simular as condições operacionais otimizadas do hidrociclone para diferentes situações de composição da mistura biodiesel-glicerina.

1.3 REVISÃO DA LITERATURA

1.3.1 Hidrociclones

Os ciclones estão entre os mais antigos tipos de equipamento da indústria de particulados. Patenteados e conhecidos desde o final do século XIX, quando eram apenas empregados na remoção de areia de águas, eles tem sido bastantes utilizados em diferentes processos industriais, tais como separação no processo físico e reações químicas. Os hidrociclones são dispositivos cônicos, cilíndricos, utilizados na separação dos tipos sólido-líquido e líquido-líquido (SAVAROSVSKY, 1984).

Os hidrociclones, também conhecidos pelos nomes de ciclone hidráulico, ciclone de líquido e hidroclone, constituem uma classe importante de equipamentos destinados principalmente à separação de suspensões sólido-líquido (CASTILHO; MEDRONHO, 2000), porém hoje eles são usados para a separação sólidos-sólidos (KLIMA; KIM, 1998), líquido-líquido (SMYT; THEW, 1996) e gás-líquido (MARTE, 1996), onde o mesmo vêm sendo usado de maneira diversificada na indústria química, de alimentos, petroquímica, etc. (SILVA, 1989; ROVINSKY, 1995; CHU et. al., 2002).

O princípio de funcionamento dos hidrociclones deve-se à alimentação tangencial de suspensão sólido-líquido na região cilíndrica do equipamento, o que provoca a formação de um vórtex (Figura 1.1), fazendo com que as partículas maiores e mais densas sejam projetadas contra a parede, sendo então arrastadas até a saída inferior (underflow). As partículas menores e de menor densidade são arrastadas para o centro de equipamento formando um vórtex ascendente, saindo por um orifício superior (overflow).

A separação por hidrociclones apresenta o mesmo princípio utilizado pelas centrífugas, isto é, a sedimentação centrífuga, em que as partículas em suspensão são submetidas a um campo centrífugo que provoca a separação do fluido (SOUZA et al., 2000).

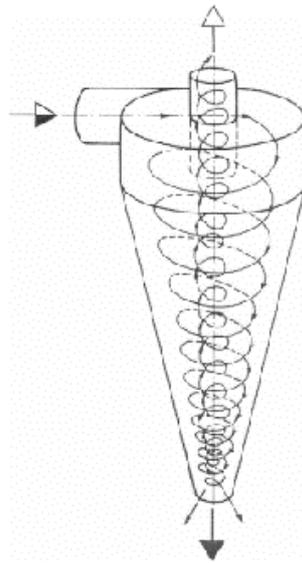


Figura 1.1 - Trajetória da suspensão no interior do hidrociclone

Quando a suspensão entra na câmara cilíndrica através do duto de alimentação, inicia-se uma rotação da suspensão no interior dessa câmara, causada por uma força centrífuga que acelera o movimento das partículas na direção das paredes. As partículas do componente da suspensão mais denso migram para baixo, percorrendo uma espiral que tem início na parte cilíndrica e continua na parte cônica. No caso de partículas sólidas, as menores são arrastadas por um movimento ascendente, saindo junto com um fluxo de líquido consideravelmente maior pelo duto da suspensão diluída. As partículas maiores e em maior quantidade são descarregadas pela base da parte cônica, juntamente com uma parte consideravelmente menor do líquido, numa suspensão concentrada (Figura 1.2).

Os hidrociclones são equipamentos que vêm reencontrando um grande campo de aplicação na indústria, principalmente na indústria petrolífera e petroquímica, em função do grande interesse pelo domínio de sua tecnologia (CASTILHO; MEDRONHO, 2000). Dentre suas vantagens incluem-se os fatos de serem simples, baratos, fáceis de instalar, baixo custo de manutenção e baixo custo operacional. Adicione-se o fato de serem pequenos em relação a outros separadores. A suspensão sólido-líquido ou líquido-líquido entra tangencialmente no corpo superior e cilíndrico do equipamento, onde a separação das fases é

iniciada com auxílio dos efeitos centrífugos e da gravidade (SANTOS; ANDRADE, 2005). Em função de seu baixo custo, várias unidades de equipamentos podem ser projetadas para obtenção de uma separação tão eficiente quanto seja necessário.

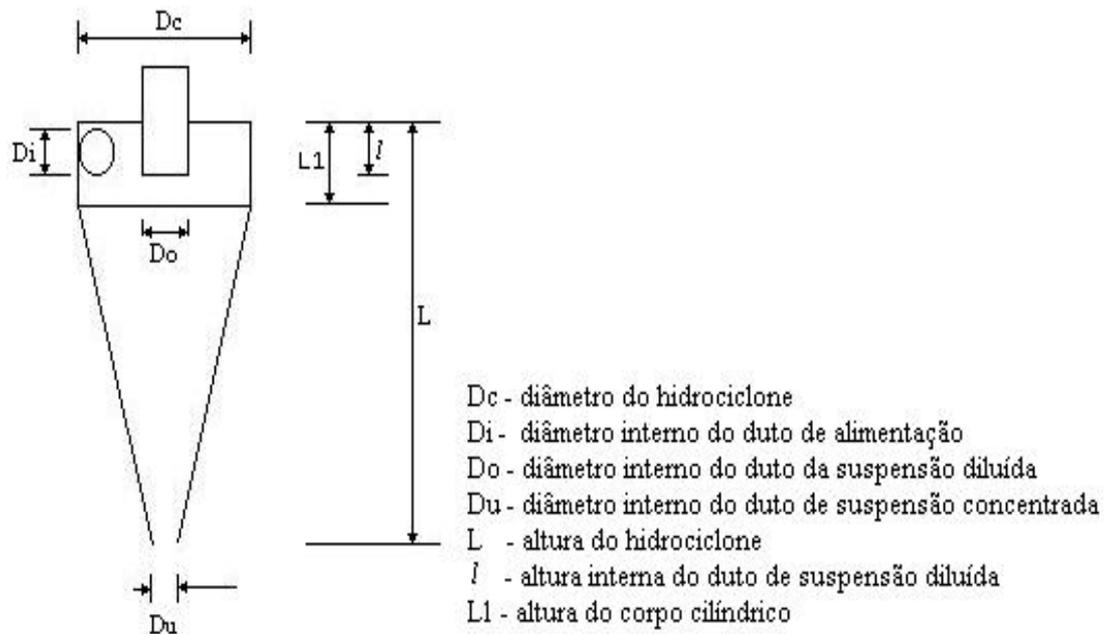


Figura 1.2 – Esquema com a disposição dos componentes de um hidrociclone

1.3.2 Classificação dos hidrociclones

De acordo com Savarovsky (1981), os hidrociclones estão agrupados em famílias, onde cada uma foi otimizada para determinadas tarefas, possuindo como característica principal a relação constante entre suas medidas geométricas, associadas com o diâmetro da parte cilíndrica, sendo bastante estudadas as famílias de Rietema e de Bradley.

Segundo Castilho e Medronho (2000), existem três grupos bem conhecidos de hidrociclones, são os de Kresbs, Rietema e de Bradley. Os de Rietema e de Bradley são hidrociclones geometricamente semelhantes. A Tabela 1.1 apresenta as principais relações geométricas de cada grupo.

Tabela 1.1 - Relações Geométricas para Hidrociclones das famílias Krebs, Rietema e Bradley

Relações Geométricas	Krebs	Rietema	Bradley
D_i/D_c	0,26752	0,28000	1/7
D_0/D_c	0,15924	0,34000	1/5
L/D_c	5,87414	5,00000	6,8
L_1/D_c	-	-	1/2
I/D	0,95541	0,40000	1/2
θ ($^\circ$)	12,7	20,0	9,0

Estudos mostram que um hidrociclone filtrante pertencente à família Bradley proporcionou nas mesmas condições operacionais do equipamento convencional, acréscimos na vazão de alimentação e decréscimo nos números de Euler (BARROZO et al., 1998; SOUZA et al., 1999; VIEIRA et al., 2000), usando um hidrociclone filtrante da família Rietema, constatou um comportamento oposto dessa família quando comparada com a família Bradley.

Os pré filtros, como os hidrociclones também são chamados, desempenham importante papel, pois se caracterizam por significativo poder de separação de partículas presentes na água, mantendo constante a perda de carga ao longo do tempo, o que ocorre com os outros tipos de filtros normalmente utilizados em diversos modelos de sistemas que fazem uso do hidrociclone (KELLER; BLIESNER, 1990).

A literatura também nos relata segundo Savarovsky, 1984, sobre os hidrociclones cilíndricos, como sendo equipamentos que apresentam como função principal a classificação de partículas. E está classificação depende do tamanho, da densidade e do formato das partículas.

Segundo pesquisas realizadas por Yuan et al., 1996; Medronho, Matta, Cilliers e Harrison, 2000 e 2003 ; Medronho et al., 2005), algumas alternativas de

aplicações do hidrociclones com pequenos diâmetros para separação de microorganismos estão sendo desenvolvidas.

Hidrociclones líquido-líquido possuem melhor desempenho quando a razão óleo/água, caso este for o objetivo, é abaixo de 25 % (GAASEIDNESN; TURBEVILLE, 1999). A uma razão de 25 % para óleo/água, no núcleo central em um hidrociclone, permite que o óleo ocupe metade do raio do corpo cilíndrico do equipamento. Quando o afluente oleo/água alcança a razão de 50% o núcleo central de óleo move-se para ocupar cerca de 70% desse raio.

O desempenho de um hidrociclones de 10 mm foi avaliada com auxílio de uma unidade de tratamento de água (WESSON; PETTY, 1994). Os testes foram conduzidos à temperatura ambiente usando-se uma mistura querosene-água com uma concentração de querosene variando numa faixa de 200 a 300 ppm e uma tensão interfacial de 35 dina/cm. O hidrociclone um diâmetro de corte de 4 μm , requerendo uma razão de overflow maior que 50%. A queda de pressão mínima foi alcançada para uma vazão de alimentação de 2 litros por minuto.

1.3.3 Desempenho em hidrociclones

Na operação com hidrociclones, quando a alimentação é introduzida no interior do mesmo e o regime de escoamento alcança a condição de permanente, uma fração do líquido junto com as partículas de maior velocidade terminal é descarregada, por meio do orifício de saída do concentrado. O restante do líquido com partículas de menor velocidade terminal é descarregado, por meio do tubo e saída da suspensão diluída (SILVA, 1989). Mesmo que o hidrociclone esteja separando, devido a ação centrífuga, uma certa quantidade de sólidos é removida no concentrado, numa razão igual à razão de líquido. Isto acontece porque o hidrociclone age também como um divisor de escoamento, tal qual como uma conexão T em tubulações.

1.3.4 Variáveis relevantes no estudo de hidrociclones

A modelagem matemática da operação de hidrociclones é extremamente complexa. Uma alternativa utilizada para quantificar o desempenho desses equipamentos baseia-se na obtenção experimental da relação entre números adimensionais que podem descrever a natureza dos fenômenos envolvidos, tais como os números de Reynolds, Froude, Prandtl, entre outros. Para a determinação desses números adimensionais, no caso de suspensões diluídas, Svarovsky (1984) destacou as seguintes variáveis relevantes:

- viscosidade do fluido;
- diâmetro de corte reduzido das partículas;
- diâmetro da parte cilíndrica do hidrociclone;
- massa específica do fluido;
- diferença entre as massas específicas dos fluidos, ou do fluido e do sólido;
- queda de pressão entre a corrente de alimentação e de overflow e;
- velocidade de alimentação.

1.3.5 Dimensionamento de hidrociclones

A lei de Stokes é governada por uma equação que faz previsão do desempenho teórico de um processo de separação líquido-líquido. Por exemplo, para o uso de ciclones na separação da mistura água-óleo (SCHUBERT, 1983):

$$v = \frac{k \cdot g \cdot (\rho_w - \rho_0) \cdot d_0^2}{\mu} \quad (1)$$

Em que:

v – velocidade de ascensão da gota de óleo

g – aceleração gravitacional

d_o - diâmetro da gota de óleo

$\rho_w - \rho_o$ - diferença entre as massas específicas da água (subscrito w) e do óleo (subscrito o)

μ - viscosidade absoluta da fase contínua (água)

As constantes, k e g , e as massas específicas dos líquidos são variáveis que não podem ser manipuladas. O diâmetro da gota de óleo e a viscosidade da fase contínua (água) têm potencial para serem manipuladas vantajosamente. A eficiência de separação é proporcional ao tamanho da gota de óleo. Uma gota de 40 μm pode ser dividida em gotas de 20 ou 10 μm em um regime de fluxo turbulento. A lei de Stokes indica ainda que leva-se quatro vezes mais tempo para se separar uma gota de 20 μm e 16 vezes uma de 10 μm em relação a uma gota de 40 μm . Mostra também que a eficiência de separação é inversamente proporcional à viscosidade da fase contínua, e que esta última pode ser reduzida com o aumento da temperatura do processo.

O processo de separação líquido-líquido em hidrociclone é mais difícil que o de sólido-líquido, devido a:

- a diferença de massa específica entre dois líquidos imiscíveis é geralmente muito pequena, sendo menor ainda que aquela calculada teoricamente em função da formação de emulsões;
- as gotas da fase dispersa tendem a variar de tamanho durante o processo, com aumento (coalescência), ou redução (choques);
- o fluido disperso também pode sofrer a influência do reservatório natural ou do reservatório do campo de petróleo.

Como resultado dessas premissas, existem dificuldades de se fazer previsões precisas de algumas propriedades que variam durante a operação do equipamento. Esta imprecisão é a principal razão pela qual o processo de separação líquido-líquido com hidrociclone só ter sido aceito nos últimos 20 anos.

Praticamente não existem trabalhos envolvendo as equações de dimensionamento de ciclones líquido-líquido na literatura. A razão para tal falta de literatura deve ser provavelmente pelo caráter comercial que envolve esse tipo de

equipamento. A estratégia para adotar dimensões de um hidrociclone líquido-líquido pode ser a consulta a patentes requeridas por pesquisadores da área (SCHULBERT, 1997; KALNINS, 1992).

1.3.6 Mistura biodiesel glicerina

O biodiesel é obtido através da transesterificação (uma reação orgânica na qual um éster é transformado em outro através da troca dos grupos alcóxidos) dos triglicerídeos de óleos e gorduras de origem vegetal ou animal com um mono-álcool de cadeia curta, tipicamente metanol ou etanol, na presença de um catalisador, produzindo uma mistura de ésteres alquílicos de ácidos graxos e glicerol (Figura 1.3). A princípio, a transesterificação é uma reação reversível. Entretanto, o glicerol formado é praticamente imiscível no biodiesel, reduzindo fortemente a extensão da reação reversa (KNOTHE, 2005).

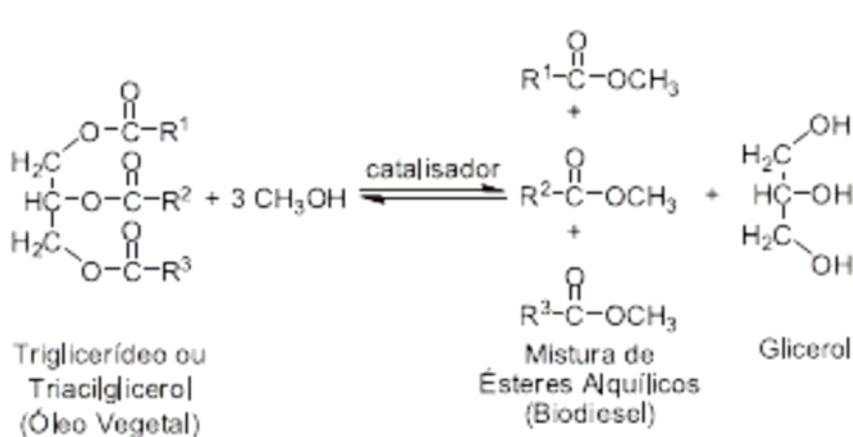


Figura 1.3 Esquema da reação de um triglicerídeo genérico com o metanol

A imiscibilidade do glicerol no biodiesel é um fator que favorece o rendimento da reação, entretanto, a possibilidade de formação de emulsões estáveis, em certos casos, pode exigir um longo período de repouso para separação das fases de biodiesel e glicerol (KNOTHE, 2005). A produção de biodiesel por transesterificação é assunto de vários artigos de revisão (SCHUCHARDT; SERCHELI; VARGAS,

1998) nos quais o papel da catálise e de novos catalisadores é amplamente discutido. Em geral, a transesterificação pode ser catalisada tanto por ácidos como por bases. Entretanto, a reação catalisada por bases (utilizando hidróxido ou alcóxido de sódio ou potássio) apresenta a vantagem de poder ser realizada à temperatura ambiente e, mesmo assim, ser mais rápida que a transesterificação catalisada por ácidos, a qual necessita ser realizada em temperaturas elevadas (FREEDMAN; PRYDE.; MOUNTS, 1984).

1.3.7 Estabilidade da mistura biodiesel-glicerina

Genericamente, uma emulsão é um sistema disperso no qual as fases são líquidos imiscíveis ou parcialmente miscíveis. As gotículas ou os glóbulos do líquido disperso apresentam geralmente diâmetros de 0,1 a 10 μm , sendo assim maiores que as partículas encontradas em colóides do tipo sóis (SHAW, 2000; JAFELICCI Jr.; VARANDA, 1999).

Em quase todas as emulsões, uma fase é água e a outra é um líquido apolar, em geral, um óleo. Se o óleo é a fase dispersa, a emulsão é denominada do tipo óleo em água (O/A); se o meio aquoso é a fase dispersa, tem-se uma emulsão do tipo água em óleo (A/O). A aparência das emulsões O/A e A/O é diferente. De modo geral, as emulsões O/A apresentam uma textura cremosa, enquanto que as emulsões A/O apresentam uma aparência gordurosa. A propriedade física mais importante das emulsões, do ponto de vista tecnológico, é sua estabilidade. As gotículas da fase dispersa estão em contínuo movimento aleatório na emulsão. O choque entre essas gotículas pode causar a sua junção, levando à formação de glóbulos maiores que, finalmente, pode levar a fase dispersa a tornar-se uma fase contínua, separada da dispersão por uma única interface. Esse fenômeno é chamado de coalescência. O tempo necessário para ocorrer a quebra da emulsão ou separação de fases varia desde poucos segundos até vários anos, dependendo da formulação da emulsão e das condições de preparação da mesma. A estabilidade das emulsões é facilitada pela presença de agentes emulsionantes, que

podem ser desde tensoativos (surfactantes ou detergentes), proteínas ou sólidos finamente divididos (KNOTHE, 2005).

O agente emulsionante atua criando um filme ao redor das gotículas que dificulta a coalescência e, conseqüentemente, a separação de fases. Os fatores físico-químicos que controlam a formação e a quebra de emulsões são bastante complexos. O objetivo dessa parte do experimento é introduzir o conceito de emulsão e como sua estabilidade pode variar com a adição de outras substâncias ao sistema. Deste modo, 4 dispersões podem ser preparadas através de agitação vigorosa: (a) água e óleo de soja; (b) água, óleo vegetal com adição de detergente; (c) solução aquosa saturada de NaCl e óleo soja e (d) solução aquosa saturada de NaCl, óleo de soja e detergente.

É possível observar que a presença de detergente, estabiliza a emulsão (b), a qual se mostra estável por mais de 20 min. Entretanto, o detergente não estabiliza a emulsão (d), na qual é possível observar a formação de duas fases distintas em poucos minutos. Essas observações permitem verificar que a solução aquosa saturada de NaCl apresenta um papel oposto ao da adição de detergente à mistura. O detergente leva à estabilização da emulsão, enquanto a solução saturada de NaCl impede sua formação. A ordem de estabilidade esperada para as emulsões é: (c) < (d) < (a) <<< (b).

Detergente, surfactante e tensoativo são palavras sinônimas utilizadas para descrever substâncias que podem diminuir a tensão interfacial de um sistema (JAFELICCI Jr.; VARANDA, 1999). Estas moléculas são anfifílicas, isto é, apresentam uma parte apolar (lipofílica) e outra polar (hidrofílica). A parte polar pode ser catiônica (como um sal quaternário de amônio), aniônica (como um grupo sulfônico) ou ainda não iônica (como um grupo álcool). No Brasil, uma mistura de alquilbenzenossulfonatos é estabelecida como padrão de detergente aniônico biodegradável, sendo que o componente principal dessa mistura é o dodecilbenzenossulfonato de sódio (BARBOSA, 1995).

Em geral, a partir de certa concentração, as moléculas de surfactante formam agregados denominados de micelas (Figura 1.4), que são gotículas de óleo envoltas

por um filme de surfactante, o qual gera uma “capa” polar ou hidrofílica ao redor das gotículas de óleo. No caso de um surfactante iônico, a aproximação das micelas é dificultada pela repulsão eletrostática das cabeças polares, que evita a coalescência, estabilizando a emulsão. A desestabilização da emulsão causada pela presença da solução salina ocorre devido aos íons desta solução competirem pela água de hidratação da cabeça polar do surfactante, o que desestabiliza energeticamente a emulsão, favorecendo a coalescência da fase de óleo dispersa. A adição de um eletrólito diminui a solubilidade de sabões em soluções aquosas; este fenômeno é comumente conhecido como “salting-out” (SCHWAB, et. AL, 1988).

Na produção de biodiesel, substâncias como sais de ácidos graxos (sabões), mono- e diglicerídeos (também denominados mono- e diacilgliceróis ou mono- e diacilglicerídeos) e fosfolípídeos podem atuar como surfactantes, o que resulta em problemas como o maior tempo de espera para a separação de fases, conforme discutido na seqüência (RINALDI, et. al., 2007).

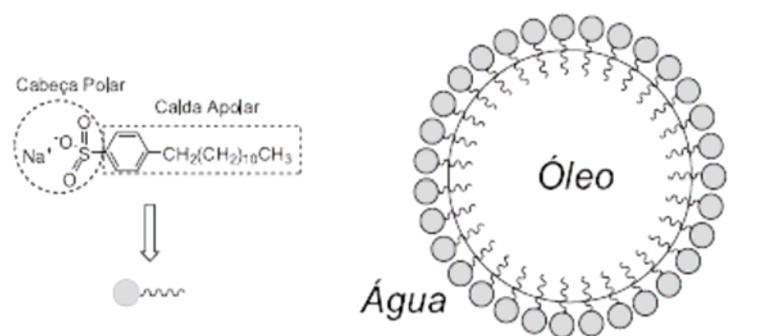


Figura 1.4 - Esquema da representação do dodecilbenzenossulfonato de sódio (princípio ativo dos detergentes domésticos) e de uma micela

Durante a reação de transesterificação, observa-se que, inicialmente, a fase alcoólica é imiscível na fase de óleo de soja. Após poucos instantes, as fases tornam-se miscíveis e, em seguida, ocorre a formação de uma emulsão leitosa amarelada. É notório que o aumento da quantidade de catalisador (KOH) gera dispersões mais escuras. Observando-se o comportamento da mistura em repouso após a reação, é possível perceber que o aumento da quantidade de catalisador até certo ponto facilita a separação de fases da mistura reacional. Entretanto, após 60 min de repouso as misturas reacionais contendo 0,50 e 5,0 % m/m de catalisador

não apresentam uma boa separação de fases, enquanto que para as misturas em que foram utilizados 1,0 e 2,5% m/m de catalisador é possível distinguir claramente as interfaces (RINALDI, et. AL, 2007).

A fase inferior é constituída de um líquido imiscível em hexano, mas miscível em etanol; enquanto a fase superior é um líquido miscível em ambos os solventes. Essas características levam a concluir que a fase inferior é um líquido polar, o glicerol, e a fase superior é um líquido apolar, o biodiesel. É interessante notar que diferentemente do óleo de soja, o biodiesel é solúvel em metanol ou etanol.

Na síntese de biodiesel utiliza-se um excesso do álcool de cadeia curta (6:1) para conduzir a transesterificação em um grau de extensão maior para os ésteres alquílicos¹⁸. O álcool excedente fica distribuído entre as fases de glicerol e de biodiesel (RINALDI, et. AL, 2007). A remoção do metanol excedente é necessária porque mesmo em baixos teores (1% m/m), a sua presença pode reduzir o ponto de fulgor fortemente (de 170 para < 40 °C).

1.3.8 Parâmetros de otimização

O termo otimização quando observado sob a ótica da Matemática, refere-se ao desenvolvimento de métodos eficientes de determinação de extremos de funções de uma ou mais variáveis. São componentes básicos do processo de otimização (PERLINGEIRO, 2005):

i) variáveis de decisão - Denominação atribuída às variáveis independentes do problema de otimização. São também chamadas de variáveis manipuladas. Os métodos de otimização chegam à solução ótima, manipulando essas variáveis.

ii) critérios de otimização - Definem a solução ótima do problema. O critério mais comum é da natureza econômica: lucro ou custo. Segurança, controlabilidade e outros critérios também podem ser adotados. A solução ótima segundo um critério pode não ser ótima segundo outro. Por exemplo, a solução de menor custo muitas vezes pode não ser mais segura. Soluções que atendam simultaneamente a mais de

um critério podem ser obtidas por métodos de otimização com objetivos múltiplos, em que o projetista pode atribuir pesos diferentes a cada critério em função da respectiva importância.

iii) função objetivo - Expressão matemática do critério de otimização em função das variáveis de decisão do sistema. A função objetivo pode assumir aspectos dos mais diversos, influenciando decisivamente no modo de elaborar o problema de otimização e na probabilidade de sucesso da sua resolução.

iv) restrições - Limites estabelecidos pelas leis naturais que governam o comportamento do sistema. Essas restrições podem ser de dois tipos, de igualdade e de desigualdade (GOLDRATT, 1990).

v) região viável - Região do espaço definida pelas variáveis de decisão, delimitada pelas restrições, em cujo interior ou em cuja fronteira se localiza o máximo, ou o mínimo da função objetivo. A região viável é também chamada de região de busca. O conhecimento da localização e da natureza dessa região é de fundamental importância para aplicação de diferentes métodos de otimização.

1.4 Referências Bibliográficas

ARRUDA, E.; KOBOLDT, C. A.; DAMASCENO J. J. R.; BARROZO, M. ^a S.; Estudo do Comportamento de um Hidrociclone Filtrante de Geometria Krebs. *Revista Eletrônica*, Ed. 2003.

BARBOSA, A. B.; SILVA, R. R.; *Química Nova na Escola* 1995, nº 2, 3.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I.S.; BRUNS, R.E.; *Planejamento e Otimização de Experimentos*; Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1995, p. 14.

BLOCH, S. C. *Excel para engenheiros e cientistas*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 225 p.

CASTILHO, L. R.; MEDRONHO, R. A., A simple procedure for design and performance prediction of Bradley and rietema hydrocyclones. *Mineral Engineering*. V.13, n. 2, p. 183-191, 2005.

FREEDMAN, B.; PRYDE, E. H.; MOUNTS, T. L.; *J. Am. Oil Chem. Soc.* 1984, 61, 1638.

GAASEIDNESN, K; TURBEVILLE, J., Separation of oil and water in oil spill recovery operations. *Pure Appl. Chem.*, Vol. 71, No. 1, pp. 95–101, 1999.

GOLDRATT, E. M. **What is thing called the Theory of Constraints, and how should it be implemented**. Crotonon-Hudson: North River Press, 1990.

OMES, R .H. P. Separação de emulsão óleo-água em hidrociclones.01/09/2002. 1v. 116p. Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia – Engenharia Química.

HANSELMAN, D.; LITTLEFIELD, B. **MATLAB 7: Guia do Usuário**. São Paulo: MAKRON Books, 2006.

JAFELICCI Jr., M.; Varanda, L. C.; **Química Nova na Escola** 1999, nº 9, 18.

KALNINS, M. C., Woodlands, Tex. CONOCO SPECIALTY PRODUCTS INC., Houston Tex. High efficient liquid-liquid hydrocyclone, Cl.⁵ BO4C 5/081. US005110471A. May. 5, 1992.

KINAST, J. A.; Production of Biodiesels from Multiple Feedstocks and Properties of Biodiesels and Biodiesels/Diesels Blends; Gas Technology Institute, National Renewable Energy Laboratory, Março de 2003.

KNOTHE, G.; van GERPEN, J.; KRAHL, J.; **The Biodiesel Handbook**, AOCS Press: Champaign, Illinois, 2005, cap. 2 e 4.

MENEGHETTI, S. M. P (2004) Obtenção de Biodiesel a partir do Óleo de Mamona: Estudo Comparativo, entre Diferentes Catalisadores, na Reação de Transesterificação Empregando-se Metanol e Etanol. In: Congresso Brasileiro de Mamona, 1: Energia e Sustentabilidade, Embrapa, Campina Grande.

PECORA, R. H. G., **Separação de Emulsões óleo-água em hidrociclones**, Dissertação de Mestrado, UFU, Uberlândia, 2002.

PERLINGEIRO, C. A. G. **Engenharia de Processos**. São Paulo: Editora Edgard Blucher. São Paulo, 2005. 189 p.

RINALDI, R.; GARCIA, C.; MARCINIUK, L. L.; ROSSI, A. V.; SCHUCHARDT, U. Síntese do Biodiesel. **Química Nova**, Vol. 30, No. 5, 1374-1380, 2007

SANTOS, V. A.; ANDRADE, E. P., Dimensionamento computacional de equipamentos para a indústria sucroalcooleira. **Revista da STAB**, vol. 53, 14-21, 2005.

SCHWAB, A. W.; DYKSTRA, G. J.; SELKE, E.; SORENSON, S. C.; PRYDE, E. H.; **J. Am. Oil Chem. Soc.** 1988, 65, 1781.

SILVA, M. A. P. da, Hidrociclones de Bradley: dimensionamento e análise de desempenho. Dissertação de Mestrado. COPPE – UFRJ, Rio de Janeiro, 1989, 81 p.

SCHUBERT, M. F., Houston, Tex. UNITED STATES FILTER CORPORATION, Palm Desert. Calif. Hydrocyclone for liquid-liquid separation and method. Int. Cl.⁶ B01P 21/26. US005667686A. Sep. 16, 1997.

SHAW, D. J.; **Colloid and Surface Chemistry**, 4th ed., Butterworth Heinemann: Oxford, 2000, p. 263-269.

SOCOL, O. J.; BOTREL, T. A.; Avaliação de um Hidrociclone de Rietema para remoção de Areia da Água de Irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. Vol 9, nº 4. Campina Grande. 2005.

SVAROVSKY, L. Solid-Liquid separation, Buller worths, londo, 1981.

SVAROVSKY, L. **Hidrociclones**. Tecnomi Publishing Co. 1981.

SCHUBERT, M. F. Advancements in hydrocyclone separations systems. **Proceedings of 24th Annual Offshore Technology Conference**. Houston, May 4-7, 1992. p. 14-19.

SCHUCHARDT, U.; SERCHELI, R.; VARGAS, R. M.; **J. Braz. Chem. Soc.** 1998, 9, 199.

VARGAS et al.; Transesterification of Vegetable Oils: a Review ; J. Braz. Chem. Soc., Vol. 9, No. 1, 199-210, 1998.

VALENTE, M.; CALDAS, A. V.; DAMASCENO, R. J. J.; CARDOSO, V. L.; Análise do Desempenho de Hidrociclone de Fundo Chato. Revista Eletrônica. Ed. 2002.

VIEIRA, L. G. M. (2001), Estudo da Performance de Hidrociclone Filtrantes de Rietema, Tese de MSc.; UFU, Uberlândia.

WESSON, G. D.; PETTY, C. A., Process Engineering of Produced Water Treatment Facility Based on Hydrocyclone Technology. **Proceedings of the International Petroleum Environmental Conference**. Houston, Texas, 36-42, 1994.

YOUNG G. A.; WAKLEY, W. D., TAGGART, D. L., ANDREWS, S. L., AND WORELL, J. R., "Oil-Water Separation Using Hydrocyclones," presented at the American Filtration Society Conference, Balton Rouge, LA, October 29, 1990.

SIMÕES A. M. B. M. S. Simulação Numérica da Fluidodinâmica de Um Hidrociclone Aplicado Na Separação Óleo/Água. 01/09/2005

CAPÍTULO 2

Otimização da Operação de Separação da Mistura Biodiesel-Glicerina em Hidrociclone

Aziel Alves de Arruda.¹, Valdemir Alexandre dos Santos², Eliane Cardoso de Vasconcelos²¹Mestrado em desenvolvimento de Processos Ambientais²Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Católica de Pernambuco, Rua do príncipe, n. 526, Bl. D, Boa Vista- CEP.: 50050-900, Recife-PE, Brasil

Rua do Príncipe, 526, Boa Vista, Cep 50050-900 Recife, PE

Autor para correspondência: +55 81 21194188, E-mail: ecv@unicap.br

Resumo

Foram simuladas e analisadas as condições de separação da mistura biodiesel-glicerina, etapa integrante do processo de produção desse biocombustível por transesterificação de óleos e gorduras, em condições operacionais otimizadas e não otimizadas. A estratégia de otimização foi o uso de correlações econômicas e geométricas, as quais levaram à obtenção de um custo mínimo. Uma das etapas mais importante do processo de produção de biodiesel é a de sua purificação. Um hidrociclone do tipo convencional foi proposto para a referida etapa. A estratégia usada para elaboração da função objetivo foi compô-la de três termos: custo de aquisição, custo de operação e o custo associado a não coleta do biodiesel, todas como função do diâmetro do equipamento. Como programas de cálculos para dimensionamento e otimização foram utilizadas a planilha eletrônica Excel e sua ferramenta solver. Os resultados mostraram que a estratégia e otimização forneceram valores de dimensionamento muito próximos da condição não otimizadas, demonstrando que a mesma pode ser utilizada como reforço, numa época em que os critérios econômicos são importantes justificativas de investimentos nas melhorias dos processos produtivos.

Palavras-Chave: 1. Separação líquido-líquido. 2. Minimização de efluentes. 3. Função objetivo. 4. Planilha eletrônica.

A ser submetido no periódico **Environment and Cevvelopment Economics**

Introdução

A operação de separação líquido-líquido imiscíveis, do tipo desidratação ou remoção de óleo residual nas águas residuárias da indústria de petróleo tem sido praticada com sucesso pelos chamados hidrociclones. Estes são equipamentos bastante solicitados atualmente para as separações dos tipos sólido-líquido e líquido-líquido. Por não possuírem partes móveis e serem de fácil construção, constituem-se em um dos meios mais baratos do ponto de vista da operação e de investimento.

Há cerca de 100 anos o hidrociclone foi patenteado e durante algumas décadas ficou restrito apenas a algumas atividades como na remoção de areia das águas de algum tipo de processo. A partir da metade do século XX, os hidrociclones foram considerados a serem vistos como uma importante alternativa em processos de separação, encontrando grande aplicabilidade na indústria de extração e processamento mineral. Tal fato despertou o interesse de pesquisadores e levou a inúmeros estudos científicos com hidrociclones, promovendo a divulgação desse tipo de equipamento para a indústria de petróleo e petroquímica (WESSON; PETTY, 1994). Como resultados desses estudos, foram surgindo diferentes configurações de hidrociclones (famílias) as quais eram baseadas nas relações geométricas entre as principais dimensões dos hidrociclones.

Com a mudança de cenário da economia mundial, em decorrência do surgimento de novas tecnologias e de maior conscientização ecológica, o hidrociclone, assim como outros tipos de equipamentos, vem tendo suas características operacionais aplicadas e testadas para simplificações desses novos processos. Dessa forma, qualquer equipamento para permanecer fazendo parte da relação dos constituintes de um processo, precisa ter seus desempenhos técnicos e econômicos testados. Para isso, a técnica de análise de desempenhos, através da elaboração e aplicação de funções objetivo, é indispensável na etapa de qualquer projeto de equipamento ou processo.

A otimização consiste na busca racional do melhor dentre todos os valores possíveis para dadas variáveis, em função de um determinado objetivo e das limitações (ou restrições) existentes. Também significa tornar ótimo ou buscar o ótimo, o que significa a busca da solução ótima.

No presente trabalho propõe-se o uso de hidrociclone para promover a separação da mistura biodiesel-glicerina, originada no processo de produção de biodiesel a partir de transesterificação de óleos e gorduras (óleo de mamona, por exemplo).

Para processos considerados de pequeno porte, menos de 3,5 milhões de litros por ano, a condução da etapa de separação da mistura biodiesel-glicerina, em regime batelada, pode ser vantajosa. Elimina-se com isto a necessidade de mão-de-obra especializada, característica dos processos contínuos, e os transtornos do grande volume de efluente gerado pelo uso de centrífugas. Minimizar o tempo em que os co-produtos dos processos de médio e grande portes de produção de biodiesel significa melhorar, em muito, a eficiência econômica dos mesmos. Com a separação contínua em um processo do tipo "flash drum", ou tanque de decantação contínua associada ao efeito de redução brusca de velocidade de escoamento, fica justificada como estratégia, para purificação do biodiesel (glicerina dispersa), o uso de hidrociclone líquido-líquido. Dessa forma propõe-se neste trabalho a otimização dessa etapa do processo, principalmente quando, além da redução do tempo de operação, busca-se uma minimização do volume de efluentes gerado.

Material e Métodos

Hidrociclone líquido-líquido

Nos hidrociclones utilizados na separação líquido-líquido, a mistura de alimentação entra tangencial ao corpo cilíndrico e, por força centrífuga, formam-se dois fluxos de líquidos de diferentes densidades. O líquido mais denso forma uma espiral de raio maior e concentra-se junto à parede. O fluxo do líquido menos denso forma um núcleo ao longo do comprimento axial do hidrociclone (KALNINS, 1992). Os referidos fluxos de líquidos de diferentes densidades tomam diferentes direções. O de menor densidade sai pela parte superior do equipamento (*Overflow*) e o de maior densidade sai pela base do mesmo (*Underflow*).

A separação da mistura biodiesel-glicerina, na condição em que a glicerina é a fase dispersa (etapa de purificação do biodiesel) pode ser tratada como o dimensionamento de um hidrociclone do tipo fluido-sólido, desenvolvida por Rietema (1961a). Dessa forma pode-se realizar a separação de uma mistura de líquidos imiscíveis, do tipo biodiesel contaminado por glicerina. Neste caso, o diâmetro da gota de glicerina dispersa no biodiesel torna-se a principal variável para o projeto do hidrociclone líquido-líquido convencional.

Dimensionamento

A Figura 1 ilustra os componentes básicos de um hidrociclone líquido-líquido convencional. Para tais componentes as seguintes relações geométricas são válidas:

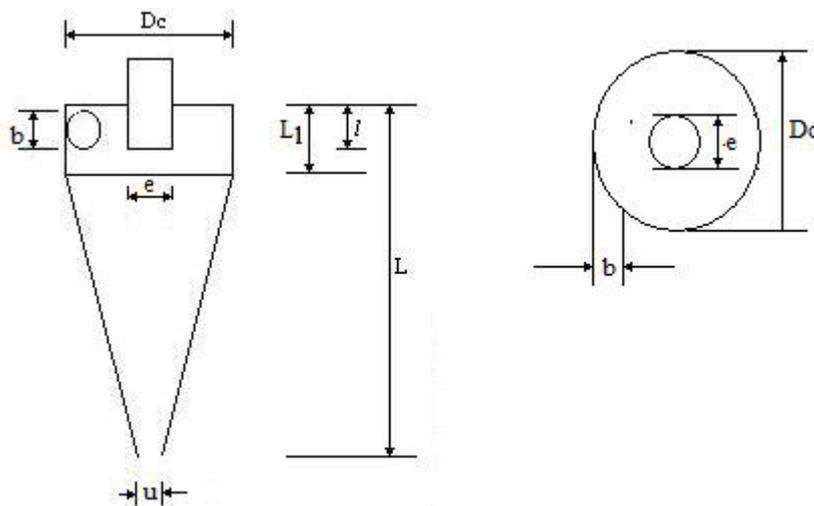


Figura 1- Componentes básicos de um ciclone adaptado de Rietema (1961)

$$\frac{L}{D_C} = 0,25 \quad (1)$$

$$\frac{b}{D_C} = 0,14 \quad (2)$$

$$\frac{e}{D_C} = 0,14 \quad (3)$$

$$\frac{l}{D_C} = 0,40 \quad (4)$$

em que:

b – diâmetro interno do duto de alimentação

D – diâmetro interno do corpo cilíndrico do hidrociclone

L – comprimento do hidrociclone

e – diâmetro interno do duto de saída do *overflow*

l – comprimento do duto de saída do *overflow*

Na fase de estimativas para o dimensionamento do hidrociclone foi utilizado o seguinte roteiro e correlações (Rietema, 1961):

i) Escolha de um diâmetro de corte, d_{50} , com base em uma dada eficiência, η , obtida através de dados disponibilizados por uma curva de percentagem acumulada da distribuição de tamanho dos diâmetros, em função do diâmetro da gota do fluido disperso.

ii) Cálculo do valor do diâmetro do hidrociclone utilizando uma estimativa para o Número Adimensional (5), com base na estimativa para Δp através do hidrociclone (entre o duto de alimentação e o de *overflow*) e da estimativa de d_{50} . O valor obtido é identificado na ordenada do gráfico apresentado pela Figura 2. Posteriormente, encontra-se o valor correspondente do Número Adimensional (6). Calcula-se então o valor do diâmetro do corpo cilíndrico do hidrociclone.

$$\frac{d_{50}^2 \cdot \Delta\rho \cdot \Delta p}{\mu_-^2} \quad (5)$$

$$D_C \cdot \frac{\rho_-}{\mu_-} \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_-}} \quad (6)$$

Em que μ_- é a viscosidade absoluta ρ_- é a massa específica, para o fluido de menor densidade.

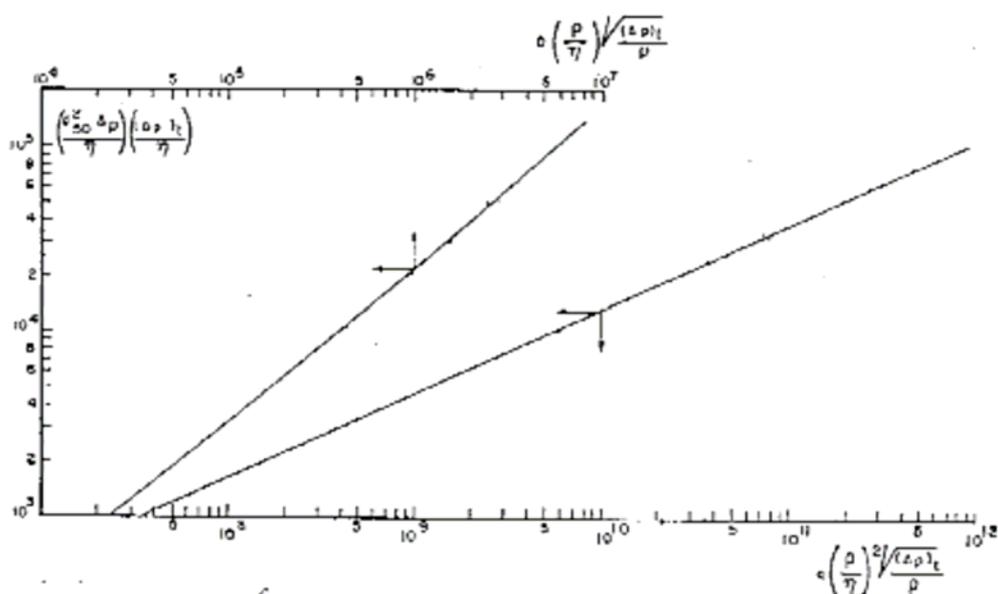


Figura 2 – Correlações para projeto de hidrociclones adaptado de Rietema (1961)

iii) Cálculo da vazão por unidade de hidrociclone, q , realizando-se procedimento semelhante ao do item ii com auxílio do Número Adimensional (7):

$$q \cdot \left(\frac{\rho_-}{\mu_-} \right)^2 \cdot \sqrt{\frac{\Delta p}{\rho_-}} \quad (7)$$

mas utilizando o valor da abscissa correspondente a este último, apresentado pela Figura 2.

Função objetivo

Os dados sobre parâmetros otimizados do processo de separação com um hidrociclone líquido-líquido, proposto neste trabalho, foram gerados com auxílio da ferramenta **Solver** da planilha eletrônica Excel da Microsoft® (BLOCH, 2004). A opção **Solver** no Excel pode ser utilizada para resolver problemas de otimização lineares e não lineares. As restrições de inteiros podem ser colocadas nas variáveis de decisão. A **Solver** pode ser utilizada para resolver problemas com até 200 variáveis de decisão, 100 restrições implícitas e 400 restrições simples.

A ferramenta de otimização foi então utilizada a partir de dados e de estimativas relacionados a seguir:

- massas específicas do biodiesel (879 kg/m^3) e da glicerina (1260 kg/m^3);
- viscosidades absolutas do biodiesel ($4,4 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$) e da glicerina ($1,49 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$);
- eficiência de coleta de 90% por hidrociclone e;
- faixa de valores para d_{50} entre $100 \text{ m}\mu$ ($1 \cdot 10^{-4} \text{ m}$) e 1 mm ($1 \cdot 10^{-3} \text{ m}$);

- confecção do hidrociclone em aço inoxidável 304 ($\rho_m = 8030 \text{ kg/m}^3$, $\delta_m = 0,003 \text{ m}$);
- constante de custo $\alpha = 560$;
- expoente da equação de custo $\alpha' = 0,66$

A otimização trata de maximização ou minimização de funções, através da variação de seus parâmetros. A solução de um problema de minimização é o conjunto de valores de parâmetros que torna uma dada função mínima ou máxima em um espaço de busca (ou espaço de soluções). O espaço de soluções é o domínio de valores possíveis para os parâmetros a otimizar. Quando este espaço é finito, diz-se que o problema possui restrições. Estas restrições podem ter as mais variadas causas.

De forma geral, os tipos de problemas de otimização na área de Processos Produtivos são:

- obtenção de desempenho ótimo para um processo ou equipamento e;
- ajuste de parâmetros de modelos a partir de dados experimentais

Freqüentemente, é preciso obter uma solução de compromisso entre Custos de Investimento Fixo e Custos Operacionais. O desempenho de plantas industriais ou equipamentos é simulado e otimizado a partir de seus modelos.

Uma função objetivo é uma expressão matemática de um critério de desempenho (por exemplo, custo ou lucro operacional, tempo de batelada, conversão, etc). Em geral, trabalha-se com funções objetivo de parâmetros contínuos. A definição da função objetivo de um problema de otimização deve ser realizada cautelosamente, pois a solução do problema de otimização dependerá da mesma.

É preciso verificar se há restrições sobre os valores possíveis dos parâmetros da função objetivo. Basicamente, estas restrições podem decorrer de:

- valores irreais ou irrealizáveis dos parâmetros (por exemplo, uma eficiência de coleta de 150%) e;
- sub-critérios de desempenho do processo que precisam ser alcançados (por exemplo, um nível máximo de ramificações em um processo de polimerização).

Restrições de igualdade são expressas como equações e restrições de desigualdade são expressas como inequações.

Utilizando um critério de custo mínimo, a função objetivo proposta para um determinado equipamento pode ser expressa por:

$$C_T = C_C + C_{OP} \quad (8)$$

Em que:

C_T - custo total

C_C - custo de capital, ou custo fixo

C_{OP} - custo operacional

O custo de investimento fixo, ou de capital, foi estimado segundo a expressão de potência utilizado por Souza (1999), conforme as leis de mercado:

$$C_C = \alpha \cdot W^{\alpha'} \quad (9)$$

Em que:

C_C - custo por unidade de peso

α - constante de custo

W - peso do equipamento

α' - parâmetro de ajuste do modelo de custo às leis de mercado

Como o peso de um objeto pode ser representado por:

$$W = \rho_m \cdot g \cdot V_m \quad (10)$$

Em que ρ_m e V_m são a massa específica e o volume do metal empregado para confeccionar o hidrociclone, respectivamente. Chega-se então à expressão:

$$C_C = \alpha \cdot (\rho_m \cdot g \cdot V_m)^{\alpha'} \quad (11)$$

A Equação (11) pode ainda ser modificada em função da quantidade de material de confecção do hidrociclone. Admitindo-se que o hidrociclone equivale a um cilindro de diâmetro médio D_C e comprimento L_C ,

$$V_m = \pi \cdot D_C \cdot L_C \cdot \delta_m \quad (12)$$

Em que δ_m é a espessura da chapa metálica. Substituindo a Equação (12) na Equação(11), têm-se:

$$C_C = \alpha \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \pi \cdot D_C \cdot L_C \cdot \delta_m)^{\alpha'} \quad (13)$$

O custo de operação é relativo ao gasto com a energia elétrica do motor que aciona a bomba de alimentação do hidrociclone. Mas essa energia é basicamente gasta para vencer a perda de carga através do hidrociclone. Portanto,

$$C_{OP} = \Delta P \cdot c_{el} \quad (14)$$

Em que:

ΔP - queda de pressão através do hidrociclone

c_{el} - custo da unidade de consumo de energia

Em alguns casos, quando a quantidade de material não coletado é significativa, a Equação (13) pode ter um termo acrescentado, correspondente ao custo desse material. No caso deste trabalho,

$$C_T = C_C + C_{OP} + C_{MNR} \quad (15)$$

Em que, C_{MNR} , ou o custo do material não recuperado é dado por:

$$C_{MNR} = (1 - \eta) \cdot z \cdot c_d \quad (16)$$

Sendo η a eficiência de recuperação do material pelo equipamento, z a quantidade de material não recuperada e, c_d o custo desse material não recuperado.

Dessa forma:

$$C_T = \alpha \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \pi \cdot D_C \cdot L_C \cdot \delta_m)^{\alpha'} + \Delta P \cdot c_{el} + (1 - \eta) \cdot z \cdot c_d \quad (17)$$

Observe-se, ainda, que a queda de pressão através do hidrociclone é função do diâmetro do equipamento, conforme a Equação (18),

$$\Delta P = \frac{\xi}{2 \cdot (0,7854)^2} \cdot \frac{(\rho_-) \cdot q^2}{D_C^4} \quad (18)$$

Em que ξ é um fator adimensional que depende do tipo de hidrociclone. Inserindo a Equação (18) na Equação(17),

$$C_T = \frac{\alpha}{5} \cdot (\rho_m \cdot g \cdot \pi \cdot D_C^2 \cdot \delta_m)^{\alpha'} + \left(\frac{\xi}{2 \cdot (0,7854)^2} \cdot \frac{(\rho_-^2) \cdot q^2}{D_C^4} \right) \cdot c_{el} + (1 - \eta(D_C)) \cdot z \cdot c_d \quad (19)$$

Que é a função objetivo para uma estratégia proposta para a otimização de um hidrociclone líquido-líquido convencional, empregado na separação da mistura biodiesel-glicerina.

Resultados e Discussão

Foram elaboradas duas planilhas. A Planilha 1 calcula as dimensões e a vazão de um hidrociclone, para uma eficiência de coleta, um diâmetro de corte e uma queda de pressão, conhecidos. A Planilha 2 utiliza a Equação (19) sem o termo referente à não coleta de material e calcula as condições otimizadas do processo de separação.

A Tabela 1 apresenta dados calculados pelas Planilhas 1 e 2, referentes ao dimensionamento do Hidrociclone em condições não otimizadas de operação e os custos de capital, de operação e total nessas mesmas condições.

Tabela 1 – Dimensões e parâmetros operacionais do hidrociclone fornecidos pela Planilha 1 em condições não otimizadas

Parâmetro	Valor	Unidade
D_C	0,743	m
b	0,207	m
l	0,296	m
e	0,252	m
L	3,710	m
Q	0,011	m ³ /s
C_C	634.62	US\$
C_{OP}	173.04	US\$
C_T	807.67	US\$

A Tabela 2 apresenta os mesmos tipos de dados da Tabela 1, mas em condições otimizadas com auxílio da Equação (19). O valor otimizado para o diâmetro do hidrociclone fica muito próximo do valor em condições não otimizadas. Por se encontrar um pouco abaixo, indica um também pequeno aumento na eficiência de coleta, mas que não chega a ser considerado significativo. Contudo, o uso de uma função objetivo para otimização do equipamento pode reforçar o atendimento a critérios econômicos, tão importante na época atual.

Tabela 2 – Dimensões e parâmetros operacionais e de dimensionamento do hidrociclone em condições otimizadas e fornecidos pela Planilha 2

Parâmetro	Valor	Unidade
D_C	0,716	m
b	0,200	m
l	0,286	m
e	0,243	m
L	3,580	m
Q	0,011	m ³ /s
C_C	665.28	US\$
C_{OP}	199.74	US\$
C_T	805.02	US\$

A Tabela 2 apresenta os mesmos tipos de dados da Tabela 1, mas em condições otimizadas com auxílio da Equação (19).

Conclusões

O hidrociclone pode ser utilizado em configuração do tipo bateria em série para se atingir uma alta eficiência de purificação do biodiesel.

A estratégia de otimização apresentada neste trabalho é simples, mas provou que pode ser uma excelente ferramenta de confirmação dos parâmetros de dimensionamento, onde critérios econômicos são sempre importantes para justificarem novos investimentos para melhoria de processos industriais.

Em função do baixo custo de aquisição dos hidrociclones, sugere-se a construção de instalações piloto, necessárias à obtenção de dados experimentais para a validação de modelos matemáticos de dimensionamento e otimização, em casos onde a quantidade e qualidade do produto purificado justificarem tal investimento.

Referências Bibliográficas

- BONDIOLI, P.; Bella, L. D. An alternative spectrophotometric method for determination of free glycerol in biodiesel, *European Journal of Lipid Science Technology*, v. 107, p 153-157, 2005.
- BLOCH, S. C. Excel para engenheiro e cientistas. 2 ed., Rio de Janeiro: LTC, 2004. 352 p.
- CANAKSI, M.; Van Gerpen, J.; *Trans. ASAE* 2001, 44, 1429.
- CANAKSI, M.; Van Gerpen, J. Biodiesel production from oils and fats with free fatty acids. *Trans. ASAE*, v. 44, p. 1429-1436, 2001.
- DINIZ, G. De coadjuvante a protagonista: Glicerina bruta obtida na produção de biodiesel pode ter muitas aplicações. *Ciências Hoje Online*, 19/10/05.
- ENCINAR, J. M.; Gonzalez, J. F.; Sabino, E.; Ramiro, M. J.; *Ind. Eng. Chem Res.* 1999, 38, 2927.
- ENCINAR, J. M.; Gonzalez, J. F.; Rodriguez, J. J.; Tejedor, A.; *Energy Fuels* 2002, 16, 443.
- J.M., Encinar; J.F., Gonzalez, A. Tejedor, *Energy Fuels* 16 (2002) 443.
- JEELANI, S. A. K.; HOSIG, R.; WINDHAB, E. J. Kinetics of low Reynolds number creaming and coalescence in droplet dispersions. ***AIChE Journal***, vol. 51, no. 1, pp. 149-161, January 2005.
- KALNINS, M. C., Woodlands, Tex. CONOCO SPECIALTY PRODUCTS INC., Houston Tex. High efficient liquid-liquid hydrocyclone, Cl.⁵ BO4C 5/081. US005110471A. May. 5, 1992.
- LOPES, J. S. Beltrão, N. E. M.; Primo, J. F. Produção de mamona e biodiesel: uma oportunidade para o Semi-árido, *Bahia Agrícola*, v.7, n. 1, p. 37-41, setembro, 2005.
- MITTELBAACH, M. Diesel fuel derived from vegetable oils, v(1): gas chromatography, v. 37, n. 11, p. 623-626, December, 1993.
- PERLINGEIRO, C. A. G. Engenharia de Processos. ED Edgard Blucher. São Paulo. 2005.
- RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclone – I: general considerations. ***Chem. Engng. Science***, Vol. 15, Nos. 3 and 4. September, 1961a.
- RIETEMA, K. Performance and design of hydrocyclone – IV: design of hydrocyclones. ***Chem. Engng. Science***, Vol. 15, Nos. 3 and 4. September, 1961b.
- R.O., Dunn, *J. Am. Oil Chem. Soc.* 79 (2002) 915.
- RUDD, D. F.; WATSON, C. C. Strategy of Process Engineering. New York: John Wiley & Sons, 1968. 568 p.
- SCHUBERT, M. F., Houston, Tex. UNITED STATES FILTER CORPORATION, Palm Desert. Calif. Hydrocyclone for liquid-liquid separation and method. Int. Cl.⁶ B01P 21/26. US005667686A. Sep. 16, 1997.

SHUCHRDT, U.; Sercheli, R.; Vargas, M.; J. Braz, Chem. Soc. 1998, 9, 190.

SOUZA, J. M. M. **Estratégia para otimização do processo de separação da mistura gipsita-ar em ciclones**. 1999. 95f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 1999.

WESSON, G. D.; PETTY, C. A., Process Engineering of Produced Water Treatment Facility Based on Hydrocyclone Technology. **Proceedings of the International Petroleum Environmental Conference**. Houston, Texas, 36-42, 1994.

ZAGONEL, G. F., NETO, P. R. C. ; ROSSI, L. F. S.; RAMOS, L. P.; **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 531-537, 2000.

ZHANG, Y., et al. "Biodiesel production from waste cooking oil 1: process design and technological assessment", **Bioresource Technology**. 89: 1-16. 2003.

