

ALEXANDRE NAVARRO DA SILVA

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA DE  
UMA UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE SORO DE LEITE PARA  
PRODUÇÃO INTEGRADA DE CONCENTRADO PROTEICO, LACTOSE  
E ETANOL**

Dissertação apresentada à  
Universidade Federal de Viçosa, como  
parte das exigências do Programa de  
Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia  
de Alimentos, para obtenção do título de  
*Magister Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2011

**ALEXANDRE NAVARRO DA SILVA**

**MODELAGEM, SIMULAÇÃO E ANÁLISE TÉCNICO-FINANCEIRA DE UMA  
UNIDADE DE PROCESSAMENTO DE SORO DE LEITE PARA PRODUÇÃO  
INTEGRADA DE CONCENTRADO PROTEICO, LACTOSE E ETANOL**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 17 de fevereiro de 2011.

---

Prof. Cláudio Furtado Soares

---

Prof<sup>a</sup>. Valéria Paula Rodrigues Minim  
(Co-orientadora)

---

Prof. Antônio Fernandes de Carvalho

---

Prof. Renato Souza Cruz

---

Prof. Luis Antônio Minim  
(Orientador)

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida em Cristo, por esta oportunidade que me concedeu e pela força de concluir mais esta etapa.

À Universidade Federal de Viçosa, em especial pelo Departamento de Tecnologia de Alimentos pelo apoio acadêmico na minha formação.

Ao Conselho Nacional de Pesquisa e Desenvolvimento (CNPq) pela bolsa de estudos.

Ao Professor Luís Antônio Minim, por aceitar o desafio de orientar um Engenheiro de Produção. Pela extrema dedicação, paciência, rigor e apoio. Muito obrigado pela oportunidade!

Ao professor Ronaldo Perez, pelos valiosos conselhos e ensinamentos de Engenharia Econômica.

À professora Valéria Paula Rodrigues Minim, pelos conselhos e sugestões disponibilizadas. Esteve presente desde o início deste período de estudos. Obrigado!

Aos professores Antônio Fernandes de Carvalho e Renato Souza Cruz pela disponibilidade em participar da banca de avaliação deste trabalho.

Aos meus pais, Carlos e Conceição, que com muito esforço e saudades nunca deixaram de me apoiar e incentivar as decisões da minha vida. Amor de filho nunca acaba... Que Deus os abençoe muito por tudo isso!

À minha esposa, que com muito carinho SEMPRE esteve ao meu lado, com seu sorriso especial que ilumina a minha vida. Os obstáculos seriam muito mais altos, se não houvesse você para me suportar... Te amo muito e muito!

Ao meu irmão, que mesmo estando distante dos acontecimentos na minha caminhada, sempre esteve perto, no meu coração! Obrigado pelos exemplos e lições!

Aos meus muito queridos sogros, Virgínia e Erly, e minha cunhadinha, Cristina, que muitas vezes não percebendo, me ajudaram a superar e entender uma parte da vida. Sou grato a Deus pela minha família ter aumentado com pessoas tão especiais.

Aos meu amigos: Adalvan, Anderson, Binho, Eliel, Felipe, Meiriane, Nicolas, Paola, Raquel, Ricardinho, Serginho, Vanessa, Washington, Weinner.

Em especial, aos meus amigos Marquinho, Thiago e Mari, ao Irmão Luiz Carlos e à Irmã Liette, pela força no “início de Viçosa”, tornando a estada aqui muito mais suave.

À equipe do laboratório: Ana Paula, Cassiano, Cecília, Fábio, Guilherme, Isabella, Ivan, Janaína, Léo, Lizzy, Márcia, Moisés, Priscila, Rafael, Renata e Roney.

Aos funcionários, que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

ALEXANDRE NAVARRO DA SILVA, filho de Carlos Cardoso da Silva e Maria da Conceição Navarro da Silva, nasceu em 07 de fevereiro de 1986 em Campinas, no estado de São Paulo.

Iniciou seus estudos na Escola Estadual Dr. Cândido Rodrigues, em São José do Rio Pardo, em 1992. Em 2001 estudou no Colégio Unigrau, onde conclui o ensino médio.

Em março de 2004, ingressou na Universidade Federal de Viçosa – MG, onde se graduou em Engenharia de Produção em janeiro de 2009.

Em março do mesmo ano, iniciou o curso de Mestrado no programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos na Universidade Federal de Viçosa, concluindo em fevereiro de 2011.

# ÍNDICE

LISTA DE TABELAS .....	vii
LISTA DE FIGURAS .....	viii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT .....	xi
INTRODUÇÃO GERAL .....	1

## **Capítulo 1 - Produtos e operações no processamento de soro de leite: uma revisão .....**

<b>1. Soro de leite.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Concentrado proteico de soro de leite .....</b>	<b>4</b>
<b>3. Processamento do soro: principais operações unitárias.....</b>	<b>6</b>
3.1 Concentração.....	7
3.2 Ultrafiltração .....	9
3.3 Desmineralização.....	10
3.4 Secagem por atomização.....	14
3.5 Fermentação da lactose para produção de etanol.....	15
3.6 Concentração e secagem da lactose .....	18
<b>4. Aspectos ambientais.....</b>	<b>19</b>
<b>5. Modelagem de processos.....</b>	<b>20</b>
<b>6. Viabilidade econômico-financeira .....</b>	<b>22</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>26</b>

## **Capítulo 2 - Modelagem do Processamento de Concentrados Proteicos de Soro: Análise Técnica e Econômica.....**

<b>1. Introdução.....</b>	<b>36</b>
<b>2. Materiais e Métodos .....</b>	<b>38</b>
2.1 Descrição dos modelos.....	38
2.2 Análise financeira e de risco .....	42
<b>3. Resultados e Discussão .....</b>	<b>44</b>
3.1 Balanços de massa.....	44
3.2 Descrição dos custos .....	45
3.3 Análise financeira e de risco .....	47
3.4 Avaliação do impacto poluidor .....	52
<b>4. Conclusão.....</b>	<b>53</b>
<b>5. Referências Bibliográficas .....</b>	<b>53</b>

<b>Capítulo 3 - Produção Integrada de Concentrado Proteico de Soro e Derivados da Lactose: Viabilidade Técnico-Econômica .....</b>	<b>57</b>
1. Introdução.....	57
2. Materiais e Métodos .....	58
2.1 Descrição dos modelos .....	58
2.2 Análise financeira e de risco .....	66
3. Resultados e Discussão .....	68
3.1 Balanços de massa .....	68
3.2 Descrição dos custos .....	70
3.3 Análise financeira e de risco .....	72
3.4 Avaliação do impacto poluidor .....	78
4. Conclusão.....	79
5. Referências Bibliográficas .....	80
CONCLUSÃO GERAL .....	84

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição centesimal do soro de leite.....	3
Tabela 2 - Composição típica de alguns concentrados proteicos de soro (CPS) em pó. ....	5
Tabela 1.1 – Percentual dos componentes do soro utilizado para modelagem do processo.....	40
Tabela 1.2 – Principais características dos processos para produção de CPS 34 e CPS 80.....	41
Tabela 1.3 - Composição dos produtos finais CPS 34, CPS 80 e Creme. ....	44
Tabela 1.4 – Consumo de insumos para produção de CPS 34 e CPS 80. ....	45
Tabela 1.5 – Resumo dos parâmetros econômicos das plantas para produção de CPS 34 e CPS 80.....	49
Tabela 1.6 – Distribuições de probabilidade utilizadas para a análise de risco.....	51
Tabela 1.7 - Avaliação da redução de DBO e DQO para os processos de produção de CPS 34 e CPS 80.....	53
Tabela 2.1 – Percentual dos componentes do soro para modelagem do processo.....	62
Tabela 2.2 - Principais características dos processos para os cenários estudados.....	63
Tabela 2.3 – Quantidades dos produtos obtidos mediante os processamentos analisados. ....	69
Tabela 2.4 - Composição dos produtos lac-34, lac-80, etanol-34 e etanol-80. ....	69
Tabela 2.5 – Custo unitário dos produtos finais em cada modelo. ....	70
Tabela 2.6 – Resumo dos parâmetros econômicos das plantas para os modelos analisados.....	75
Tabela 2.7 – Distribuições de probabilidade utilizadas para análise de risco, com valores em R\$. ....	77
Tabela 2.8 - Avaliação da redução de DBO e DQO para os processos de produção analisados. ....	79

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Alguns produtos obtidos mediante o processamento do soro.....	7
Figura 2 - Digrama esquemático de eletrodialise em placas, alternando membranas permeáveis a cátion e a ânion.....	13
Figura 3 - Representação de um spray dryer de fluxo contracorrente. ....	14
Figura 4 - Representação da molécula de lactose. ....	15
Figura 1.1 – Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34. ....	39
Figura 1.2 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80. ....	39
Figura 1.3 – Parcelas dos custos de produção para CPS 34 e CPS 80.....	46
Figura 1.4 – Parcela dos custos de insumos para CPS 34 (a) e CPS 80 (b); Parcela dos custos de utilidades para CPS 34 (c) e CPS 80 (d).....	47
Figura 1.5 – Representação do ponto de equilíbrio da produção de CPS 34 (a) e CPS 80 (b).....	48
Figura 1.6 - Análises de sensibilidade da TIR aos preços de venda do creme e do CPS e do preço do soro para os processos de CPS 34 (a) e CPS 80 (b)...	50
Figura 1.7 – Distribuição de probabilidade acumulada para TIR dos processos de CPS 34 (a) e CPS 80 (b).....	51
Figura 2.1 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34 e lac-34. ....	60
Figura 2.2 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34 e etanol. ....	60
Figura 2.3 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80 e lac-80. ....	61
Figura 2.4 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80 e etanol. ....	61
Figura 2.5 – Parcelas dos custos de produção para os modelos avaliados. ....	71
Figura 2.6 – Parcela dos custos de insumos para CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d). ....	72
Figura 2.7 – Parcela dos custos de utilidades para CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-80 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d). ....	73
Figura 2.8 – Análise de ponto de equilíbrio dos modelos CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).....	74
Figura 2.9 – Análise de sensibilidade dos modelos CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d). Em relação ao preço do soro (—■—), do CPS (—▲—), do creme (—◆—), do etanol (—✱—) e da lactose em pó (—✱—), comparados à TMA (.....). ....	76
Figura 2.10 – Distribuição de probabilidade acumulada para TIR dos processos de CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).....	78

## RESUMO

SILVA, Alexandre Navarro da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Modelagem, simulação e análise técnico-financeira de uma unidade de processamento de soro de leite para produção integrada de concentrado proteico, lactose e etanol.** Orientador: Luís Antônio Minim. Co-orientadores: Ronaldo Perez e Valéria Paula Rodrigues Minim.

O processamento do soro de leite é uma atividade de grande importância tecnológica e ambiental para a cadeia agroindustrial do leite no Brasil. Sua utilização tem sido objeto de muitas pesquisas e vários estudos têm sido realizados com o objetivo de obter produtos comerciais de alto valor agregado concomitantemente à redução do seu alto poder poluente. Neste trabalho objetivou-se modelar e analisar a viabilidade técnico-econômica, incluindo análise de riscos e estudo de impacto poluidor, de uma unidade de processamento de soro para produção de concentrado proteico (CPS). Foi utilizado o software SuperPro Designer<sup>®</sup> para realizar a modelagem dos processos, sendo construídos dois modelos distintos para obtenção de CPS 34 e CPS 80. Os dados utilizados para construção dos modelos foram obtidos por meio de consulta bibliográfica, empresas de equipamentos, profissionais da área e empresas concorrentes. A avaliação econômica foi realizada mediante análise dos principais parâmetros utilizados: Tempo de Retorno de Capital (TRC), Valor Presente Líquido (VPL), Ponto de Equilíbrio (PE) e Taxa Interna de Retorno (TIR). A fim de avaliar a sensibilidade dos projetos, foi realizada análise por meio de gráficos do tipo “*spiderplot*”, o qual permite determinar quais as variáveis que causam maior impacto na TIR. Dados históricos destas variáveis foram utilizados para realização da análise de riscos, por meio de ajuste de distribuição de probabilidades utilizando o teste de qui-quadrado, sendo submetidas à simulação de Monte Carlo utilizando o software @Risk. Para análise de impacto poluidor, foram utilizados os parâmetros de Demanda Química de Oxigênio (DQO) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Os projetos se mostraram viáveis pelos altos valores de TIR e VPL, aliados ao baixo PE e TRC. As variáveis às quais a TIR foi mais sensível foram o preço do soro e do CPS. Por meio da análise de riscos, pôde-se verificar que o projeto

se mostra viável mediante a variabilidade associada às variáveis estudadas, sendo que a produção de CPS 80 apresentou-se mais atrativa com TIR mínima de 141,48%, comparado à produção de CPS 34 com TIR mínima de 72,42%. Apesar da maior viabilidade da produção de CPS 80, esta apresentou menor redução do impacto poluidor, devido à maior purificação de proteínas pelo processo de diafiltração. Paralelamente, foi realizado um estudo da utilização da lactose contida no permeado dos processos de separação de proteínas (ultrafiltração e diafiltração), integrado ao processo de produção de CPS, utilizando metodologia semelhante. Foram construídos quatro modelos, sendo estes para produção de: (1) CPS 34 e lactose em pó, (2) CPS 34 e etanol hidratado, (3) CPS 80 e lactose em pó, (4) CPS 80 e etanol combustível hidratado. Analisando os parâmetros econômicos, pode-se verificar que os projetos se mostraram viáveis técnico-economicamente, porém, individualmente, o custo de produção de etanol se mostrou superior ao preço de venda, o que tornam os projetos 1 e 3 inviáveis economicamente. Desta forma, as plantas com produção de lactose em pó são mais atrativas, havendo maior viabilidade de produção de CPS 80 frente ao CPS 34. A TIR se mostrou mais sensível aos preços do CPS, soro, lactose em pó e etanol, porém observa-se pela análise de risco que todos os projetos apresentam viabilidade, com TIR mínima de 49,14% para o modelo 2 e a TIR máxima pode chegar a 203,05% para produção de CPS 80 e lactose em pó. Também foi possível avaliar a redução do impacto poluidor do soro, permitindo concluir que os processos que envolvem a produção de lactose em pó permitem maior redução da carga poluidora do soro.

## ABSTRACT

SILVA, Alexandre Navarro da, M. Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Modeling, simulation and techno-financial analysis of a plant unit for integrated producing of whey protein concentrate, lactose and ethanol.** Adviser: Luis Antônio Minim. Co-advisers: Ronaldo Perez and Valéria Paula Rodrigues Minim.

The processing of cheese whey is an activity of great technological and environmental importance to the agribusiness chain of milk in Brazil. Its use has been the subject of many studies that have been conducted with the goal of reducing its high pollutant power concurrently to produce commercial products with high added value. This work aimed to model and analyze the technical and economic feasibility, including risk analysis and study of pollution impacts, of a processing plant to produce whey protein concentrate (WPC). Was used the software SuperPro Designer<sup>®</sup> to conduct the process modeling, and constructed two different models to obtain CPS 34 and CPS 80. The data used to build the models were obtained by consulting the literature, equipment companies, professionals and competitors. The economic evaluation was performed by analyzing the main parameters: Time of Recovery Capital (TRC), Net Present Value (NPV), Point of Equilibrium (PE) and Internal Return Rate (IRR). In order to evaluate the projects sensitivity, analysis was performed by means of spiderplot graphs, which allows determining the variables cause the greatest impact on IRR. Historical data of these variables were used to perform risk analysis, by adjusting the probability distribution using the chi-square test, and subjected to Monte Carlo simulation using @Risk software. For analysis of pollution impacts, was used the parameters of Chemical Oxygen Demand (COD) and Biochemical Oxygen Demand (BOD). The projects proved viable due to obtain high values of IRR and NPV, coupled with low PE and TRC. The variables for which the IRR was most sensitive were the price of whey and WPC. Through risk analysis, could see that the project is feasible by the variability associated with variables, and the production of WPC 80 was more attractive with minimum IRR of 141.48% compared to the production of CPS 34 with minimum IRR of 72.42%. Despite the greater viability of production of WPC

80, the pollutant reduction was less than the WPC 34, due to higher protein purification by diafiltration process. In parallel, a study of the use of lactose contained in the permeate of protein separation processes (ultrafiltration and diafiltration), the integrated process of WPC production, using similar methodology. Four models were built, which are to produce: (1) WPC 34 and lactose powder, (2) WPC 34 and fuel hydrous ethanol, (3) WPC 80 and lactose powder, (4) WPC 80 and fuel hydrous ethanol. Analyzing economic parameters, we can verify that the projects was feasible techno-economically, but individually, the cost of ethanol production was greater than its selling price, which makes the 1 and 3 projects unfeasible. Thus, plants with production of lactose powder are more attractive, with greater feasibility of WPC 80 production compared to WPC 34. The IRR was more sensitive to prices of CPS, whey, lactose powder and ethanol, however by the risk analysis all projects were feasible, with a minimum IRR of 49.14% for model 2 and the maximum IRR can reach to 203.05% for WPC 80 and lactose powder production. It was also possible to evaluate the reduction of pollution impacts of whey, allowing the conclusion that the processes involving lactose powder production allow further reduction of pollutant load of whey.

# INTRODUÇÃO GERAL

Grande parte das plantas de processamento de leite não tem um sistema de tratamento apropriado para a disposição do soro e seu descarte constitui uma perda significativa do potencial alimentício e energético, uma vez que 55% do total de nutrientes do leite são retidos no soro, entre os quais estão proteínas de alta qualidade e lactose. Por outro lado, a disposição do soro como um resíduo causa sérios problemas de poluição ambiental, uma vez que pode afetar a estrutura física e química de solos e quando liberado em grandes quantidades nos rios e reduzir a vida aquática pela depressão de oxigênio. Sendo assim, é necessária uma solução efetiva para este problema.

Os países desenvolvidos possuem legislação rigorosa que governa a disposição de efluentes. Tratamentos biológicos ajudam a disposição segura do soro atendendo as especificações ambientais, mas estas técnicas apresentam custos de operação elevados. Uma alternativa é o processamento do soro, pois devido ao conteúdo elevado de proteínas e lactose, constitui uma excelente matéria prima, a partir da qual podem ser obtidos produtos com alto valor agregado.

Produtos utilizando as proteínas do soro estão difundidos no mercado nacional e internacional, devido às suas diversas propriedades tecnológicas. A separação destas proteínas ocorre mediante processos de filtração por membranas, possibilitando a obtenção de concentrados e isolados proteicos, os quais são adicionados aos alimentos.

Várias alternativas são propostas para utilização da lactose, dentre elas a produção de etanol, estimulada pela crescente demanda mundial de energia, ácidos orgânicos, oligossacarídeos,  $\beta$ -galactosidases, entre outros. Dados os avanços da biotecnologia, tornou-se possível a modificação genética de células microbianas para a produção de produtos biotecnológicos a partir da lactose.

Entretanto, apesar de já existirem plantas comerciais de produção de etanol e concentrados proteicos a partir do soro em alguns países, para que sejam implantadas indústrias de processamento integrado destes produtos são

necessários estudos de viabilidade econômica que apoiem esta decisão, uma vez que os custos e retornos financeiros podem ser diferentes das plantas existentes em outros países. Este estudo propõe a modelagem e análise da viabilidade técnico-econômica, incluindo análise de riscos, e estudo de impacto poluidor de uma unidade de processamento de soro para produção integrada de concentrado proteico e etanol.

# Capítulo 1

## Produtos e operações no processamento de soro de leite: uma revisão

### 1. Soro de leite

Kosikowski (1979) define o soro de leite como um líquido turvo, amarelo-esverdeado, que se separa do coágulo ou da caseína durante a fabricação convencional de queijos e representa aproximadamente 90% do volume do leite. Tal coproduto retém 55% dos nutrientes do leite, apresentando em torno de 7% de sólidos totais (KILARA, 2008). Na Tabela 1 encontra-se a composição centesimal média do soro de leite.

Tabela 1 - Composição centesimal do soro de leite.

<b>Componente</b>	<b>Composição do soro (%)</b>
<b>Água</b>	93,1
<b>Sólidos Totais</b>	6,9
<b>Lactose</b>	4,6
<b>Proteínas</b>	0,9
<b>Cinzas</b>	0,8
<b>Gordura</b>	0,6

*Fonte: WALSTRA et al., 2006.*

Entre os sólidos totais destacam-se a lactose e as proteínas solúveis como os constituintes do leite presentes em maior quantidade no soro de leite (SANTOS, 2001).

Devido ao alto teor de matéria orgânica, o soro de leite, quando lançado em cursos d'água, causará um sério problema ambiental. O consumo de oxigênio dissolvido na água é aumentado pelos micro-organismos, diminuindo assim a concentração de oxigênio presente, causando a mortandade da fauna e flora aquáticas. Um litro de soro de leite requer em média 40 g de oxigênio para completa estabilização da matéria carbonácea contida na sua composição (DBO de 40 g O<sub>2</sub>/L). Em termos práticos, uma fábrica com produção média de 300 mil litros de soro por dia polui o equivalente a uma cidade com 150.000 habitantes (SILVA, 2006). Segundo Torres (1988), o potencial poluidor do soro de leite é cerca de cem vezes maior que o do esgoto doméstico. O elevado custo do processamento do soro de leite, entretanto, acaba dificultando a existência desta atividade no Brasil, ocorrendo frequentemente o lançamento direto em rios e mananciais. A legislação ambiental, por sua vez, proíbe esta ação, o que obriga os laticínios produtores de queijo a encontrarem alternativas para seu tratamento ou aproveitamento (VALDUGA *et al.*, 2006).

No estado de Minas Gerais, as especificações legais que regem o tratamento dos resíduos gerados pelas indústrias estão contidas na Deliberação Conjunta COPAM CERH 01/08. Dentre as normas, pode-se destacar a necessidade de redução na carga de DBO para 60 mgO<sub>2</sub>/L ou eficiência de 85% no sistema de tratamento de efluentes.

Em decorrência dos problemas enfrentados pelas indústrias para efetuarem o tratamento do soro como resíduo industrial, adequando-o às exigências dos órgãos de inspeção e saúde pública, várias iniciativas de testes de seu aproveitamento surgiram (SQUILASSI *et al.*, 2004). No Brasil, o soro de leite é aproveitado quase que exclusivamente para produção de soro em pó ou na fabricação de bebidas lácteas e ricota.

## **2. Concentrado proteico de soro de leite**

A recuperação das proteínas do soro é uma prática largamente utilizada nos países desenvolvidos. Os processos de recuperação se fundamentam nas

diferenças de massas molares e de carga iônica das proteínas, bem como na insolubilidade a elevadas temperaturas (MATTHEWS, 1984).

Os produtos comerciais mais produzidos à base de proteínas de soro são o concentrado e o isolado proteico de soro (JELEN, 2009). A composição do concentrado varia em função da concentração de proteínas desejada, conforme ilustra a Tabela 2.

Estas proteínas apresentam elevado valor nutricional uma vez que contém todos os aminoácidos essenciais para o metabolismo celular (histidina, triptofano, lisina, metionina, leucina, isoleucina, fenilalanina, valina e treonina) atendendo as recomendações da FAO para todas as idades (NICOLAU *et al.*, 2004; PASIN *et al.*, 2000).

Tabela 2 - Composição típica de alguns concentrados proteicos de soro (CPS) em pó.

Componente	%CPS			
	34	50	65	80
<b>Umidade</b>	4,6%	4,3%	4,2%	4,0%
<b>Proteína</b>	29,7%	40,9%	59,4%	75,0%
<b>Lactose</b>	46,5%	30,9%	21,1%	3,5%
<b>Gordura</b>	2,1%	3,7%	5,6%	7,2%
<b>Cinzas</b>	7,8%	6,4%	3,9%	3,1%
<b>Ácido Láctico</b>	2,8%	2,6%	2,2%	1,2%

Fonte: MILK INGREDIENTS (2008).

Segundo Mathur *et al.* (1979), os concentrados proteicos do soro apresentam características tecno-funcionais desejáveis para a indústria de alimentos: boa solubilidade, capacidade estabilizante, emulsificante, espumante, geleificante e boa adsorção de água. Assim, estas são encontradas em uma série de aplicações na indústria de alimentos, incluindo sopas desidratadas, molho para saladas, alimentos infantis, dietéticos,

geriátricos, sorvetes, queijos, produtos de panificação, confeitarias, iogurtes, carnes, bebidas lácteas e como suplemento alimentar (NICOLAU *et al.*, 2004).

Durante a produção de concentrado proteico de soro, o permeado resultante da ultrafiltração contém elevada concentração de lactose. Isto indica que o problema da alta DBO do soro não é totalmente resolvido somente com este processo, já que no permeado a lactose representa cerca de 70% dos sólidos presentes, ou seja, o componente com maior DBO presente no soro permanece em alta concentração neste permeado (MAWSON, 1994). Sendo assim, o açúcar contido neste permeado tem despertado grande interesse desde a década de 70, principalmente para uso em processos fermentativos com vistas à produção de etanol (COTON, 1976; CASTILLO, 1990; OZMIHCI & KARGI, 2007).

### **3. Processamento do soro: principais operações unitárias**

Com o surgimento de novas tecnologias, os produtos derivados do soro se tornaram ingredientes alimentares de ampla aplicação e muito valorizados atualmente.

Assim, para que sejam obtidos estes produtos, o soro deve passar por etapas básicas de processamento, sendo que o objetivo da primeira etapa é interromper a conversão de lactose em ácido láctico. Esta etapa consiste na pasteurização imediata para destruir os micro-organismos do fermento do queijo a partir do qual o soro foi obtido, ou ainda pelo resfriamento rápido do soro a uma temperatura inferior a 4°C para reduzir o processo de fermentação até que o soro seja pasteurizado. A segunda etapa visa remover os resíduos finos contidos no queijo e a gordura livre que não ficou aprisionada na massa de queijo. Para isto, utiliza-se frequentemente a tecnologia de centrifugação. As centrífugas removem partículas de caseína coagulada e a gordura, tendo como resultado o soro fluido desnatado e o creme do soro. Além deste processo, pode-se utilizar a microfiltração para clarificação do soro (HOMEM, 2004).

O soro deve sofrer um tratamento térmico brando para que as proteínas não sejam desnaturadas, portanto o tratamento mais indicado seria a

termização, constituída de um binômio tempo/temperatura de 60°C por 3 segundos (SMITH & BISHOP, 2004).

O soro fluido pode ser processado de diversas maneiras, de acordo com o produto final desejado. A Figura 1 representa algumas formas de processamento do soro.

A seguir serão apresentadas algumas das formas mais utilizadas para processamento do soro, com as tecnologias mais comumente empregadas.

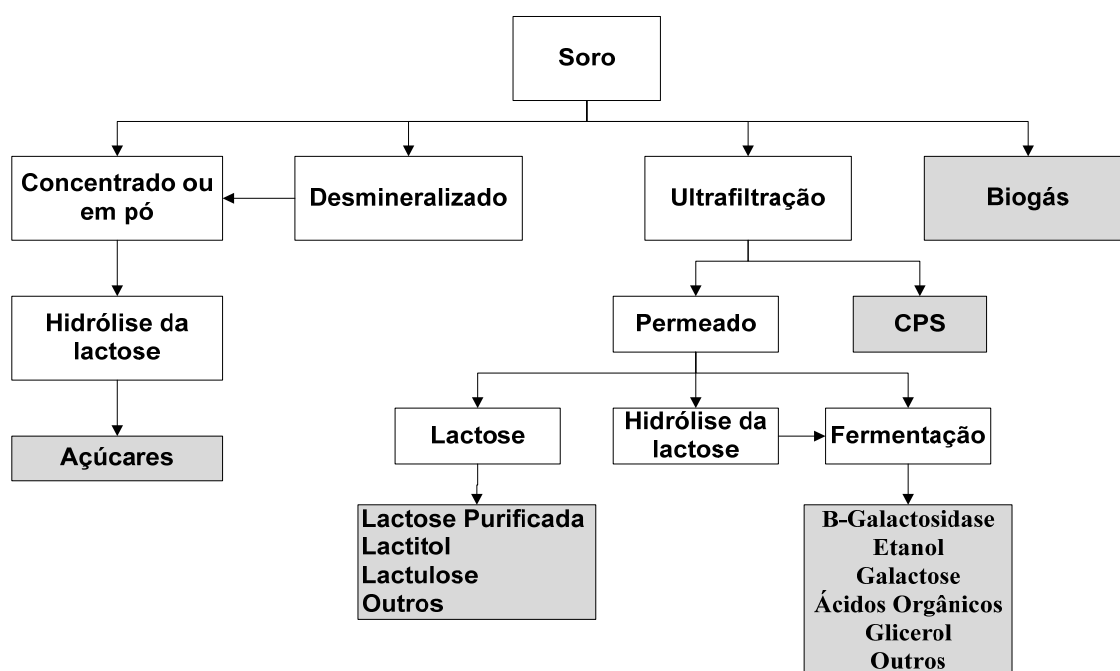


Figura 1 – Alguns produtos obtidos mediante o processamento do soro.

Fonte: Adaptado de SISO, 1996.

### 3.1 Concentração

Concentração é a remoção parcial da água de alimentos líquidos. Proporciona o aumento do teor de sólidos e, conseqüentemente, melhora a conservação devido à redução da atividade de água. Esta operação pode ser utilizada para reduzir a energia necessária em etapas subsequentes, além de reduzir custos de transporte. Entre os métodos mais utilizados, pode-se citar a concentração por evaporação e utilização de membranas (FELLOWS, 2009).

Na forma concentrada, o soro pode ser mantido com boas características de qualidade por um período mais longo quando comparado ao soro *in natura*, facilitando a manipulação e transporte. Assim, é comum que esta etapa apareça nos fluxogramas de processamento do soro para a obtenção de outros produtos finais, como o próprio soro concentrado, o soro integral em pó, soro em pó desmineralizado, soro delactosado em pó, soro desproteinado, entre outros (KOSIKOWSKI, 1979; YVES, 1979; ANON, 1983;).

Ainda há muita utilização do soro na sua forma concentrada, ou mesmo líquida, como suplemento alimentar para animais. Porém, o alto conteúdo de sais do soro o torna inadequado para muitas aplicações em alimentos. Portanto, para torná-lo um ingrediente funcional em potencial, é necessária a remoção dos minerais tanto quanto possível (KINSELLA, 1984). O produto de soro com teor reduzido em minerais é conhecido como soro desmineralizado (DAVID, 2006).

O soro concentrado pode ainda ser usado como substrato para produção de extrato de leveduras ou usado como realçador do sabor de alimentos em substituição ao monoglutamato de sódio (RÉVILLION *et al.*, 2000).

### **Concentração a vácuo**

O processo de concentração a vácuo é utilizado para reduzir a temperatura de ebulição da água, que passaria a estar entre 45 °C e 55 °C, dependendo da pressão de vácuo aplicada. Este tipo de processamento tem como objetivo minimizar alterações físico-químicas do produto a ser concentrado, permitindo a obtenção de produtos com melhores características sensoriais e nutricionais quando comparado ao tratamento de evaporação à pressão atmosférica (BRENNAN, 2006).

Após um pré-aquecimento, o soro é levado a um evaporador a vácuo, geralmente de múltiplo efeito. Assim, o soro é exposto a pressões mais baixas do que a atmosférica, reduzindo o ponto de ebulição. Deste modo, neste processo raramente utiliza-se temperaturas acima de 55 °C, para que os constituintes do soro sejam preservados. Este é o método mais comumente

utilizado e proporciona a obtenção de um soro concentrado com cerca de 30% a 40% de sólidos. Assim, ao objetivar redução de gastos com energia e maior concentração de sólidos deve-se utilizar concentradores com múltiplos efeitos ou um processo complementar como, por exemplo, a osmose reversa antes da evaporação (WALSTRA *et al.*, 2006).

### ***Osmose Reversa (OR)***

O processo de osmose reversa é aplicado para remoção de água, tendo como princípio de separação a alta solubilidade da água e pobre solubilidade da maioria dos componentes na membrana. O processo necessita de uma grande diferença de pressão osmótica entre o permeado (água que sai do soro) e o retentado (soro que é concentrado), para que possa ocorrer a separação. A osmose reversa pode ser uma alternativa ao processo de evaporação, devido ao seu baixo consumo de energia. Porém, apresenta a desvantagem de que a capacidade de concentração é reduzida em relação ao processo convencional, podendo ser utilizada para que sejam obtidas concentrações de 12% a 28% de sólidos (BAKER, 2004).

Na OR a membrana é semipermeável. Isto significa que esta não atua como um filtro, mas sim como uma camada de material na qual a água se difunde e pode passar através desta membrana, sendo uma barreira para a maioria dos componentes. Este processo remove água contra a pressão osmótica ( $\pi$ ), sendo esta uma pressão consideravelmente elevada. Para soro fluido  $\pi \approx 0.7$  MPa e aumenta durante a concentração, devido à remoção de água, de acordo com a relação  $\pi \approx 0.7 Q^*$ , sendo  $Q^*$  o aumento relativo do teor de sólidos (VAN DER BRUGGEN & GEENS, 2008).

### **3.2 Ultrafiltração**

Jelen (1991) relata que os processos de separação utilizando membranas são baseados no princípio de permeabilidade seletiva a um ou mais componentes de uma mistura líquida através de uma barreira. Este processo pode ser utilizado para concentração ou fracionamento de

componentes, produzindo duas correntes de líquidos com composições e características diferentes.

A ultrafiltração é muito utilizada para separar macromoléculas (proteínas) com grande efetividade, porém células somáticas, bactérias, micelas de caseína e glóbulos de gordura também são retidos, sendo necessária a remoção de finos e gordura do soro para que possa ser utilizado este processo. O tamanho dos poros das membranas utilizadas varia de 0,01 $\mu$ m a 0,1 $\mu$ m (BAKER, 2004).

Por meio de gradiente de pressão através da membrana, as moléculas menores capazes de permear a membrana são separadas. As moléculas e partículas maiores não conseguem passar pela membrana, sendo então concentradas. Com o uso de membranas com diferentes tamanhos de poros ou valores de massa molar de corte, torna-se possível separar ou concentrar seletivamente os componentes do soro (KUBOTA *et al.*, 2008).

Para facilitar maior separação de lactose e sais minerais e elevar a proporção de proteínas no retentado, pode-se adicionar água continuamente ao retentado à medida que este recircula pelo sistema de ultrafiltração. Este procedimento é chamado de diafiltração, que promove a lavagem ou separação subsequente da lactose e sais minerais das proteínas e permite obter maior proporção proteína/sólidos (RUSSOTTI & GÖKLEN, 2001).

A produção do concentrado e isolado proteico de soro de leite envolve os processos de ultrafiltração, como também diafiltração, para remoção efetiva da maior parte da lactose, minerais e outros componentes de pequena massa molecular. Além disso, o retentado é normalmente concentrado por evaporação antes da realização do processo de secagem para minimizar os custos da remoção da água, além de melhorar as propriedades físicas do pó (HOBMAN, 1984; TUNICK, 2008).

### **3.3 Desmineralização**

Devido ao seu alto teor de sais, o soro em pó ou concentrado tem sua utilização em alimentos de forma mais restrita quando comparado ao produto

sem os referidos sais. Desta forma, a etapa de desmineralização é necessária se a meta for agregar maior valor ao soro concentrado ou em pó, a fim de promover melhoria da qualidade sensorial do produto final ou ainda permitir a aplicação em produtos cujo objetivo seja o teor reduzido de sais.

Este processo consiste na remoção dos íons que conferem caráter salino ao produto, sendo que as técnicas mais utilizadas para este fim são troca iônica, eletrodialise e, principalmente, nanofiltração (WALSTRA *et al.*, 2006).

### **Troca Iônica**

O processo de troca iônica é utilizado para remover os íons, sendo que o produto deve passar por duas colunas com membranas de troca catiônica e aniônica separadamente, de modo que sejam retidos os cátions na membrana catiônica e ao passar pela membrana aniônica sejam retidos os ânions (TANAKA, 2007).

Este processo pode ser utilizado também para remoção de proteínas do soro, no qual o soro é acidificado com o objetivo de que as moléculas de proteína desenvolvam cargas positivas. Em seguida, o soro acidificado passa por resinas catiônicas (carga negativa), em que moléculas positivas de proteína se ligam às resinas de carga negativa, ao passo que a lactose, a gordura e os minerais são separados (ou "lavados") das proteínas. A etapa seguinte consiste em elevar o pH do sistema utilizando uma solução alcalina, o que levará as proteínas a desenvolverem carga negativa e, conseqüentemente, se desprenderem da resina. A troca iônica é utilizada em combinação com a ultrafiltração na fabricação de isolados proteicos de soro (WALSTRA *et al.*, 2006).

A taxa de remoção dos vários íons depende das propriedades da resina aplicada, mas pode-se obter um produto com concentrações muito baixas de sal. A desvantagem é que a resina utilizada tem que ser regenerada com alta frequência, o que requer grande quantidade de produtos químicos e água.

## ***Eletrodiálise***

De acordo com Baker (2004), membranas de troca iônica são utilizadas em uma série de processos de separação, sendo o processo mais importante a eletrodiálise. Em membranas de troca iônica, grupos carregados são ligados à matriz polimérica da membrana. Estes grupos de carga fixa excluem parcial ou completamente os íons de mesma carga da membrana. Isto significa que uma membrana aniônica, ou seja, com grupos fixos positivos, exclui (repele) íons positivos, mas é livremente “permeável” aos íons carregados negativamente, devido às interações dos íons com a membrana. Da mesma forma uma membrana catiônica com grupos fixos negativos exclui íons negativos, mas é livremente permeável aos íons carregados positivamente.

Em um sistema de eletrodiálise, as membranas aniônicas e catiônicas em forma de placas são dispostas alternadamente entre um anodo e um catodo, sob uma diferença de potencial elétrico. Assim, cada par de membranas catiônica e aniônica forma uma célula, pela qual é bombeada a solução. Os cátions, carregados positivamente, migram para o catodo e os ânions, com carga negativa, migram para o anodo. O resultado global do processo é que uma célula do par se torna pobre em íons, enquanto a célula adjacente torna-se enriquecida em íons. O processo, que é amplamente utilizado para remoção de íons dissolvidos na água, é ilustrado na Figura 2.

Comparada à operação de troca iônica por colunas, o processo de eletrodiálise apresenta uma grande vantagem de não haver necessidade de que as membranas sejam regeneradas por soluções aniônicas ou catiônicas, reduzindo o custo com materiais, mão de obra e tratamento de efluentes, já que os sais (ou qualquer outro componente que esteja com carga positiva ou negativa) não ficam ligados à matriz da membrana.

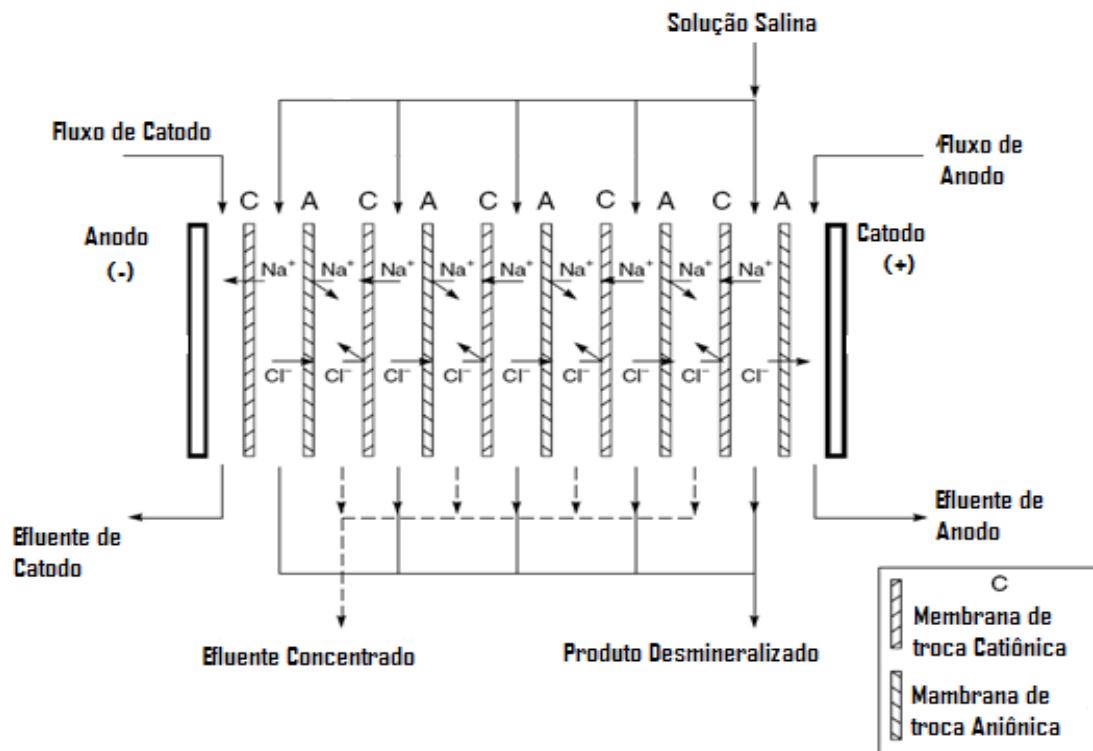


Figura 2 - Digrama esquemático de eletrodialise em placas, alternando membranas permeáveis a cátion e a ânion.

Fonte: Adaptado de BAKER, 2004.

### Nanofiltração

A nanofiltração é um processo em que se utilizam membranas com alta permeabilidade a íons monovalentes e água, mas não para outros componentes. Assim, proteínas, lactose e outras pequenas moléculas não iônicas são quase totalmente retidas (VAN DER BRUGGEN & GEENS, 2008).

Embora este método seja menos eficiente para a remoção do sal em relação à eletrodialise, apresenta a vantagem de que o líquido também é concentrado, o que muitas vezes é desejado de qualquer maneira. Geralmente apresenta melhor custo-benefício e tornou-se o método de escolha para a dessalinização parcial do soro de leite (BAKER, 2004).

### 3.4 Secagem por atomização

De acordo com a empresa GEA NIRO, o processo de secagem do soro consiste, basicamente, no pré-aquecimento, concentração, secagem spray e resfriamento pneumático; porém o soro em pó obtido por este processo é muito fino, com aspecto empoeirado e higroscópico, acarretando em difícil solubilização posterior, uma vez que pode se transformar em uma massa sólida. Isto é devido à lactose estar em um estado amorfo e não estável no ar atmosférico ou umidade normal, sendo então necessária a adição de uma etapa de processamento, chamada pré-cristalização da lactose antes da secagem por spray (KELLY, 2009).

Secagem por spray oferece uma maneira de pulverização de alimentos líquidos. O sistema spray de secagem inclui uma bomba de alimentação, um atomizador, um aquecedor de ar, uma câmara de secagem, além de um meio para a separação do pó do ar de exaustão (Figura 3).

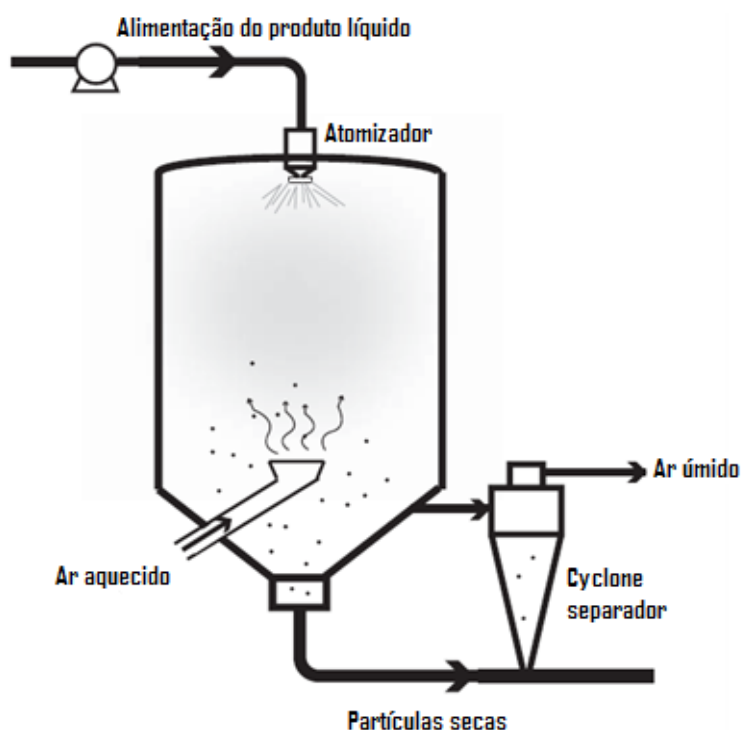


Figura 3 - Representação de um spray dryer de fluxo contracorrente.

Fonte: Adaptado de KERR, 2007.

A operação deste tipo de equipamento consiste, basicamente em bombear o líquido para um atomizador, que dispersa o líquido na forma de gotas finas em uma câmara de ar aquecido. Existem diversas variações na secagem a partir do meio de nebulização de partículas líquidas. O tipo de spray por alta pressão de atomização é o mais eficiente, utilizado quando a obtenção de partículas de tamanhos menores é necessária, sendo o líquido forçado através de um orifício estreito, que “quebra” o líquido em partículas (KERR, 2007).

Uma vez dispersos na câmara de secagem, as partículas finas são expostas ao ar aquecido. Em secadores de fluxos concorrentes, o ar é soprado no mesmo sentido do produto. Em secadores de fluxos contracorrente, o fluxo de ar é contrário à pulverização do produto. Em alguns casos, pode haver a necessidade da mistura de dois tipos de secadores (FELLOWS, 2009).

### 3.5 Fermentação da lactose para produção de etanol

Quimicamente, a lactose é um dissacarídeo constituído por uma molécula de glicose ligada a uma molécula de galactose por uma ligação  $\beta$ -1 $\rightarrow$ 4 glicosídica, tendo seu poder redutor conferido pela carbonila ligada ao carbono 1 da molécula de glicose (WALSTRA & JENNESS, 1984; HOLSINGER *et al.*, 1974), representada na Figura 4.

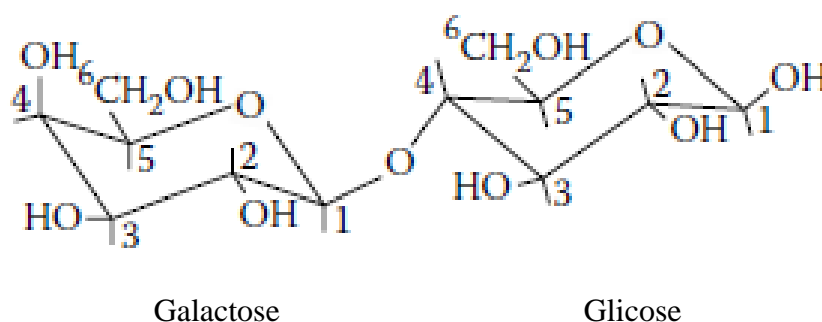


Figura 4 - Representação da molécula de lactose.

Fonte: WALSTRA, 2006

A utilização do soro de leite como meio de cultura tem sido estudada há certo tempo, devido à sua composição rica em lactose, proteínas e minerais o que torna um substrato de fermentação bastante interessante. Acrescente-se a estes fatores o fato de que o soro pode estar disponível em grande quantidade e a custo relativamente baixo (TUNICK, 2008).

A fermentação da lactose presente no permeado de soro de leite pode fornecer vários produtos, de acordo com o micro-organismo utilizado, como por exemplo: etanol, acetona, butanol, ácido láctico, lactato de amônio, ácido acético, ácido málico, gomas, aminoácidos, vitaminas, enzimas e metano (PONSANO *et al.*, 1992).

Estudos para a produção de etanol por meio da fermentação do soro de leite têm sido realizados desde a década de 80, sendo estimulados pela crescente necessidade mundial de energia, além de representar uma forma simples de tratamento e disposição de grandes quantidades de soro de leite produzido pela indústria (MAWSON, 1994).

O uso intensivo e ineficiente de combustíveis fósseis como fonte de energia causa a redução constante das reservas de forma considerável, resultando no decréscimo da energia disponível a partir destas fontes. Esta situação tem causado elevação dos preços e conflitos de guerra, por parte de alguns governos, para assegurar a energia de que suas nações necessitam. Há uma opinião unânime dizendo que a era da energia barata está chegando ao fim (ESCOBAR *et al.*, 2009).

A escolha do micro-organismo a ser utilizado na produção de etanol depende do processo empregado, do substrato em questão e dos objetivos a serem alcançados. Por isso, as leveduras produtoras de álcool devem apresentar certos requisitos para que a eficiência do processo seja adequada, apresentando elevada eficiência de fermentação (MENEZES, 1980; JONES *et al.*, 1983).

Segundo Mawson (1994), o micro-organismo mais utilizado para a produção de etanol a partir da lactose é o *Kluyveromyces fragilis*, pois este consegue fermentá-la diretamente. Tal levedura consome mais de 95% da lactose do soro não concentrado com eficiência de conversão entre 80% e 85%

em relação ao coeficiente teórico (0,538), resultando em cerca de 0,45 kg de etanol por kg de lactose.

De acordo com Thomas *et al.* (1996), a fermentação do caldo de cana de açúcar pode chegar a 90-95% de eficiência em relação ao coeficiente de rendimento teórico da glicose (0,511), obtendo a produtividade de 0,46 kg de etanol por kg de glicose consumida. O diferencial de produtividade do etanol advindo da lactose e da cana é o teor e o tipo de açúcar contido em cada uma das matérias primas, possibilitando a produção de 75 litros de etanol a partir de uma tonelada de cana e 15 litros de etanol a partir da mesma quantidade de soro. Além do tipo de açúcar, outro fator que afeta diretamente a produtividade é o tempo de fermentação, uma vez que este tempo é cerca de 5 vezes maior para a fermentação da lactose.

Conforme descrito por Champagne & Goulet (1988), também é comprovado que a lactose não é um açúcar fermentescível diretamente pela levedura *Saccharomyces cerevisiae*. Porém, a produção de etanol por este micro-organismo pode ser obtida realizando-se a hidrólise do carboidrato pela  $\beta$ -galactosidase, produzida por outro micro-organismo (*Kluyveromyces sp.*). Este processo apresenta atuação máxima em pH igual a 4,5 e temperatura de incubação de 30°C (SOUZA, 2005).

Estudos baseados na tecnologia de DNA recombinante têm sido realizados no sentido de desenvolver cepas de *S. cerevisiae* capazes de produzir etanol em grandes quantidades, por meio da fermentação direta de soro de leite e conversão da molécula de glicose e galactose geradas pela hidrólise da lactose (PORRO *et al.*, 1992). Como exemplos destes estudos pode-se citar Taya *et al.* (1984), Ryu *et al.* (1991) e Guimarães *et al.* (2008). Há também pesquisas que mostram a tendência do custo de produção diminuir ao se concentrar a lactose antes do processo de fermentação, uma vez que a produção de álcool se eleva e a sua separação se torna econômica (CASTILLO, 1990). Desta forma, a combinação destas tecnologias pode elevar a rentabilidade da produção de álcool a partir do soro de leite.

A primeira planta de produção de etanol a partir da lactose do soro de leite com operação comercial foi implantada em 1978 na Irlanda pela *Carbery*

*Milk Products Ltd.* A partir de então, o processo denominado “Processo Carbery” tem sido adotado por indústrias nos Estados Unidos e na Nova Zelândia, onde está implantada a *Anchor Ethanol Ltd.*, maior companhia que utiliza esta técnica, produzindo cerca de 20 milhões de litros de etanol por ano (LING, 2008).

### **3.6 Concentração e secagem da lactose**

A lactose e as proteínas solúveis são os componentes mais importantes presentes no soro. Tipicamente, o soro contém 5-6% de lactose, 0,8-1,0% de proteínas e 0,6% de gordura. As proteínas solúveis têm impulsionado grande interesse nos pesquisadores a respeito do seu potencial uso na dieta humana devido às suas propriedades bioativas. Por outro lado, a lactose pode apresentar utilização na indústria farmacêutica, como suplemento de formulações infantis; ou em produtos de panificação, para realçar a cor ou o sabor dos alimentos. Em adição, a lactose pode ser utilizada na produção de glicose e galactose por meio de sua hidrólise. Quando comparada com outros carboidratos, apresenta menor valor calórico, menor índice glicêmico e menor cariogenicidade (SCHAAFSMA, 2008).

Algumas tecnologias são utilizadas no processamento de soro de leite para obtenção de concentrados proteicos, incluindo tecnologias de membrana. Porém, o processo de concentração e fracionamento das proteínas do soro se torna mais interessante quando também é considerada a recuperação da lactose para aplicações industriais (ATRA *et al.*, 2005; MUÑI *et al.*, 2005).

A lactose é o componente majoritário do soro de leite e sua recuperação não é apenas uma alternativa econômica, mas também permite minimizar a poluição ambiental com o descarte deste constituinte juntamente às águas residuárias, uma vez que apresenta elevada Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (SOUZA *et al.*, 2010).

As patentes registradas por Cloidt (2007) e Theoleyer (2006) demonstraram que a recuperação das proteínas e da lactose do soro de leite é possível. Na patente registrada por Cloidt, a recuperação da lactose é realizada por meio da utilização da membrana de ultrafiltração para separação das

proteínas, e osmose reversa para o aumento da concentração de lactose para facilitar a evaporação da água e da cristalização. Já a outra patente, é baseada na remoção parcial de cátions polivalentes presentes do soro para melhor evaporação da água e cristalização da lactose.

#### **4. Aspectos ambientais**

O soro de leite não é tóxico, mas quando lançado em um curso d'água provoca um enorme efeito poluidor, devido ao consumo do oxigênio dissolvido no corpo receptor. As bactérias e outros micro-organismos presentes no corpo receptor utilizam alguns dos componentes do soro (em especial a lactose – aproximadamente 70% dos sólidos totais) como substrato e, para fazê-lo, necessitam de oxigênio dissolvido. Assim, a gravidade da poluição devida ao soro vem do fato de que ele apresenta uma demanda bioquímica de oxigênio (DBO) muito elevada, de 30 g O<sub>2</sub>/L a 60 g O<sub>2</sub>/L, quando comparada, por exemplo, aos efluentes industriais que podem ter uma DBO na faixa de 500 mg O<sub>2</sub>/L a 3 g O<sub>2</sub>/L, ou chorume, o efluente da drenagem do tratamento do lixo urbano que pode ter DBO maior que 3 g O<sub>2</sub>/L (PORTO, 2001).

A disposição do soro de leite, portanto, conduz a sérios problemas ambientais e de poluição das águas. Se descartado no solo, compromete a sua estrutura físico-química e diminui o rendimento de colheita; se descartado nos cursos d'água reduz a vida aquática devido à redução do oxigênio dissolvido na água (PONSANO *et al.*, 1992).

Ressalta-se que o soro é constituído por carboidratos e 20% do total proteico do leite, componentes responsáveis por sua baixa vida útil e elevada demanda biológica de oxigênio. A lactose é a principal responsável por estes altos valores, já que a recuperação de proteínas reduz esses números em apenas 10 g O<sub>2</sub>/L, que representa cerca de 20% da DBO total do soro. Já a utilização da lactose reduz a DBO em mais de 75% (MAWSON, 1994). Uma fábrica com produção média de 10.000 L de soro por dia polui o equivalente a uma população de 5.000 habitantes, por isso, quando descartado como resíduo industrial, o soro tem sido considerado como um sério problema ambiental.

Descartar o soro sem tratamento adequado não é apenas um crime previsto em lei, mas também rejeitar um alimento de alta qualidade constituído de uma rica fonte de lactose e proteínas com diversas propriedades nutricionais, biológicas e funcionais, que pode ser utilizada como matéria-prima de diversos produtos, se tornando uma prática antissocial devido à carência mundial de alimentos (SMITHERS *et al.*, 1996).

Yorgun *et al.* (2008) avaliaram a redução da carga poluidora do soro mediante diferentes tratamentos utilizando tecnologia de membranas (Ultrafiltração, Nanofiltração e Osmose Reversa), verificando que o tratamento utilizando membranas de nanofiltração combinadas a membranas de osmose reversa permitiram a obtenção de melhores resultados, reduzindo cerca de 97% da Demanda Química de Oxigênio e concentrando o soro 6,8 vezes o volume original.

## **5. Modelagem de processos**

Modelagem de processos é a construção de modelos que representem sistemas reais existentes, ou sistemas hipotéticos, utilizados para: (1) explicar o comportamento dos sistemas; (2) construir teorias ou hipóteses que consideram o comportamento observado; (3) aumentar o desempenho do sistema; (4) projetar novos sistemas com o desempenho desejado; e/ou (5) descrever comportamentos futuros ou o efeito produzido por mudanças no valor das variáveis de entrada do modelo (KHOSHNEVIS, 1994; SARGENT, 1999).

De acordo com Paiva (2005), a modelagem e simulação é uma das mais poderosas ferramentas de análise disponível para projeto e operação de processos ou sistemas. Esta pode ser útil em qualquer uma das fases do ciclo de vida de um sistema de produção: desde a fase de análise do problema e definição de requisitos, até as fases de projeto e operação.

A simulação computacional tem sido utilizada para analisar e prever custos de produção de muitos processos industriais. É possível estimar de forma simples, rápida e com baixo custo, o efeito de variáveis como o aumento

dos custos com matéria-prima, utilidades, variações na composição do produto e incorporação de novas tecnologias. Iniciando com um cenário-base e desenvolvendo o modelo para simular determinadas condições, é possível a criação de diversos cenários com variadas informações, a fim de se verificar a sensibilidade de um determinado parâmetro. Com a modelagem é também possível que se obtenha informações de como o processo ocorre, possibilitando um maior entendimento deste (MCALOON *et al.*, 2000; TAYLOR *et al.*, 2000; KWIATKOWSKI *et al.*, 2006).

O mercado de simuladores computacionais têm se expandido rapidamente nas duas últimas décadas, sendo vários softwares comercializados com aplicações específicas, como *Vissim* (VISUAL SOLUTIONS, INC.), *Ansys* (ANSYS, INC.), *Arena* (ROCKWELL AUTOMATION), entre outros. Além destes softwares, o *SuperPro Designer* tem sido amplamente utilizado para aplicação em processos biotecnológicos. Este software pode ser utilizado para desenvolver e simular processos em batelada ou contínuos, ou ainda uma combinação destes. É utilizado para modelagem de processos em diversas áreas, tais com farmacêutica, química e de alimentos, sendo um software que apresenta relatórios de avaliação do processamento, em termos de eficiência, programação, entre outras funções, além de avaliação econômica e de emissão de poluentes (INTELLIGEN INC., USA).

A modelagem de processos utilizando o software *SuperPro Designer*<sup>®</sup> tem sido utilizada por diversos pesquisadores e empresas, como Petrobrás, *Bayer Pharma*, *Dow Chemical*, *Monsanto* entre outras (INTELLIGEN, INC., 2010).

Kwiatkowski *et al.* (2006), utilizando este software, realizaram a simulação e modelagem da produção de etanol a partir do milho para o cenário econômico dos Estados Unidos, de forma a analisar novas tecnologias e o impacto sofrido na rentabilidade do projeto mediante alterações de custos de operação e preços de venda dos produtos e coprodutos. Verificaram que o custo de produção de etanol se mostrou muito sensível ao preço do milho e ao conteúdo de amido presente na matéria-prima.

Haas *et al.* (2006) também utilizaram o *SuperPro Designer*<sup>®</sup> para avaliar economicamente a produção de biodiesel a partir de óleo de soja mediante processo de trans-esterificação, juntamente à recuperação de éster e glicerol, construindo cenários para o mercado deste produto nos Estados Unidos. Puderam observar que o custo com o estoque de abastecimento de óleo representa cerca de 90% do custo do produto final, sendo este também influenciado pelo preço de venda dos coprodutos.

## **6. Viabilidade econômico-financeira**

A análise de rentabilidade de um projeto proporciona uma alocação dos recursos disponíveis de um empreendimento, sendo de grande importância na tomada de decisão no que concerne à aplicação financeira (NEVES, 1996).

Os parâmetros usualmente adotados para a avaliação econômica de empreendimentos de diversas naturezas são: Tempo de Retorno de Capital (TRC), Taxa Interna de Retorno (TIR), Ponto de Equilíbrio (PE) e o Valor Presente Líquido (VPL).

Estes índices foram utilizados em muitos estudos, como mostra a pesquisa realizada por Gnansounou & Dauriat (2010), que descrevem uma revisão sobre a análise técnico-financeira para produção de etanol lignocelulósico. Petrolia (2008), também estudou os aspectos econômicos da produção de etanol a partir do milho como estudo de caso em Minnesota, Estados Unidos, utilizando estes parâmetros.

O TRC é definido como o período de tempo necessário para que o capital empregado, relativo aos investimentos iniciais, seja recuperado em sua integralidade (SANVICENTE, 1997). A equação que define o tempo de recuperação do capital ( $n$ ) está descrita em Noronha (1987) e é dada por:

$$\sum_{t=0}^n V_t = 0 \quad 1$$

Onde:

$V_t$  = Valor do fluxo líquido de caixa no período “t”;

$n$  = Número de períodos avaliados.

De acordo com Contador (1981), a TIR é a taxa de juros que faz com que o valor atribuído às receitas futuras se iguale ao custo do investimento. Assim, o projeto se torna viável se a TIR for igual ou superior ao custo de oportunidade do capital da empresa. Por definição, a TIR de um projeto é expressa por:

$$0 = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+i^*)^t} \quad 2$$

Onde:

$i^*$  = Taxa Interna de Retorno

Em geral,  $V_0 < 0$ , quando  $t = 0$ , e  $V_t > 0$  quando  $t \geq 1$ , ou seja, o investimento ( $V_0$ ) é feito no primeiro ano e os retornos líquidos ( $V_t \geq 1$ ) começam a partir do segundo ano (NORONHA, 1987).

Segundo Holanda (1983), o ponto de equilíbrio ou de nivelamento (PE) identifica o volume de produção ou o nível de utilização dos recursos produtivos e capacidade instalada, em que as receitas são iguais a todos os custos (fixos e variáveis). Ou seja, determina a capacidade mínima em que a empresa deve trabalhar, o qual pode ser estimado pela equação:

$$PE = \frac{CF}{RT - CV} \quad 3$$

Onde:

**CF** = Custo Fixo;

**RT** = Receita Total; e

**CV** = Custo Variável.

De acordo com Noronha (1987), o Valor Presente Líquido (VPL) do projeto é calculado por meio do somatório dos resultados anuais do fluxo de caixa líquido, descontados ano a ano, a uma dada taxa de juros anual. A partir de então, compara-se o valor deste somatório com o valor do investimento total. Se a diferença for positiva significa que os recursos financeiros gerados pelo projeto são capazes de pagar o investimento. Assim, o VPL para a taxa mínima de atratividade  $i$  (TMA) é dado por:

$$VPL = \sum_{t=0}^n \frac{V_t}{(1+i)^t} \quad 4$$

Onde:

**VPL** = Valor Presente Líquido;

**i** = Taxa de desconto previamente estabelecida (TMA);

Para Lopes (1992), ao utilizar apenas os indicadores descritos (TRC, PE, VPL e TIR), há a desconsideração das flutuações dos valores das variáveis em questão, o que não é necessariamente realista, devido às incertezas inerentes ao futuro. Assim, a análise de sensibilidade é uma das técnicas utilizadas para esta análise dinâmica, que consiste em variar certos itens componentes do custo e/ou receita, mantendo os demais constantes (CONTADOR, 1981).

Outro aspecto importante da análise de sensibilidade, segundo Noronha (1987), é a determinação do ponto crítico de determinadas variáveis, que é o valor da variável independente que modifica a decisão de aceitar para a de rejeitar o empreendimento, ou vice-versa. Eschenbach (1992) apresenta duas técnicas gráficas que são normalmente utilizadas nesta análise: o diagrama de tornado, responsável pela síntese do impacto total de muitas variáveis independentes, e o "*spiderplot*", que exhibe mais informações sobre as variáveis quando o número analisado for menor.

Apesar da análise de sensibilidade ser realizada de forma dinâmica em relação às variáveis estudadas, não fornece resultados suficientes como técnica de análise de riscos em projetos de investimentos. Primeiramente, porque é uma análise parcial, já que apenas uma variável é considerada de cada vez, não permitindo que os efeitos negativos de uma variável sejam compensados pelos efeitos positivos de outra. Em segundo lugar, a indicação pura e simples de que o projeto é ou não sensível a certas variáveis, apesar de útil, não satisfaz ao tomador de decisão. É importante que se tenha também uma ideia das probabilidades de ocorrência de situações adversas, bem como suas consequências sobre os resultados do projeto (NORONHA, 1987).

Assim, a análise de riscos de um projeto por meio de probabilidades estatísticas visa a fornecer uma maior realidade aos tomadores de decisão, já que o risco assumido ao investir em um projeto deve ser o mínimo possível. Para isto, pode-se proceder a análise destes dados com o auxílio de softwares computacionais, tal como o @Risk (PALISADE CORPORATION, USA), RENO (RELIASOFT, BRASIL), Crystal Ball (ORACLE, USA) entre outros.

Para a análise de risco, muitos trabalhos utilizam a metodologia da simulação de Monte Carlo, podendo citar Kräupl & Wieckert (2007), Akerberg & Zacchi (2000) e Guimarães *et al.* (2010). Operacionalmente, o método de Monte Carlo consiste em simular variáveis previamente selecionadas e em calcular novos valores dos indicadores financeiros (TIR, VPL, entre outros). Após um número pré-definido de iterações aleatórias é gerada uma distribuição de frequência dos valores dos indicadores de viabilidade financeira do empreendimento, permitindo avaliar a probabilidade de ocorrência de um determinado evento ou situação (NEVES, 1996).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKERBERG, C.; ZACCHI, G. (2000) An economic evaluation of the fermentative production of lactic acid from wheat flavour. **Bioresource Technology**, 75, 119-126.

ANON, M.C. (1990). Siero di latte, problema o risorsa? **Industri Alimentari**, 29, 383-384.

**ANSYS, INC.** Disponível em: <[www.ansys.com](http://www.ansys.com)>. Acesso em: 15/03/2010.

ATRA, R.; VATAI, G.; BECKASSY-MOLNAR, E.; BALINT, A. (2005) Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. **Journal of Food Engineering**, 67, 325-332.

BAKER, R.W. **Membrane technology and applications**. 2 ed. England: John Wiley & Sons. 2004. 545p.

BRENNAN, J.G. **Food processing handbook**. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. 2006. 582p.

CASTILLO, F. J. Lactose metabolism by yeasts. In: VERACHTERT, H.; DE MOT, R. (eds.) **Yeast Biotechnology and Biocatalysis** Marcel Dekker: New York. 1990. p. 297-320.

CHAMPAGNE, C. P.; GOULET, J. (1988) Growth of baker's yeast (*Saccharomyces cerevisiae*) in lactose-hydrolyzed cheese-whey ultrafiltrate. **Canadian Institute of Food Science and Technology journal**, 21, 545-548.

CLOIDT, R.; LEHMAN, H. (2007) Process for the preparation of lactose from whey, **European Patent Application**, EP1869984 (A1).

COPAM-CONSELHO DE POLÍTICA AMBIENTAL – E CERH - CONSELHO ESTADUAL DE RECURSOS HÍDRICOS DE MINAS GERAIS - COPAM/CERH-MG. **Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG N.º 1, de 05 de maio de 2008**. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes

ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Texto retificado e publicado no DOE de 20/05/2008. Belo Horizonte: DOE, 2008

CONTADOR, C. R. **Avaliação social de projetos**. São Paulo: Atlas. 1981. 301 p.

COTON, S. G. Recovery of dairy waste. In: BIRCH, G. G.; PARKER, K. J. e MORGAN, J. T. (eds.) **Food from Waste**. United Kingdom: Applied Science Publishers. 1976. p. 221-231.

DAVID, F.M. **Diferentes quantidades de soro de leite na alimentação de vacas secas**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Lavras. Lavras. 2006. 151 p.

ESCHENBACH, T. G. (1992) Spiderplots versus tornado diagrams for sensitivity analysis. **Interfaces**, 22 (6), 40-46.

ESCOBAR, J. C.; LORA, E. S.; VENTURINI, O. J.; YÁÑEZ, E. E.; CASTILLO, E. F.; ALMAZAN, O. (2009) Biofuels: Environment, technology and food security. **Renew Sustain Energy Reviews**. 13, 1275–1287.

FELLOWS, P.J. **Food Processing technology: Principles and practice**. 3 ed. New York: CRC Press. 2009. 913p.

**GEA NIRO, INC**. Disponível: <<http://www.geafiltration.com>>. Acesso: em 08/09/2010.

GNANSOUNOU, E.; DAURIAT, A. (2010) Techno-economic analysis of lignocellulosic ethanol: A review. **Bioresource Technology**, 101 (13), 4980-4991.

GUIMARÃES, P. M. R.; TEIXEIRA, J. A.; DOMINGUES, L. (2008) Fermentation of high concentrations of lactose to ethanol by engineered flocculent *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology Letters**, 30, 1953–1958.

GUIMARÃES, P. M. R.; TEIXEIRA, J. A.; DOMINGUES, L. (2010) Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorization of cheese whey. **Biotechnology Advances**, 28 (3), 375–384

HAAS, M. J.; MCALOON, A. J.; YEE, W. C.; FOGLIA, T. A. (2006) A process model to estimate biodiesel production costs. **Bioresource Technology** 97, 671–678.

HOBMAN, P.G. (1984) Review of processes and products for utilization of lactose in deproteinated milk serum. **Journal of Dairy Science**. 67 (11), 2630-2651.

HOLANDA, N. **Planejamento e projetos**. Fortaleza: Universidade Federal do Ceará. 1983. 402 p.

HOLSINGER, V. H.; POSATI, L. P.; DE VILDISS, E.D. (1974) Whey beverages: a review. **Journal of Dairy Science**, 57, 849-859.

HOMEM, G.R. **Avaliação técnico-econômica e análise locacional de unidade processadora de soro de queijo em Minas Gerais**. Tese de doutorado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2004. 230 p.

**INTELLIGEN INC**. Disponível em: <[www.intelligen.com](http://www.intelligen.com)>. Acesso em: 1/11/2010.

JELLEN, P. (1991) Pressure-driven membrane processes: principles and definitions. In: **New applications of membrane processes**. IDF special issue. 9201, Belgium, p. 07-14.

JELLEN, P. Dried Whey, Whey Proteins, Lactose and Lactose Derivatives Products. In: TAMIME, A. Y. (ed.) **Dairy Powders and Concentrated Products**. England: John Wiley & Sons. 2009. p. 255-267.

JONES, R. P; PAMMENT, N.; GREENFIELD, P. F. (1983) Alcohol fermentation by yeasts – the effect of environmental and other variables. **Process Biochemistry**, 16 (3), 42- 49.

KELLY, P. M. Significance of lactose in milk powders. In: FOX, P. F. e MCSWEENEY, P. L. H. (eds.) **Advanced Dairy Chemistry Volume 3: Lactose, water, salts and minor constituents**. New York: Springer. 2009. p. 80-97.

KERR, W.L. Food Drying and Evaporation Processing Operations. In: MYER, K. (ed.) **Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery**. New York: William Andrew, Inc. 2007. p. 303–340

KHOSHNEVIS, B. **Discrete Systems Simulation**. Singapore: McGraw-Hill Inc., 1994.

KILARA, A. Whey and Whey Products. In: CHANDAN, R.C.; KILARA, A.; SHAH, N.P. **Dairy Processing & Quality Assurance**. New Delhi: John Wiley & Sons. 2008. p. 337-356.

KINSELLA, J.E. (1984) Milk proteins: physicochemical and functional properties. **Critical reviews in food science and nutrition**, 21, 3, 197-262.

KOSIKOWSKI, F.V. (1979) Whey utilization and whey products. **Journal of Dairy Science**, 62, 1149-1160.

KRÄUPL, S.; WIECKERT, C. (2007) Economic evaluation of the solar carbothermic reduction of ZnO by using a single sensitivity analysis and a Monte-Carlo risk analysis. **Energy**, 32, 1134–1147.

KUBOTA, N.; HASHIMOTO, T.; MOR, Y. Microfiltration and Ultrafiltration. In: LI, N. N.; FANE, A. G.; HO, W. S. W.; MATSUURA, T. (eds.) **Advanced membrane technology and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2004. pp. 101-130.

KWIATKOWSKI, J. R.; MCALOON, A. J; TAYLOR, F.; JOHNSTON, D. B. (2006) Modeling the process and costs of fuel ethanol production by the corn dry-grind process. **Industrial Crops and Products**, 23 (3), 288-296.

LING, K.C. (2008) Whey to ethanol: a biofuel role for dairy cooperatives?, **USDA Rural Development**, Washington DC. Disponível em: <<http://www.rurdev.usda.gov/RBS/pub/RR214.pdf>> Acesso em: 10/03/2010.

LOPES, J. P. E. **Análise econômica de contratos de integração usados no complexo agroindustrial avícola brasileiro**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1992. 105 p.

MCALOON, A., TAYLOR, F., YEE, W. (2000) Determining the Cost of Producing Ethanol from Corn Starch and Lignocellulosic Feedstocks, NREL Report TP-580-28893. **National Renewable Energy Laboratory**, Golden, CO.

MATHUR, B.N.; SHAHANI, K.M. (1979) Use of Total Whey Constituents for Human Food. **Journal of Dairy Science**, 62 (1), 99–105.

MATTHEWS, M. E. (1984) Whey protein recovery processes and products. **Journal of Dairy Science**, 67, 2680-2692.

MAWSON, A. J. (1994) Bioconversion for whey utilization and waste abatement. **Bioresource Technology**, 47, 195-203.

MENEZES, T. J. B. **Etanol, o combustível do Brasil**. São Paulo: Agronômica Ceres. 1980. 223 p.

**MILK INGREDIENTS**. Disponível em: <<http://www.milkingredients.ca>>. Acesso em 10/03/2010.

MINAS AMBIENTE/CETEC. **Pesquisa Tecnológica para Controle Ambiental em pequenos e médios laticínios de Minas Gerais: Estado da Arte**. Belo Horizonte: Minas Ambiente/CETEC. 1998.

MORR, C. V.; HA, E. Y. W. (1993) Whey protein concentrates and isolates: processing and functional properties. **Critical Reviews Food Science and Nutrition**, 33 (6), 431-436.

MUÑI, A.; PÁEZ, G.; FARIA, J.; FERRER, J.; RAMONES, E. (2005) Eficiência de um sistema de ultrafiltração/nanofiltração tangencial em serie para el

fraccionamento y concentración del lactosuero. **Revista Científica**, 15, 361-367.

NEVES, A. L. R. A. **Viabilidade técnico-econômica e análise de risco da implantação de microcervejarias no Brasil**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1996. 82 p.

NICOLAU, E.S.; SQUILASSI, K.M.B.S.; COTTA, M.A.B.O.; MESQUITA, A.J.; QUEIROZ, G.M. (2004) **Soro de queijo – Importância e características nutricionais**. Disponível em: <[http://www.laticinio.net/inf\\_tecnicas.asp?cod=40](http://www.laticinio.net/inf_tecnicas.asp?cod=40)>. Acesso em: 25/11/2010.

NORONHA, J. F. **Projetos agropecuários: administração financeira, orçamento e viabilidade econômica**. 2. ed. São Paulo: Atlas, 1987. 269 p.

**ORACLE**. Disponível em : <[www.oracle.com](http://www.oracle.com)> Acesso em janeiro de 2011.

OZMIHCI, S.; KARGI, F. (2007) Continuous ethanol fermentation of cheese whey powder solution: effects of hydraulic residence time. **Bioprocess Biosystem Engineering**. 30, 79-86.

**PALISADE CORPORATION**. Disponível em: <[www.palisade.com](http://www.palisade.com)> Acesso em: 05/12/2009.

PAIVA, A. F. O. **Geração automática de modelos de simulação de uma linha de produção na indústria têxtil**. Dissertação de Mestrado. Engenharia Industrial, Universidade do Minho. Guimarães. 2005. 239 p.

PASIN, G. E, MILLER, S. L. U.S. Whey Products and Sports Nutrition. **U.S Dairy Export Council**. Arlington, U.S.A. 2000.

PETROLIA, D. R. (2008) The economics of harvesting and transporting corn stover for conversion to fuel ethanol: A case study for Minnesota. **Biomass and Bioenergy**. 32, 603 – 612.

PONSANO, E. H. G.; PINTO, M. F.; CASTRO GOMES, R. J. H. (1992) Soro de leite – Obtenção, características e aproveitamento: revisão. **Semina Ciência Agrícola**, 13 (1), 92 – 96.

PORRO, D., MARTEGANI, E., RANZA, B. M.; ALBERGHINA, L. (1992) Development of high cell density cultures of engineered *Saccharomyces cerevisiae* cells able to grow on lactose. **Biotechnology Letters**, 14, 1085-1088.

PORTO, L. M. **Estudo e determinação das melhores condições operacionais de processo de produção da ricota**. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia Química da UFMG. Belo Horizonte, 2001.

**RELIASOFT**. Disponível em: <[www.reliasoft.com.br/reno](http://www.reliasoft.com.br/reno)> Acesso em: 10/12/2009.

RÉVILLION, J. P.; BRANDELLI, A.; AYUB, M. A.Z. (2000) Produção De Extratos De Leveduras De Uso Alimentar a Partir Do Soro De Queijo: Abordagem De Elementos Técnicos E Mercadológicos Relevantes. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 20 (2).

**ROCKWELL AUTOMATION**. Disponível em: <[www.arenasimulation.com](http://www.arenasimulation.com)>. Acesso em: 15/03/2010.

RUSSOTTI, G.; GÖKLEN, K.E. Crossflow membrane filtration of fermentation broth. In: WANG, W.K. (ed.) **Membrane separations in biotechnology**. New York: Marcel Dekker, Inc. 2001, p. 85-160.

RYU, Y.W.; JANG, H.W.; LEE, H.S. (1991) Enhancement of ethanol tolerance of lactose assimilating yeast strain by protoplast fusion. **Journal of Microbiology and Biotechnology**. 1, 151–156.

SANVICENTE, A. Z. **Administração financeira**. 3 ed. São Paulo: Atlas. 1997. 283 p.

SANTOS, J.P.V.; FERREIRA, C.L.L.F. (2001) Alternativas para o aproveitamento de soro de queijo nos pequenos e médios laticínios. **Revista do Instituto de Laticínios Cândido Tostes**. 56, 321,44-50.

SARGENT, R. G. Verification and Validation of Simulation Models. In: **Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference**. 1994. p. 77-87

SCHAAFSMA, G. (2008) Lactose and Lactose Derivatives as Bioactive Ingredients in Human Nutrition. **International Dairy Journal**.18, 458-465.

SILVA, D.J.P. **Diagnóstico do consumo de água e da geração de efluentes em uma indústria de laticínios e desenvolvimento de um sistema multimídia de apoio**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 2006. 88 p.

SISO, M. I. G. (1996). The biotechnological utilization of cheese whey: a review. **Bioresource Technology**. 57, 1-11.

SMITH, K.; BISHOP, R. Production Technologies. In: LAGRANGE, V. **Reference manual for U. S. whey and lactose products**. USDEC – United States Dairy Export Council. 2004. 226 p.

SMITHERS, G. W.; BALLARD, F. J.; COPELAAND, A. D.; DE SILVA, K. J.; DIONYSIUS, D. A.; FRANCIS, G. L.; GODDARD, C.; GRIEVE, P. A.; MCINTOSH, G. H.; MITCHELL, I. R.; PEARCE, R. J.; REGESTER, G. O. (1996) New opportunities from the isolation and utilization of whey proteins. **Journal of Dairy Science**, 79, 8, 1454-1459.

SOUZA, R.R.; BERGAMASCO, R.; COSTA, S.C.; FENG, X.; FARIA, S.H.B.; GIMENES, M.L. (2010) Recovery and Purification of Lactose from Whey. **Chemical Engineering and Processing**, doi:10.1016/j.cep.2010.08.015

SQUILASSI, K.M.B.S.; COTTA, M.A.B.O.; NICOLAU, E.S.; MESQUITA, A.J. (2004) Soro de queijo – **Alternativas para o aproveitamento na alimentação humana**. Disponível em: <[http://www.laticinio.net/inf\\_tecnicas.asp?cod=40](http://www.laticinio.net/inf_tecnicas.asp?cod=40)> Acesso em: 26/11/2009.

TANAKA, Y. **Ion exchange membranes: fundamentals and applications**. Amsterdam: Elsevier. 2007. 531p.

TAYA, M.; HONDA, H.; KOBAYASHI, T. (1984) Lactose-utilizing hybrid strain derived from *Saccharomyces cerevisiae* and *Kluyveromyces lactis* by protoplast fusion. **Agriculture and Biological Chemistry**. 48, 2239–43.

TAYLOR, F.; KURANTZ, M.J.; GOLDBERG, N.; MCALOON, M.J.; CRAIG JR., J.C. (2000) Dry grind process for fuel ethanol by continuous fermentation and stripping. **Biotechnology Progress**. 16, 541–547.

THEOLEYRE, M. A. (2006) Method for producing lactose from lactoserum or a permeate derived from lactoserum ultrafiltration, **French Patent**, FR2844280 (B1).

THOMAS, K. C.; HYNES, S. H.; INGLEDEW, W. M. (1996) Practical and theoretical considerations in the production of high concentrations of alcohol by fermentation. **Process Biochemistry**. 31, 321–331.

TORRES, C.C. **Bebidas à base de soro de queijo: caracterização físico-química, microbiológica e sensorial**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Viçosa. Viçosa. 1988. 117 p.

TUNICK, M. H. Whey protein production and utilization: a brief history. In: ONWULATA, C. I. e HUTH, P. J. (eds.) **Whey processing, functionality and health benefits**. Ames: Blackwell Publishing. 2008. p. 1-14.

VALDUGA, E.; PAVIANI, L.C.; MAZUR, S.P.; FINZER, J.R.D. (2006). Aplicação do soro de leite em pó na panificação. **Alimentos e Nutrição**, 17 (4), 393-400.

VAN DER BRUGGEN, B. e GEENS, J. Nanofiltration. In: LI, N.N.; FANE, A.G.; HO, W.S.W.; MATSUURA, T. (eds.) **Advanced membrane technology and applications**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2008. pp. 271-296.

**VISUAL SOLUTIONS**. Disponível em: <[www.vissim.com](http://www.vissim.com)>. Acesso em: 15/03/2010.

WALSTRA, P.; JENNESS, R. **Química y física lactológica**. Zaragoza Acribia S. A. 1984. 423p.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J.T.M.; GEURTS, T.J. **Dairy science and technology**. 2 ed. New York: CRC Press. 2006. 768p.

YORGUN, M.S.; AKMEHMET BALCIOGLU, I.; SAYGIN, O. (2008) Performance comparison of ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis on whey treatment. **Desalination**. 229, 204–216.

YVES, V. (1979). Le lactoserum. Matière première noble pour les industries alimentaires humaines et animales. **Revue Laitière Française**. 372, 27-39.

# Capítulo 2

## **Modelagem do Processamento de Concentrados Proteicos de Soro: Análise Técnica e Econômica**

### **1. Introdução**

O soro é o líquido resultante da coagulação do leite e é gerado à partir da fabricação de queijo, sendo constituído por proteínas ricas em aminoácidos essenciais, lactose e sais minerais (TUNICK, 2008).

Em decorrência dos problemas enfrentados pelas indústrias laticinistas para efetuar o tratamento do soro como resíduo industrial, os estudos para aproveitamento para o soro de leite tiveram início na década de 20 e foram intensificados com o passar do tempo, uma vez que a não utilização racional do soro constitui uma prática antieconômica e até mesmo antissocial, não só devido ao caráter poluidor, mas também à carência mundial de alimentos (BELL *et al.*, 1928; BENDER & SUPPLEE, 1932; JONES & LITTLE, 1933; RAMSDELL & WEBB, 1938; SHARP & DOOB JR., 1941; HARLAND & ASHWORTH, 1945).

No Brasil, houve muita resistência quanto ao uso do soro em certos produtos, estando associado à adulteração, o que geralmente não acontece em países desenvolvidos, nos quais a recuperação das proteínas do soro é uma prática largamente utilizada para produção de concentrados proteicos (ANTUNES *et al.*, 2003).

A obtenção do concentrado proteico de soro de leite envolve os processos de ultrafiltração, como também diafiltração, para remoção efetiva da maior parte da lactose, minerais e outros componentes de baixo peso molar. Além disso, o retentado é normalmente concentrado por evaporação antes da realização do processo de secagem para minimizar os custos da remoção da água e para melhorar as propriedades físicas do pó (HOBMAN, 1984).

Os concentrados proteicos de soro de leite são sistemas multifuncionais que vêm sendo adicionados a diversos alimentos, com o objetivo de modificar suas propriedades por meio da geleificação, aumento de viscosidade, estabilização de emulsões ou espumas, entre outros (EUSTON, *et al.*, 2009; MANOI & RIZVI, 2009; BURITI *et al.*, 2010; VON STASZEWSKI *et al.*, 2010; MARAFON *et al.*, 2011). A composição do concentrado varia em função da concentração de proteínas desejada. O CPS 34 é comumente utilizado em produtos com base de leite desnatado para melhorar sua textura, bem como para estabilizar e substituir gordura em iogurtes, misturas de panificação, alimentos dietéticos e alimentos infantis. Já os CPS 50, 65 ou 80 são apropriados para uso em bebidas nutricionais, sopas, produtos de padaria, carnes, alimentos dietéticos, bebidas fortificadas e produtos de baixo conteúdo em gordura e carboidrato. O CPS 80 é uma excelente alternativa para uso em certas aplicações, como substituição de proteínas da clara do ovo em merengues, sorvetes e coberturas geladas (MILK INGREDIENTS, 2008; LIZARRAGA *et al.*, 2006).

Embora já existam plantas comerciais de produção de concentrados proteicos de soro instaladas em alguns países, tais como EUA, Canadá e Nova Zelândia, é necessário um estudo de viabilidade financeira para efetiva tomada de decisão, uma vez que não existem estudos que comparem cenários de concentrados proteicos 34 e 80, os quais apresentam necessidades diferenciadas de beneficiamento e diferente valor econômico. A produção de CPS 80 utiliza o processo de diafiltração do soro permitindo maior remoção de lactose e sais, apresentando, portanto, maior valor agregado, devido à melhoria das características sensoriais do produto frente ao CPS 34, o qual apresenta elevado teor de sais e lactose.

Neste contexto, este estudo objetiva modelar e avaliar técnico-economicamente duas plantas distintas para produção de concentrados proteicos de soro – CPS 34 e CPS 80, além de analisar a redução do impacto poluidor do soro de leite.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Descrição dos modelos

Dois modelos distintos foram elaborados no software *SuperPro Designer*<sup>®</sup> 7.0, de modo a representar linhas genéricas para produção de concentrados proteicos de soro (CPS 34 e CPS 80) a partir de soro de leite doce, sendo ambas as plantas dimensionadas para processar 700 m<sup>3</sup> de soro por dia em bateladas de 20 horas de produção e 4 horas para limpeza.

O simulador de processos utilizado quantifica as necessidades de energia e parâmetros de cada parte principal dos equipamentos para os cenários de operação especificados. Volumes, composições e outras características físicas das correntes de entrada e saída de cada equipamento devem ser especificados. Estas informações possibilitam o cálculo do consumo de utilidades e custos dos equipamentos, uma vez que são necessárias para o seu dimensionamento. Estes dados foram obtidos em consultas a empresas de equipamentos para área de laticínios (Tetra Pak, GEA Niro, EJ Máquinas, Equimapel e Spray Process), empresas concorrentes dos produtos (Sooro, Alibra Ingredientes, Davisco Foods, Gemacom Tech e Glanbia Nutritionals), profissionais da área e literatura nacional e internacional pertinente ao assunto (MUÑI *et al.*, 2005; KERR, 2007; SCHAAFSMA, 2008; KELLY, 2009; SOUZA *et al.*, 2010).

A inserção de tais informações permite obter balanços de massa e energia em cada processo, possibilitando validar o modelo, ao confrontá-lo com informações presentes em especificações de equipamentos disponibilizadas pelos fornecedores e também com dados da literatura. Como resultados, também foi obtido a programação da utilização de equipamentos e a demanda de utilidades (água resfriada, vapor e energia elétrica).

A Figura 1.1 e Figura 1.2 representam os fluxogramas simplificados de produção de CPS 34 e CPS 80, respectivamente.

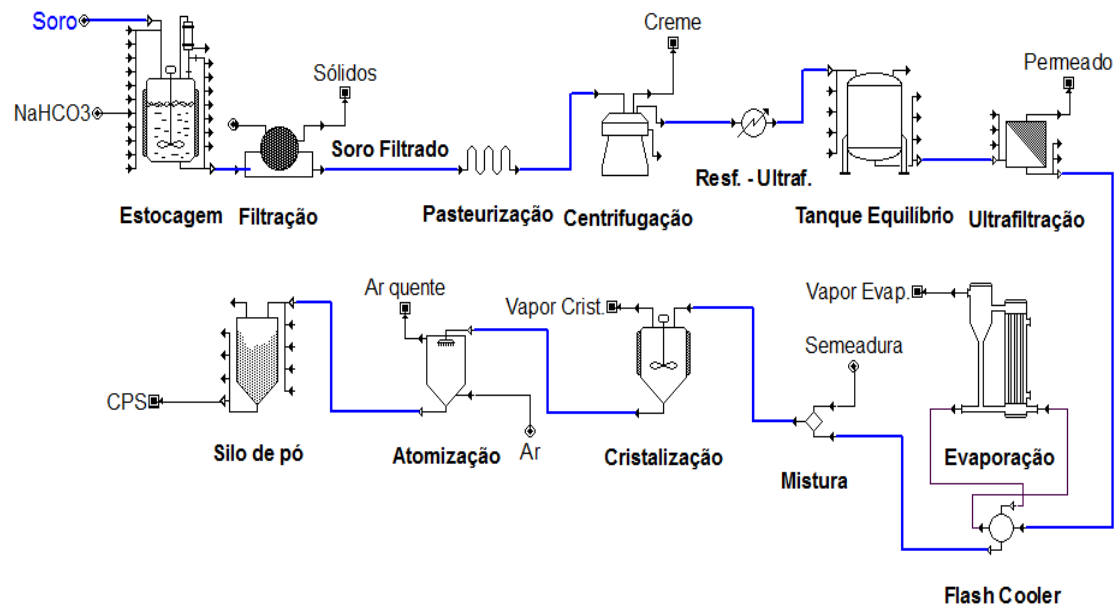


Figura 1.1 – Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34.

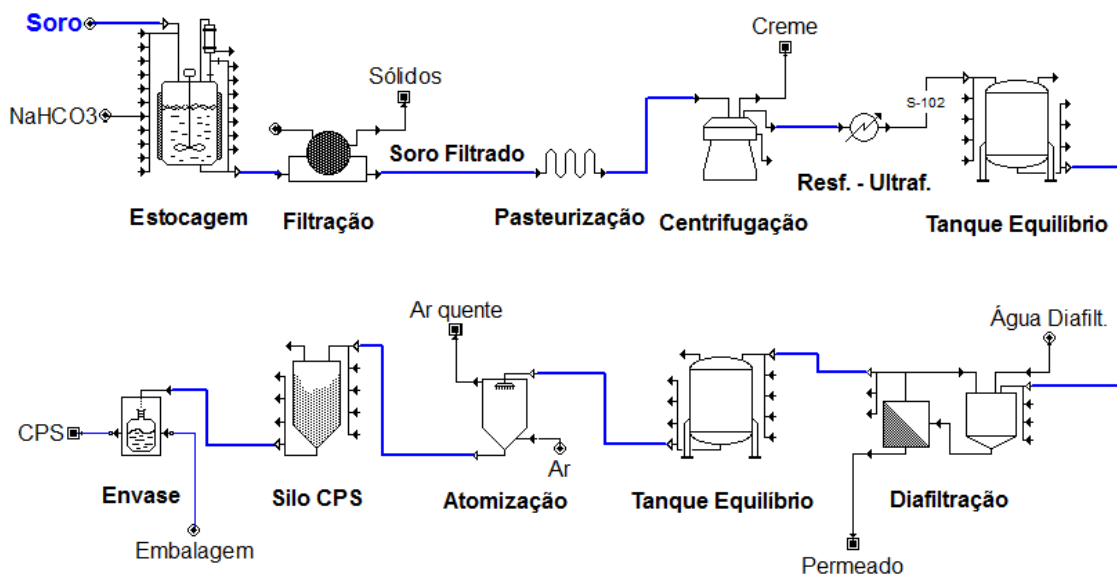


Figura 1.2 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80.

Na Tabela 1.1 está demonstrada a composição do soro utilizada para as simulações.

Tabela 1.1 – Percentual dos componentes do soro utilizado para modelagem do processo.

<b>Componente</b>	<b>Percentual no soro (%)</b>
Água	92,44
Lactose	4,6
Proteínas	0,9
Cinzas	0,8
Gordura	0,6
Finos	0,5
Ácido Láctico	0,16

*Fonte: Adaptado de WALSTRA et al., 2006.*

Como produtos finais dos processos modelados, foram obtidos o CPS 34 ou o CPS 80, juntamente ao creme com alto teor de gordura (superior a 75%), o qual tem destino industrial, principalmente para a produção de manteiga, denominada “Manteiga Comum” pela Resolução nº 4 de 28 de junho de 2000 do Ministério da Agricultura (MAPA).

As principais características dos equipamentos constituintes da linha de processamento estão descritas na Tabela 1.2.

### **Recepção e pré-tratamento do soro**

O soro é recebido em caminhões isotérmicos à temperatura em torno de 4 °C e armazenado em silos que devem suprir a produção de 700.000 litros de soro por dia, sendo que este recebimento deve ser completado em 10 horas por dia. Nestes silos, conforme informações provenientes de profissionais produtores deste tipo de produto, deve ser adicionado bicarbonato de sódio para redução de acidez do soro *in natura* de 16 °D para 12 °D.

Após a reação de neutralização parcial do ácido láctico, o soro passa pelo filtro rotativo a vácuo para remoção de finos e, então, é pasteurizado em trocador de calor a placas sob o binômio 72 °C/ 15s e desnatado em centrífuga,

que retira 90% da gordura, produzindo creme com teor mínimo de 75% de gordura.

Tabela 1.2 – Principais características dos processos para produção de CPS 34 e CPS 80.

<b>Processos</b>	<b>CPS 34</b>	<b>CPS 80</b>
Estocagem do soro <i>in natura</i>	Recebimento de 700 m <sup>3</sup> de soro em 10 horas/dia	
Filtração	Remoção de finos, com torta contendo 20% de umidade	
Pasteurização	Tratamento térmico de 72 °C por 15 segundos	
Centrifugação	Remoção de 90% da gordura do soro, produzindo creme com teor de gordura superior a 75%	
Ultrafiltração	Retentado com 9,85% de sólidos (FC = 3,5)	-
Diafiltração	-	Retentado com 18% de proteínas e 21,2% de sólidos.
Concentração	Concentração 35% de sólidos e temperatura final de 55 °C	-
Cristalização	Tempo de residência (3 h) e cristalização da lactose (80%)	-
Atomização	Obtenção de pó com umidade máxima em 4%	

## 2.2 Análise financeira e de risco

Para avaliação da viabilidade financeira, foi considerado período de avaliação de 17 anos, sendo 24 meses para construção e 4 meses para *startup*. A operação da planta deverá ocorrer em 4 turnos, em fluxo contínuo por 330 dias por ano.

As condições de financiamento utilizadas são aquelas praticadas pelo BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social), o qual permite financiamento de 80% para investimentos e 40% para capital de giro sob taxa de juros anual de 6,5% com período de amortização de 5 anos. A Taxa Mínima de Atratividade - TMA - considerada foi de 13,20% (acréscimo de 20% sobre a média da taxa SELIC em 2009).

Os impostos considerados para venda dos produtos foram 18% referentes a ICMS e 9,25% referentes ao PIS, contabilizados sobre o preço de venda.

Foram utilizados dados de custos de equipamentos, utilidades, mão de obra, materiais de limpeza CIP, matéria prima e insumos, os quais foram fornecidos por profissionais da área e por meio de pesquisa literária. Custos referentes a instalações, engenharia e contingência foram considerados como percentuais do custo com equipamentos.

Como respostas, foram analisados índices comumente utilizados para avaliação financeira de projetos, sendo eles: Tempo de Retorno de Capital (TRC), Valor Presente Líquido (VPL), Ponto de Equilíbrio (PE) e Taxa Interna de Retorno (TIR), sendo que este último possibilita a comparação de projetos com dimensões de investimentos distintas e, portanto, foi analisada mais profundamente mediante realização de análises de sensibilidade deste índice a variações percentuais dos preços de venda dos produtos finais e preço de compra do soro.

Para análise de risco, foram utilizadas as variáveis que promoveram maiores variações na TIR, ou seja, aquelas às quais este índice é mais

sensível. Assim, foram ajustadas distribuições de probabilidade associadas a dados históricos de valores destas variáveis, realizando o teste de Qui-quadrado para indicar a qualidade deste ajustamento.

Uma vez que não há um órgão que realize o acompanhamento dos preços do soro no Brasil, foi considerado que a distribuição de probabilidades que representa a variabilidade desta variável seria a triangular, a qual tem apenas três parâmetros a serem considerados: mínimo, número mais provável e máximo. Esta consideração foi feita devido à facilidade de ajustamento, uma vez que não há necessidade de grande número de dados, apenas informações de profissional que forneça os parâmetros necessários. Esta distribuição pode não representar totalmente a variação do preço do soro, porém possibilita a obtenção de estimativas com alto grau de confiabilidade (MUN, 2006).

Para os preços do CPS 34 e CPS 80, foram considerados dados de variação semanal do ano de 2010 compilados por Gould (2010). A distribuição de probabilidades que representa estes dados é a distribuição de Weibull, que necessita de dois parâmetros: a e b, os quais são combinações não lineares da média e desvio padrão. Esta distribuição é muito flexível, podendo assumir diferentes formas, de acordo com os valores dos parâmetros (RYCHLIK & RYDÉN, 2006).

Após definidas as distribuições de probabilidades que representam as variáveis utilizadas, foram realizadas simulações probabilísticas por meio da amostragem de Monte Carlo utilizando o software @Risk 5.0. Para as simulações foram realizadas 33.000 iterações, de modo a garantir um Intervalo de Confiança de 99% e tolerância de 1% para estimativa da média e do desvio padrão da TIR para análise de sua variabilidade, mediante as variações apresentadas pelas variáveis estudadas.

### 3. Resultados e Discussão

#### 3.1 Balanços de massa

O processamento de 700 m<sup>3</sup> de soro por dia possibilita a produção de 4.723 kg/dia de creme com o seu pré-processamento, além de 18.712 kg de CPS 34 ou 5.050 kg de CPS 80 por dia, de acordo com o processo. A composição de cada um dos produtos (Tabela 1.3) está de acordo aos produtos encontrados no mercado nacional sob mesma discriminação, o que permite realizar as comparações de preços a serem apresentadas.

Tabela 1.3 - Composição dos produtos finais CPS 34, CPS 80 e Creme.

Componente	Composição dos produtos (%)		
	Creme	CPS 34	CPS 80
Água	18,85	4,00	4,00
Lactose	1,00	50,64	4,88
Gordura	79,76	2,23	8,28
Proteína	0,18	33,80	81,86
Cinzas	0,21	9,75	0,98

Pode-se observar que o teor de proteínas do CPS 34 e do CPS 80 está dentro do esperado e que o produto CPS 80 apresenta maior teor de gordura do que o CPS 34, uma vez que o processo de diafiltração permite maior purificação de proteínas, porém não possibilita a remoção da gordura, que possui tamanho de partícula superior à da lactose e dos sais minerais. Por outro lado, o CPS 34 contém alto teor de lactose e sais devido a não haver diafiltração neste processo, no qual há a entrada de água na corrente de retentado, promovendo a “lavagem” de lactose e sais.

O consumo de insumos para produção de CPS 34 e CPS 80 está demonstrado na Tabela 1.4.

Como pode ser observado, o consumo dos insumos por kg de CPS 80 produzido é maior, comparado ao CPS 34, devido ao menor rendimento do produto, visto a maior purificação de proteínas, sendo acentuada a utilização de água no processo de diafiltração.

Tabela 1.4 – Consumo de insumos para produção de CPS 34 e CPS 80.

Insumo	kg/kg CPS	
	CPS 34	CPS 80
Soro	38,230	141,690
NaHCO <sub>3</sub>	0,016	0,031
Solução H <sub>3</sub> PO <sub>4</sub>	2,165	6,460
Solução NaOH	2,624	7,980
Água	5,792	199,810
Cristais de lactose	0,003	0

### 3.2 Descrição dos custos

Os custos dos produtos possuem diversas parcelas, as quais podem ser divididas em: insumos, mão de obra, consumíveis, utilidades, tratamento de resíduos e custos relacionados à instalação e ao controle de qualidade. A Figura 1.3 demonstra o comparativo entre as parcelas percentuais de custo em relação ao CPS 34 e CPS 80.

Devido à necessidade de maior quantidade de soro e demais insumos por kg de CPS 80 produzido e maior geração de resíduos líquidos pela diafiltração utilizada no processamento deste produto, os custos relacionados a insumo e tratamento de resíduos são maiores em relação ao CPS 34, apesar de ambos os processos apresentarem maiores comprometimentos do custo de produção relacionados às mesmas variáveis (insumos, utilidades e custos

relacionados à instalação). Kotoupas *et al.* (2007) avaliaram economicamente uma planta industrial de produção de CPS 50 e como um dos resultados obtidos, pode-se verificar que os custos relacionados à instalação e utilidades foram os mais representativos (juntos representavam 75% dos custos) e o custo com insumos foi de apenas 3,5%, devido ao processo ser integrado à produção de queijo e não considerar o custo com o soro, que no presente trabalho foi verificado como sendo a maior parcela com insumos (cerca de 95%-Figura 1.4).

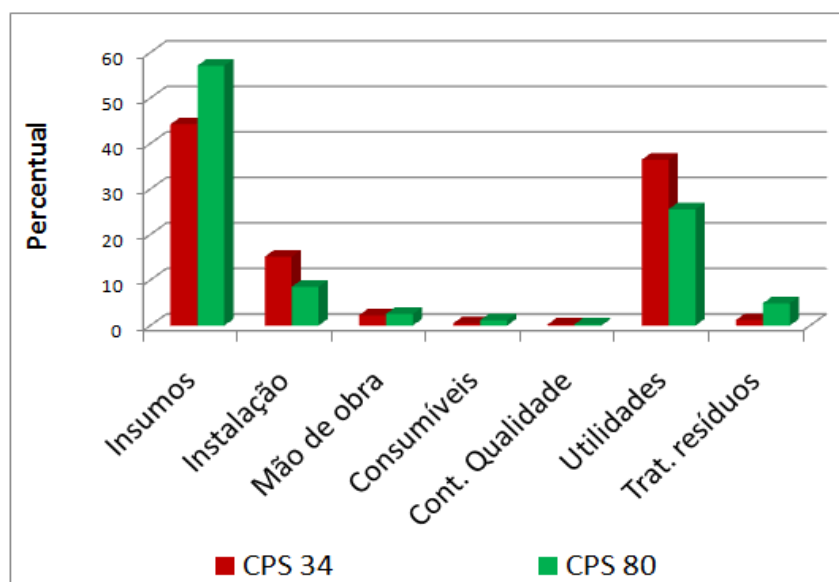


Figura 1.3 – Parcelas dos custos de produção para CPS 34 e CPS 80.

Com relação aos custos de insumos e utilidades, os gráficos representados pela Figura 1.4 descrevem de forma detalhada os seus componentes, podendo ser observado que os processos têm o soro como principal insumo, constituindo cerca de 95% do custo com esta finalidade. Quanto às utilidades, os dois processos apresentam maior custo com vapor, sendo que a produção de CPS 34 possui maior percentual do custo com este agente de aquecimento (73%), visto a necessidade de utilização de concentrador a vácuo e maior remoção de água no atomizador, frente à produção de CPS 80, que tem 58% do custo com utilidades comprometido com

vapor. Por outro lado, apresenta maior comprometimento financeiro com energia elétrica, devido à utilização do equipamento para diafiltração.

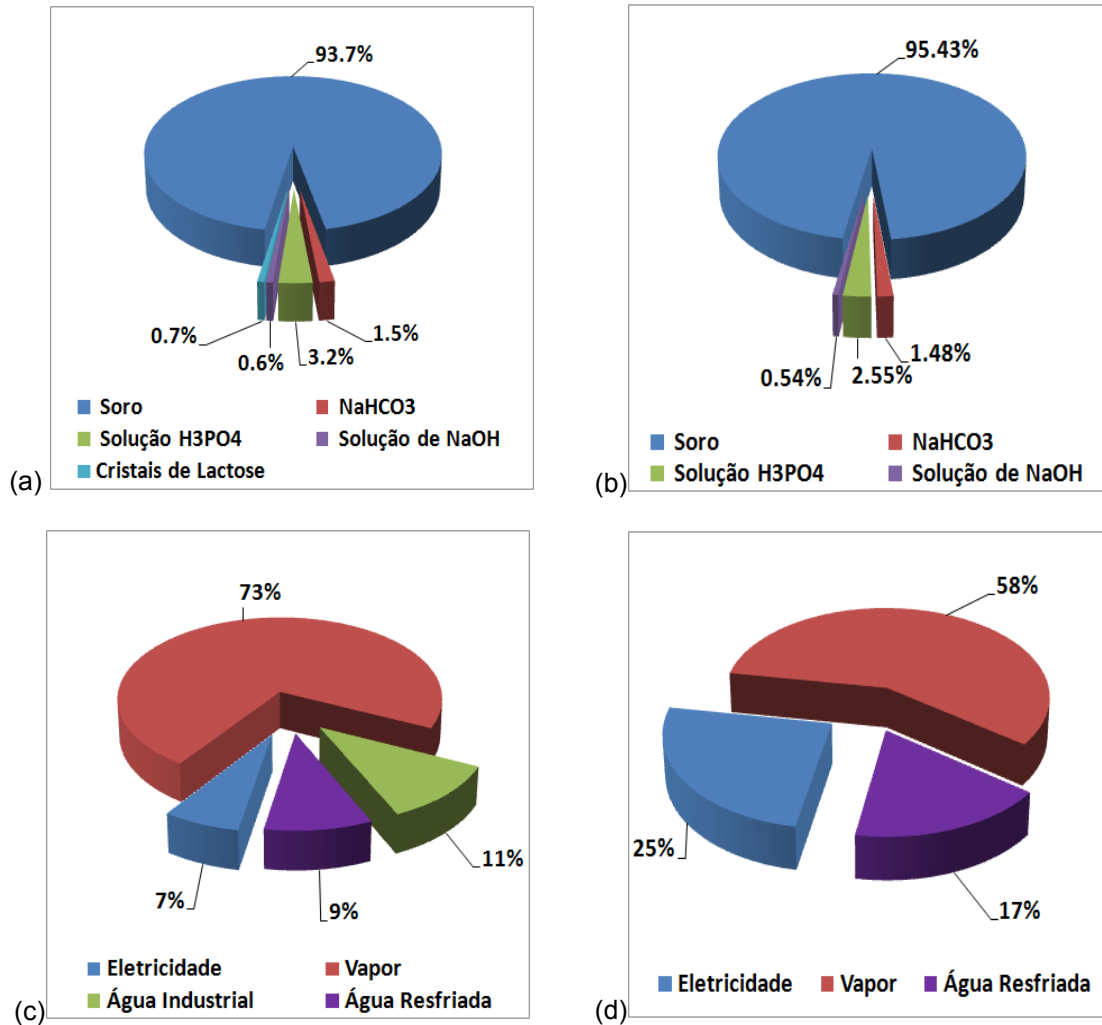


Figura 1.4 – Parcela dos custos de insumos para CPS 34 (a) e CPS 80 (b); Parcela dos custos de utilidades para CPS 34 (c) e CPS 80 (d).

### 3.3 Análise financeira e de risco

A avaliação econômica fornecida pelo software permitiu uma avaliação global do impacto econômico das plantas, incluindo investimento de capital, receita anual, custo operacional e índices econômicos (VPL, TRC e TIR). Para o caso da produção de CPS 34, o investimento total é de R\$44.285.000,00,

com custo operacional anual de R\$27.815.194,00, enquanto para a produção de CPS 80, o investimento total é de R\$18.702.000,00, com custo operacional anual de R\$21.715.890,00.

Para que haja viabilidade, inicialmente deve ser observada a relação entre receita e custo. A Figura 1.5 demonstra de que forma estas variáveis se comportam em função do nível de utilização da capacidade produtiva, considerando a receita obtida do creme (R\$6,00/kg) e CPS 34 (R\$7,40/kg) ou CPS 80 (R\$23,70/kg).

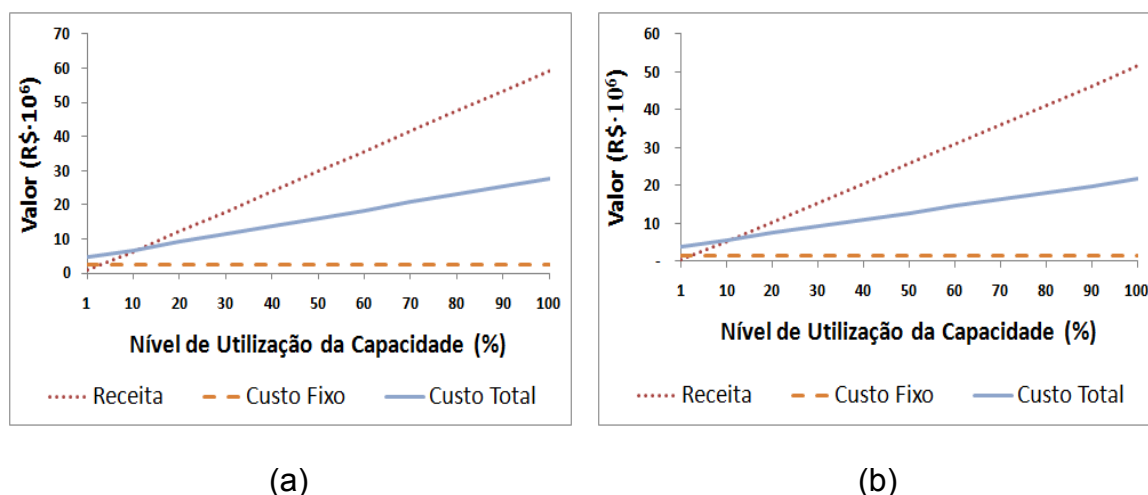


Figura 1.5 – Representação do ponto de equilíbrio da produção de CPS 34 (a) e CPS 80 (b).

Pode-se verificar que o ponto de equilíbrio do CPS 34 e do CPS 80 estão próximos a 11%, indicando que a partir deste nível de utilização da capacidade produtiva, o processo permite obtenção de lucro.

Além do ponto de equilíbrio, devem-se avaliar outros índices econômicos para análise de projetos, os quais estão dispostos na Tabela 1.5.

A viabilidade de ambos os projetos pode ser visualizada mediante os parâmetros apresentados, devido ao reduzido TRC, VPL positivo e TIR superior à TMA (13,2%), porém ao comparar os dois modelos, pode-se

identificar a produção de CPS 80 como sendo a mais vantajosa, devido ao menor investimento e TRC, aliados à elevada TIR, além de apresentar VPL aproximadamente igual ao do CPS 34. O estudo desenvolvido por Peters (2005) também demonstrou que a produção de CPS 80 seria mais viável em relação ao CPS 34, devido ao fluxo de caixa apresentar valores mais elevados para unidades integradas à produção de queijo com capacidades de 100 mil litros ou 2,7 milhões de litros de leite por dia.

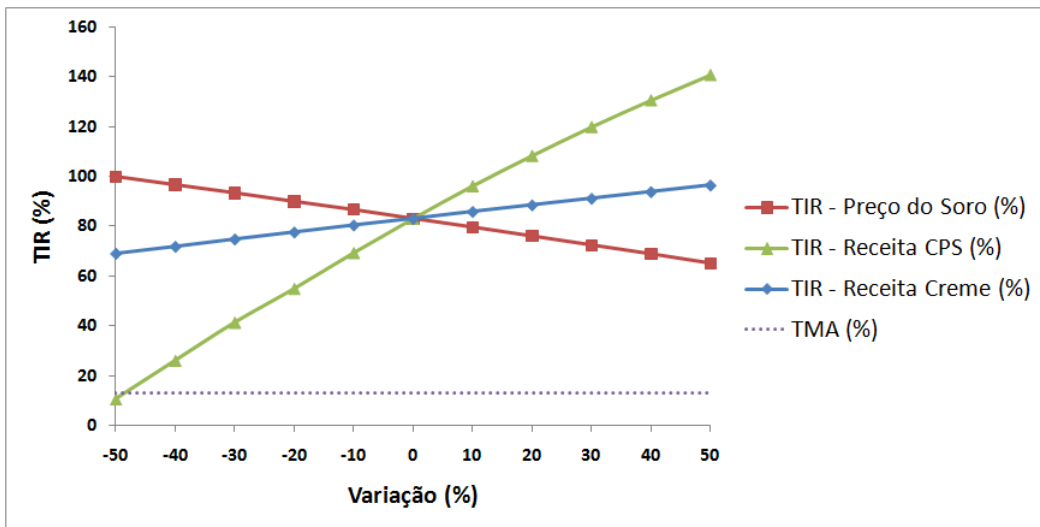
Tabela 1.5 – Resumo dos parâmetros econômicos das plantas para produção de CPS 34 e CPS 80.

<b>Parâmetro</b>	<b>CPS 34</b>	<b>CPS 80</b>
Investimento Total	R\$44.285.000,00	R\$18.702.000,00
Ponto de Equilíbrio	11,5%	11,3%
TRC	1,64 ano	0,73 ano
VPL	R\$97.313.000,00	R\$100.379.000,00
TIR	83,05%	165,23%

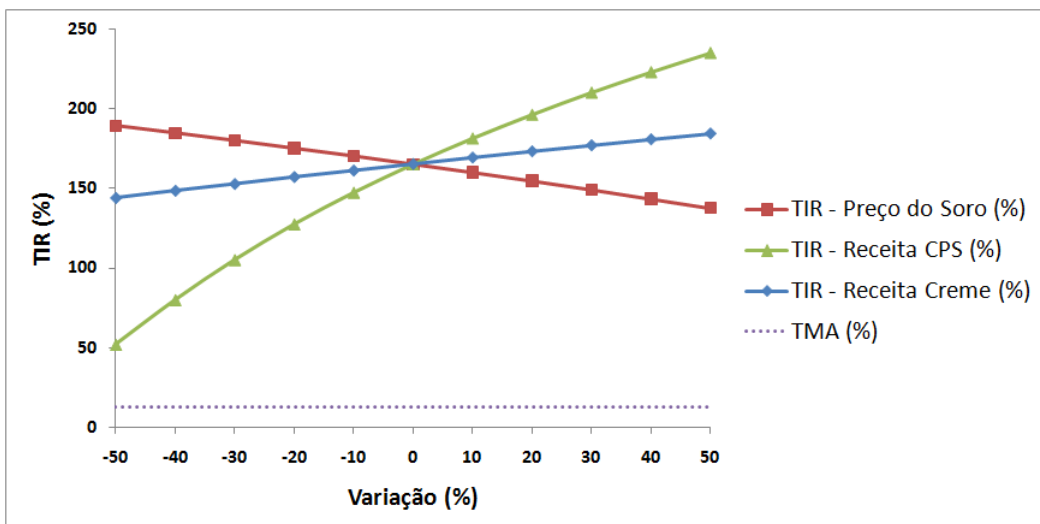
De qualquer forma, não se pode ter certeza de como o mercado se comportará no futuro, principalmente relacionado ao preço dos produtos e dos insumos. Contudo, observações sobre possíveis variações no preço contribuem para a tomada de decisão e para evitar situações imprevistas, pois, quanto menos susceptível às oscilações de preços, mais seguro será o investimento.

Como demonstrado na Figura 1.6, pode-se observar que para ambos os processos o preço do creme promove pouca variação no valor da TIR, seguido do preço do soro e, mais sensivelmente, ao preço do CPS, para o qual só apresenta valor menor do que a TMA para o CPS 34, se reduzir o seu preço pela metade do valor médio comercializado. Já para o CPS 80 a TIR permanece maior que a TMA para toda a variação considerada na análise. No

estudo desenvolvido por Peters (2005), pode-se observar que o preço do CPS é o fator ao qual o VPL é mais sensível, chegando a ser inviável se o preço de venda do produto final for menor do que 70% do preço médio praticado. No presente estudo, a sensibilidade do projeto é menor devido aos preços praticados no mercado nacional serem superiores ao do mercado externo, uma vez que o número de concorrentes é pequeno e este produto ser importado de países estrangeiros.



(a)



(b)

Figura 1.6 - Análises de sensibilidade da TIR aos preços de venda do creme e do CPS e do preço do soro para os processos de CPS 34 (a) e CPS 80 (b).

Para avaliar de forma dinâmica a TIR em função da variabilidade de mais de uma variável considerando suas flutuações de valores, o que pode acontecer facilmente na realidade do mercado, a análise de risco foi realizada considerando o preço do soro e do CPS para ambos os modelos, uma vez que promoveram maiores variações na TIR. Para tal, foram ajustadas distribuições de probabilidade às variáveis, as quais estão descritas na Tabela 1.6, juntamente ao p-valor associado, considerando o teste de qui-quadrado, com exceção do preço do soro *in natura* que foi obtido mediante informação do gerente de uma indústria de beneficiamento desta matéria prima.

Tabela 1.6 – Distribuições de probabilidade utilizadas para a análise de risco.

Variável	Equação	P-valor
Soro	Triangular (0,045;0,055,0.07) <sup>1</sup>	-
CPS 34	Weibull (2,2612;0,55895)	0,49
CPS 80	Weibull (2,2612;1,7688)	0,49

. A Figura 1.7 ilustra o gráfico de probabilidade acumulada da TIR resultante da análise de riscos associados às variáveis mencionadas.

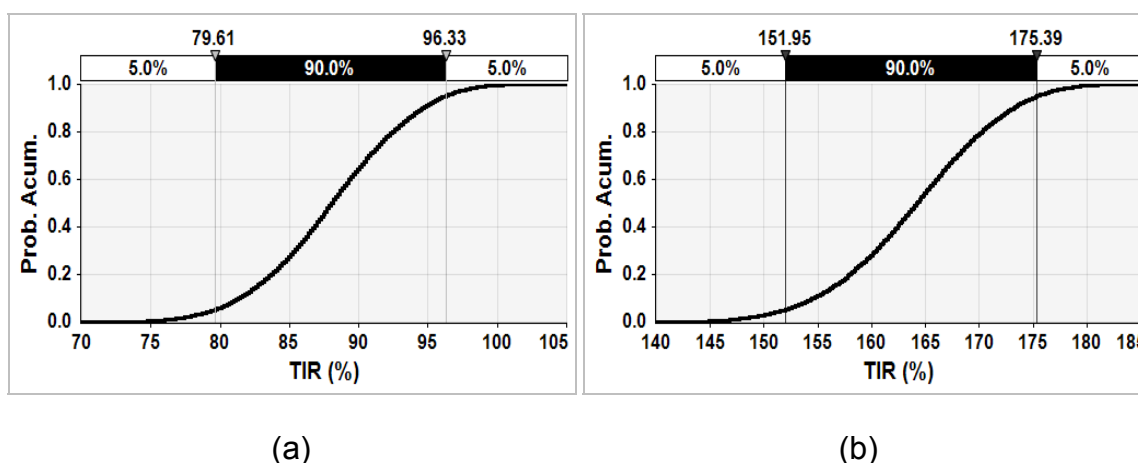


Figura 1.7 – Distribuição de probabilidade acumulada para TIR dos processos de CPS 34 (a) e CPS 80 (b).

Mediante análise de riscos associados aos preços do soro e CPS, pode-se verificar que as probabilidades associadas a valores de TIR abaixo da TMA são nulos para ambos os modelos. Para o CPS 34, há 5% de probabilidade de a TIR apresentar valores abaixo de 79,61%, com valor mínimo de 72,42%, 90% de probabilidade de apresentar valores entre 79,61% e 96,33% e também 5% de probabilidade de ser maior que 96,33%, com valor máximo de 102,27%. Para o processo de CPS 80 os valores de TIR são mais elevados, como já demonstrados nas análises previamente apresentadas, sendo que há 10% de probabilidade de apresentar valores abaixo de 151,95% ou superiores a 175,39% e 90% de probabilidade de estar entre estes valores, com mínimo de 141,48% e máximo de 183,52%. Sendo assim, o beneficiamento do soro para produção de CPS 80 apresenta muito menos riscos de o projeto não apresentar-se viável economicamente.

### **3.4 Avaliação do impacto poluidor**

Mediante elevadas DBO e DQO apresentadas pelo soro *in natura*, cabe aqui realizar uma análise de como os processos de produção de CPS 34 e CPS 80 podem ajudar a reduzir o impacto poluidor deste material e, conseqüentemente, reduzir as dimensões e custos com tratamento de resíduos para dispô-lo nos corpos d'água. A Tabela 1.7 mostra os resultados obtidos com ambos os processos estudados.

Devido à maior purificação das proteínas pela remoção dos outros componentes no processo de diafiltração, na produção de CPS 80 há menor redução dos parâmetros de impacto poluidor DBO e DQO, uma vez que os componentes removidos por este processo são levados juntamente à água residuária. Portanto, o efluente da produção de CPS 80 apresenta necessidade de estação de tratamento maior. Este resultado é corroborado pelo estudo de Yorgun *et al.* (2008), que obteve redução de 43% de DQO no processo de ultrafiltração, obtendo concentrado proteico com 35 % de proteínas.

Tabela 1.7 - Avaliação da redução de DBO e DQO para os processos de produção de CPS 34 e CPS 80.

Processo	Parâmetro (kg/dia)	Entrada	Saída		Redução (%)
		Soro	Saída de finos	Permeado-UF	
CPS 34	DQO	90.648.677	16.220.587	30.129.581	48,9
	DBO	35.856.397	3.814.569	15.741.526	48,2
CPS 80	DQO	90.648.677	16.220.587	52.551.046	24,1
	DBO	35.856.397	3.814.569	24.783.985	20,2

#### 4. Conclusão

Os modelos desenvolvidos permitiram verificar que ambas as plantas se mostram viáveis técnico-economicamente, A produção de CPS 80 apresentou maior viabilidade, visto maiores TIR e VPL, aliados a baixos TRC e PE. As variáveis às quais os projetos se mostram com maior sensibilidade em relação à TIR são o preço do CPS e do soro, sendo que por meio da análise de risco, pôde-se observar que estas variações não os inviabilizam, devido à variabilidade associada aos preços praticados no mercado destes produtos ser pequena, promovendo TIR mínima de 72,42% para o CPS 34 e de 141,48% para o CPS 80. Também foi possível avaliar a redução do impacto poluidor do soro *in natura*, permitindo concluir que a maior purificação das proteínas (CPS 80) possibilitou menor redução de DBO e DQO comparado ao processo de obtenção do CPS 34. Estes modelos desenvolvidos permitem sua utilização para simulações que vão além das estudadas neste trabalho e se constituem como ferramenta no auxílio à implantação de projetos associados ao uso do soro de leite.

#### 5. Referências Bibliográficas

ANTUNES, A.E.C.; MOTTA, E.M.P.; ANTUNES, A.J. (2003) Perfil de textura e capacidade de retenção de água de géis ácidos de concentrado proteico de soro de leite. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 23 183-189.

BELL, R. W.; PETER, P. N.; JOHNSON JR., W. M. T. (1928) A method of obtaining crude milk sugar and other solids from sweet whey. **Journal of Dairy Science**, 11 (2), 163-174.

BENDER, R. C.; SUPPLEE, G. C. (1932) The vitamin "B" and "G" content of dry skimmed milk and dry. **Journal of Dairy Science**, 15 (6), 445-450.

BURITI, F. C. A.; CASTRO, I. A.; SAAD, S. M. I. (2010) Effects of refrigeration, freezing and replacement of milk fat by inulin and whey protein concentrate on texture profile and sensory acceptance of synbiotic guava mousses. **Food Chemistry**, 123, 1190–1197.

EUSTON, S. R.; AL-BAKKUSH, A.; CAMPBELL, L. (2009) Comparing the heat stability of soya protein and milk whey protein emulsions. **Food Hydrocolloids**, 23, 2485–2492.

HARLAND, H. A.; ASHWORTH, U. S. (1945) The preparation and effect of heat treatment on the whey proteins of milk. **Journal of Dairy Science**, 28 (12), 879-886.

HOBMAN, P.G. Review of processes and products for utilization of lactose in deproteinated milk serum. (1984) **Journal of Dairy Science**. 67, 11, 2630-2651.

GOULD, B. W. Understanding dairy markets. **Agricultural and applied economics**, UW Madison. Disponível em: <<http://future.aae.wisc.edu>>. Acesso em dezembro de 2010.

JONES, F. S.; LITTLE, R. B. (1933) Proteins of the whey fraction in milk from normal and abnormal udders. **Journal of Dairy Science**, 16 (2), 101-109.

KELLY, P. M. Significance of lactose in milk powders. In: FOX, P. F. e MCSWEENEY, P. L. H. (eds.) **Advanced Dairy Chemistry Volume 3: Lactose, water, salts and minor constituents**. New York: Springer. 2009. p. 80-97.

KERR, W.L. Food Drying and Evaporation Processing Operations. In: MYER, K. (ed.) **Handbook of Farm, Dairy, and Food Machinery**. New York: William Andrew, Inc. 2007. p. 303–340

KOTOUPAS, A.; RIGAS, F.; CHALARIS, M. (2007) Computer-aided process design, economic evaluation and environmental impact assessment for treatment of cheese whey wastewater. **Desalination**, 213, 238–252.

LIZARRAGA, M.S.; DE PIANE VICIN, D.; GONZÁLEZ, R.; RUBIOLO, A.; SANTIAGO, L.G. (2006) Rheological behavior of whey protein concentrate and  $\kappa$ -carrageenan aqueous mixtures. **Food Hydrocolloids**, 20, 740-748.

MANOI, K.; RIZVI, S. S. H. (2009) Emulsification mechanisms and characterizations of cold, gel-like emulsions produced from texturized whey protein concentrate. **Food Hydrocolloids**, 23, 1837–1847.

MARAFON, A. P.; SUMI, A.; ALCÂNTARA, M. R.; TAMIME, A. Y.; OLIVEIRA, M. N. (2011) Optimization of the rheological properties of probiotic yoghurts supplemented with milk proteins. **LWT - Food Science and Technology**, 44, 511-519.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Resolução nº 4, de 28 de junho de 2000**. Institui o produto denominado ‘Manteiga Comum’, para comercialização exclusiva no território nacional, que deverá atender às seguintes especificações de qualidade. Diário Oficial da União, Brasília, 05 de julho de 2000, Seção I, p. 5.

MATTHEWS, M. E. (1984) Whey protein recovery processes and products. **Journal of Dairy Science** 67, 2680-2692.

MILK INGREDIENTS. **Whey Protein Concentrate** Disponível em: <[http://www.milkingredients.ca/dcp/article\\_e.asp?catid=145&page=209](http://www.milkingredients.ca/dcp/article_e.asp?catid=145&page=209)>. Acesso em março de 2010.

MUN, J. **Modeling risk: applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2006. 605p.

MUÑI, A.; PÁEZ, G.; FARIA, J.; FERRER, J.; RAMONES, E. (2005) Eficiência de um sistema de ultrafiltração/nanofiltração tangencial em serie para el fraccionamento y concentración del lactosuero. **Revista Científica**, 15, 361-367.

PETERS, R.H. (2005) Economic aspects of cheese making as influenced by whey processing options. **International Dairy Journal**, 15, 537–545.

RAMSDELL, G. A.; WEBB, B. H. (1938) Sweetened condensed whey: its manufactured and properties. **Journal of Dairy Science**, 21 (6), 305-314.

RYCHLIK, I.; RYDÉN, J. **Probability and risk analysis; an introduction for engineers**. 2 ed. Berlim: Springer. 2006. 281p.

SCHAAFSMA, G. (2008) Lactose and Lactose Derivatives as Bioactive Ingredients in Human Nutrition. **International Dairy Journal**.18, 458-465.

SHARP, P. F.; DOOB JR., H. (1941) Effect of humidity on moisture content and forms of lactose in dried whey. **Journal of Dairy Science**, 24 (8), 679-690.

SOUZA, R.R.; BERGAMASCO, R.; COSTA, S.C.; FENG, X.; FARIA, S.H.B.; GIMENES, M.L. (2010) Recovery and Purification of Lactose from Whey. **Chemical Engineering and Processing**, doi:10.1016/j.cep.2010.08.015

TUNICK, M. H. Whey protein production and utilization: a brief history. In: ONWULATA, C. I. e HUTH, P. J. (eds.) **Whey processing, functionality and health benefits**. Ames: Blackwell Publishing. 2008. p. 1-14.

VON STASZEWSKI, M.; JAGUS, R. J.; PILOSOFF, A. M. R. (2010) Influence of green tea polyphenols on the colloidal stability and gelation of WPC. **Food Hydrocolloids**, doi:10.1016/j.foodhyd.2010.10.004.

YORGUN, M.S.; AKMEHMET BALCIOGLU, I.; SAYGIN, O. (2008) Performance comparison of ultrafiltration, nanofiltration and reverse osmosis on whey treatment. **Desalination**. 229, 204–216.

# Capítulo 3

## Produção Integrada de Concentrado Proteico de Soro e Derivados da Lactose: Viabilidade Técnico-Econômica

### 1. Introdução

O soro de leite tem sido estudado desde a década de 80 como uma alternativa para a produção de etanol (DEMOTT et al., 1981; CHEN & ZALL, 1982). A recuperação da lactose do soro, seja para produção de etanol ou como ingrediente industrial, não se apresenta somente como uma alternativa econômica, mas também uma ação social, pois permite minimizar a poluição ambiental gerada com o descarte deste constituinte junto às águas residuárias, devido à sua alta Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) (SOUZA et al. 2010).

A lactose e as proteínas solúveis são os componentes majoritários do soro de leite. Tipicamente, o soro contém cerca de 4,6% de lactose, 0,8% de proteínas e 0,6% de gordura (WALSTRA, 2006). Muitas pesquisas têm sido direcionadas na recuperação das proteínas do soro para utilização na dieta humana, devido às suas propriedades bioativas. Por outro lado, a lactose pode apresentar utilização na indústria farmacêutica; como suplemento de formulações infantis; ou em produtos de panificação, para realçar a cor ou o sabor dos alimentos (SCHAAFSMA, 2008). Em adição, a lactose também pode servir como uma fonte renovável para produção de energia, por meio da hidrólise e fermentação dos seus monômeros (HOSSEINI *et al.*, 2003; LEWANDOWSKA & KUJAWSKI, *et al.*, 2007; SANSONETTI *et al.*, 2009; STANISZEWSKI *et al.*, 2009).

Algumas tecnologias são utilizadas no processamento de soro de leite para obtenção de concentrados proteicos, incluindo tecnologias de membrana. Porém, o processo de concentração e fracionamento das proteínas do soro se

torna mais viável quando também é considerada a recuperação da lactose para aplicações industriais (ATRA et al., 2005; MUÑI et al., 2005).

A produção do etanol por fermentação da lactose ocorre em duas etapas simultâneas: a hidrólise da molécula de lactose pela enzima  $\beta$ -galactosidase produzida pela levedura, a qual metaboliza os monômeros glicose e galactose. Sendo assim, as leveduras mais utilizadas para produção de etanol a partir da lactose são do gênero *Kluyveromices sp.*, devido a serem capazes de produzir a enzima e também a metabolizar ambos os monômeros (OZMIHCI & KARGI, 2007). Devido à capacidade de tolerar altas concentrações de etanol durante a fermentação, a levedura *Saccharomyces cerevisiae* têm sido estudada para este fim, porém esta levedura não produz a  $\beta$ -galactosidase e também não consome galactose, portanto há necessidade da produção de cepas recombinantes para suprir estas deficiências (GUIMARÃES et al., 2010).

Apesar de já existirem plantas comerciais para produção de etanol a partir do soro na Alemanha, Irlanda e Nova Zelândia, para que sejam implantadas indústrias com este tipo de processamento no Brasil são necessários estudos de viabilidade econômica que apoiem esta decisão, uma vez que os custos e retornos financeiros podem ser diferentes daqueles países. Este projeto propõe a modelagem e o estudo da viabilidade técnico-econômica, incluindo análise de riscos e estudo de impacto poluidor, de uma unidade de processamento de soro para produção integrada de concentrado proteico e etanol ou concentrado proteico e lactose em pó.

## **2. Materiais e Métodos**

### **2.1 Descrição dos modelos**

Foram elaborados quatro cenários distintos no software *SuperPro Designer*<sup>®</sup> 7.0, de modo a representar linhas genéricas para produção de concentrados proteicos de soro (CPS 34 e CPS 80), etanol e lactose em pó a

partir de soro de leite doce, ou seja: (1) CPS 34 e lactose em pó (Lac-34); (2) CPS 34 e etanol (Etanol-34); (3) CPS 80 e lactose em pó (Lac-80); (4) CPS 80 e etanol (Etanol-80). As plantas foram dimensionadas para processamento de 700.000 litros de soro por dia, em bateladas de 20 horas de produção.

Características físicas das correntes de entrada e saída dos equipamentos, volume de processamento e composição dos ingredientes de cada cenário específico foram inseridos no simulador de processos para que as necessidades de energia, características dos processos e parâmetros dos equipamentos que compõem a linha de produção fossem calculados e permitissem posteriores análises dos resultados.

Por meio da inserção de tais informações, o software *SuperPro Designer*<sup>®</sup> 7.0 possibilita a realização de balanços de massa e energia em cada processo, permitindo a validação do modelo, mediante confronto com informações presentes nas especificações dos equipamentos disponibilizadas pelos fornecedores e também com dados da literatura. A programação da produção referente à utilização de equipamentos e a demanda de utilidades (água resfriada, vapor e energia elétrica) também foram obtidas.

As variáveis de entrada dos modelos no simulador foram obtidas em consultas a empresas especializadas na área de laticínios e etanol (Tetra Pak, GEA Niro, EJ Máquinas, Equipapel e IBen), empresas concorrentes dos produtos (Sooro, Alibra Ingredientes, Davigo Foods, Gemacom Tech e Glanbia Nutritionals), profissionais da área e literatura nacional e internacional pertinente ao assunto (MUÑI *et al.*, 2005; SCHAAFSMA, 2008; KELLY, 2009; SOUZA *et al.*, 2010; GUIMARÃES *et al.*, 2010).

As Figura 2.1, Figura 2.2, Figura 2.3 e Figura 2.4 representam os fluxogramas simplificados dos cenários (1) CPS 34 e Lac-34; (2) CPS 34 e Etanol-34; (3) CPS 80 e Lac-80 (4) CPS 80 e Etanol-80; respectivamente.

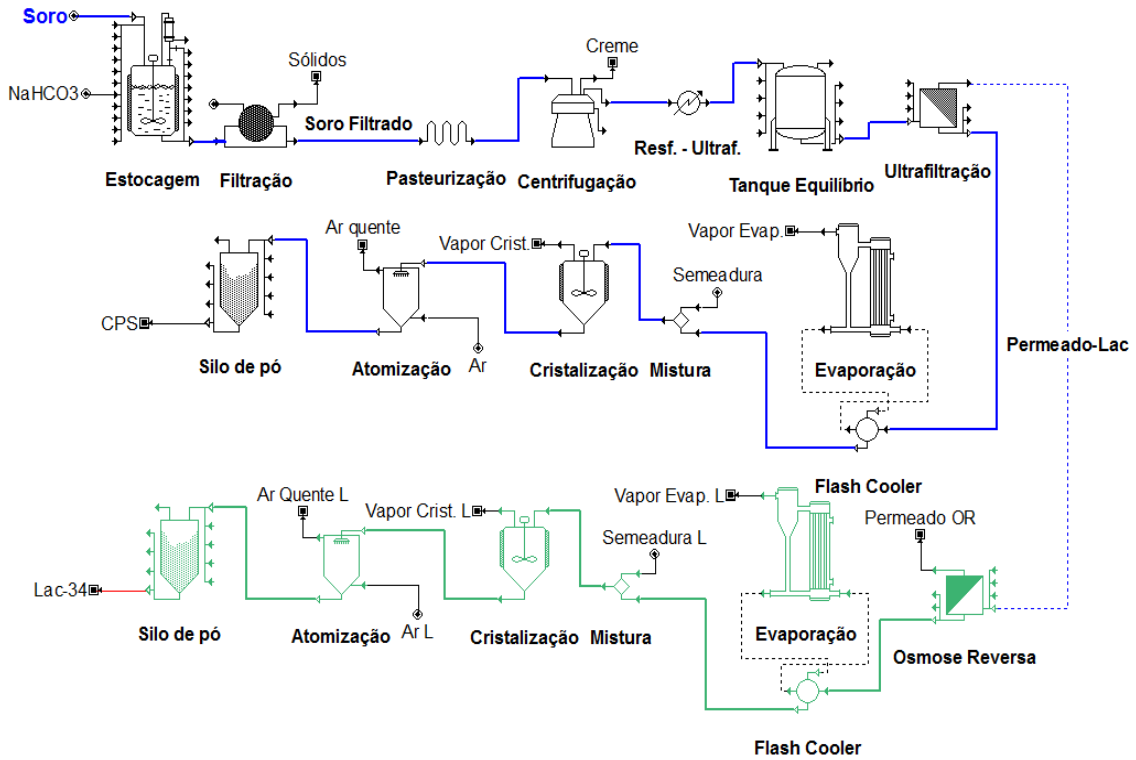


Figura 2.1 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34 e lac-34.

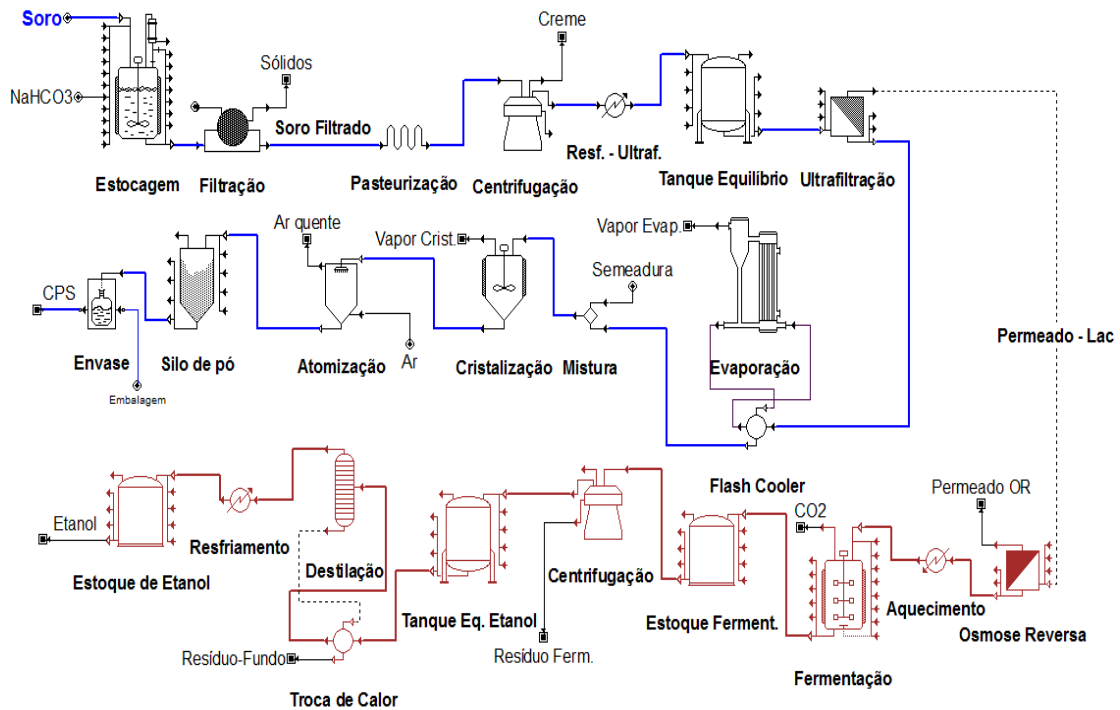


Figura 2.2 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 34 e etanol.

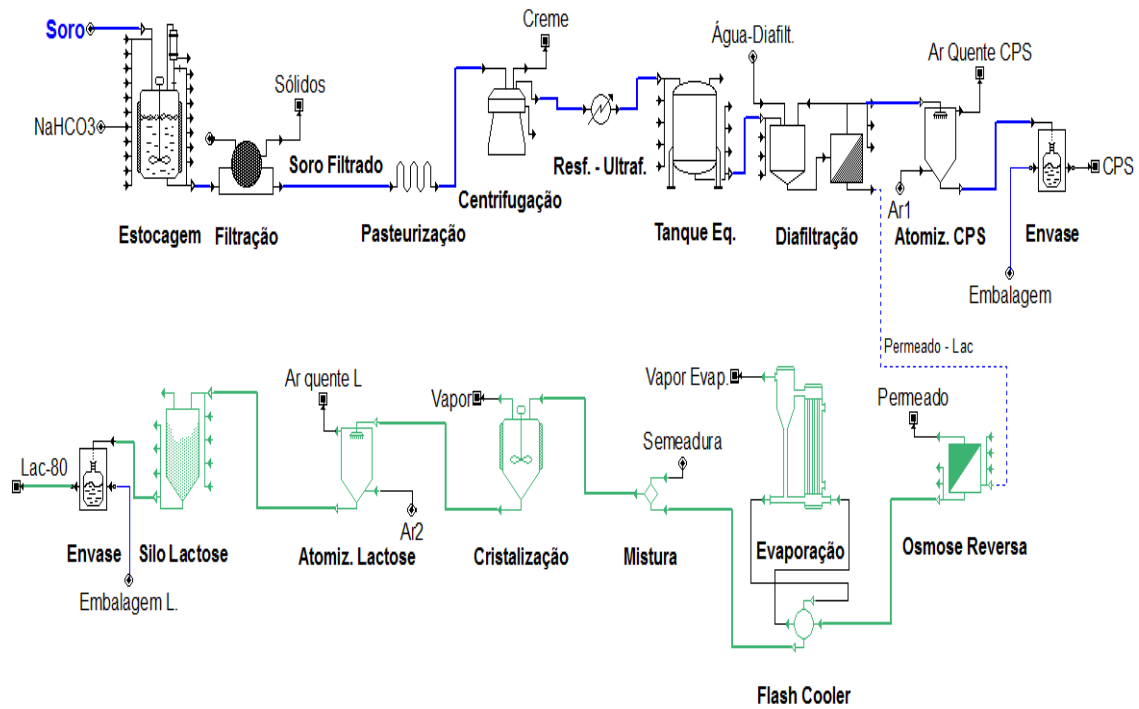


Figura 2.3 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80 e lac-80.

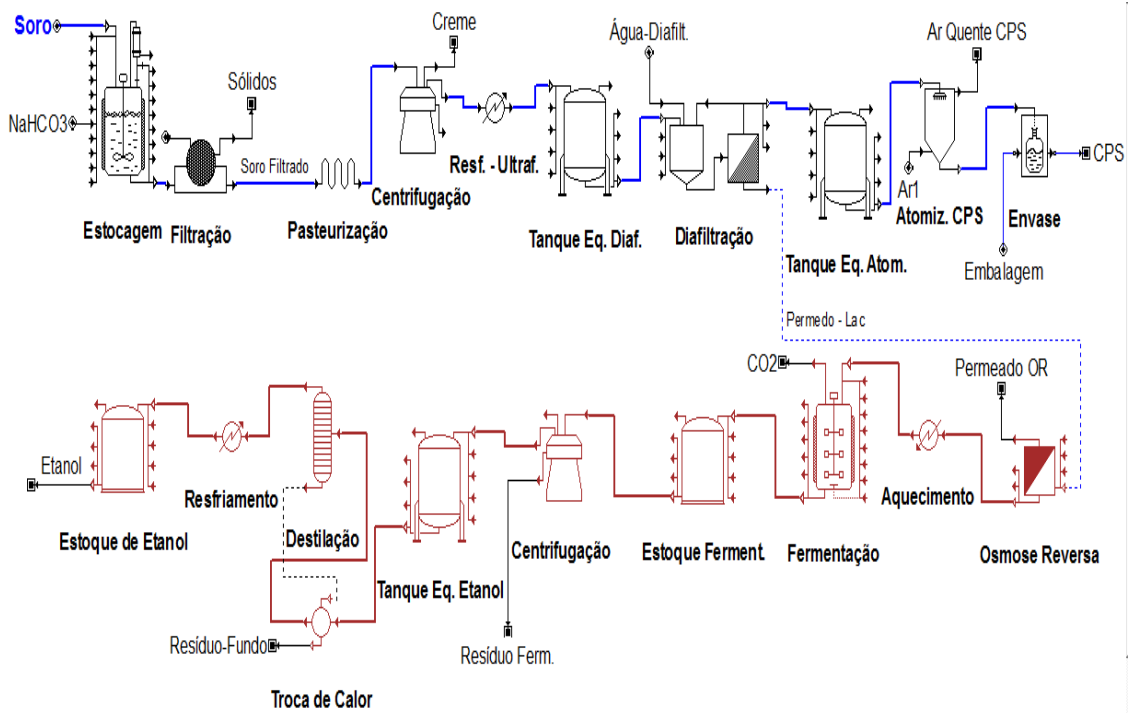


Figura 2.4 - Diagrama simplificado do fluxo de produção de CPS 80 e etanol.

Na Tabela 2.1 está demonstrada a composição do soro utilizada para as simulações.

Tabela 2.1 – Percentual dos componentes do soro para modelagem do processo.

<b>Componente</b>	<b>Percentual no soro (%)</b>
Água	92,44
Lactose	4,6
Proteínas	0,9
Cinzas	0,8
Gordura	0,6
Finos	0,5
Ácido Lático	0,16

*Fonte: Adaptado de WALSTRA, 2006.*

Como produtos finais dos processos modelados, obtiveram-se o CPS 34 ou o CPS 80, juntamente ao creme com alto teor de gordura (superior a 75%), o qual tem destino industrial, principalmente para a produção de manteiga, denominada “Manteiga Comum” pela Resolução nº 4 de 28 de junho de 2000 do Ministério da Agricultura (MAPA). A lactose deu origem a dois produtos, de acordo com o modelo: lactose em pó (Lac-34 e Lac-80), que tem aplicações industriais em padarias e doces ou ainda para produtos farmacêuticos e fórmulas infantis (SCHAAFSMA, 2008), e também o etanol hidratado combustível, com teor mínimo de 95% (Etanol-34 e Etanol-80).

As principais características dos equipamentos constituintes da linha de processamento estão descritas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Principais características dos processos para os cenários estudados.

Operações	Cenários			
	(1) CPS 34 e Lac-34	(2) CPS 34 e Etanol-34	(3) CPS 80 e Lac-80	(4) CPS 80 e Etanol-80
Estocagem do soro <i>in natura</i>	Recebimento de 700m <sup>3</sup> soro em 10 horas/dia			
Filtração	Remoção de finos, com torta contendo 20% de umidade			
Pasteurização	Tratamento térmico de 72 °C por 15 segundos			
Centrifugação	Remoção de 90% da gordura do soro, produzindo creme com teor de gordura superior a 75%			
Ultrafiltração	Retentado com 9,85% de sólidos (FC = 3,5)		-	-
Diafiltração	-	-	Retentado com 21% de sólidos (FC = 57,1)	
Osmose Reversa	Retentado com 18% de sólidos (FC = 3,5)		Retentado com 18% de sólidos (FC = 6,8)	
Evaporação	Concentração a 35% (CPS) e 50% (Lactose) de sólidos e temperatura final de 55 °C	Concentração a 35% de sólidos e temperatura final de 55 °C (CPS)	Concentração a 50% de sólidos (Lactose) e temperatura final de 55 °C	-

Tabela 2.2 - Continuação

Processos	Cenários			
	(1) CPS 34 e Lac-34	(2) CPS 34 e Etanol-34	(3) CPS 80 e Lac-80	(4) CPS 80 e Etanol-80
Cristalização	3 horas de residência e 80% de cristalização da lactose			-
Atomização	CPS e lactose em pó com 4% de umidade final			
Fermentação	-	40 h de fermentação e consumo de 90 % da lactose disponível a 37 °C	-	40 h de fermentação e consumo de 90 % da lactose disponível a 37 °C
Centrifugação do Fermentado	-	Remoção de não fermentados com 4,8% de etanol	-	Remoção de não fermentados com 5,0% de etanol
Destilação	-	Produção de destilado com etanol 95% e resíduo de fundo com 0,8% de etanol e 94,4 % de água	-	Produção de destilado com etanol 95% e resíduo de fundo com 0,8% de etanol e 93,7 % de água

### ***Recepção e pré-tratamento do soro***

O soro é recebido em caminhões isotérmicos à temperatura em torno de 4 °C e armazenado em silos que devem suprir a produção de 700.000 litros de soro por dia, sendo que este recebimento deve ser completado em 10 horas por dia. Nestes silos a acidez do soro deve ser reduzida a 12 °D, por meio da neutralização com bicarbonato de sódio. Posteriormente, os finos devem ser removidos do soro, por meio da filtração a vácuo. Em seguida, deve se proceder ao tratamento térmico de pasteurização (72 °C/ 15s) em trocador de calor a placas e ao desnate em centrífuga, para a retirada de 90% da gordura, produzindo creme com teor mínimo de 75% de gordura.

### ***Concentração e Purificação de proteínas***

A produção de CPS 34 e CPS 80 se diferenciam após o pré-tratamento do soro. No processamento do CPS 34, após a concentração e purificação das proteínas, estas são concentradas por evaporação a vácuo, cristalizadas e então levadas ao atomizador para secagem do produto e obtenção de um pó com teor de umidade máximo de 4%. Para o processamento de CPS 80, é aplicado o sistema de diafiltração, permitindo maior purificação das proteínas. A diafiltração permite a obtenção de retentado com maior teor de sólidos e teor de lactose reduzido, não sendo necessária a utilização de concentração e cristalização. Assim, após a diafiltração, o retentado é levado diretamente ao atomizador, produzindo um pó com umidade de 4%.

### ***Fermentação da lactose para produção de etanol***

O permeado da ultrafiltração ou diafiltração para o processamento dos concentrados proteicos é constituído basicamente de lactose e sais (cerca de 80% dos sólidos). Assim, após o processo de separação por membranas, o permeado segue para a operação de concentração por osmose reversa (OR), sendo pré-concentrado a 18% de sólidos totais, dos quais 80% é lactose.

Posteriormente, o retentado da OR é levado às dornas de fermentação, onde ocorre a hidrólise e fermentação da lactose, produzindo CO<sub>2</sub>, etanol e biomassa (constituída de açúcares não fermentados e células de levedura); neste processo 90% da lactose é consumida em 40h de fermentação, com rendimento de 80% para produção de etanol frente ao rendimento teórico de conversão da lactose (0,538 kg etanol/ kg lactose) (GUIMARÃES *et al.*, 2008). Em seguida, o produto da fermentação é centrifugado para remoção da biomassa e, então, levado à coluna de destilação, onde é elevado o grau alcoólico a 95%.

### ***Cristalização e secagem da lactose***

Neste processo, o retentado da osmose reversa (aproximadamente 18% de sólidos) é concentrado a vácuo a fim de obter 50% de sólidos totais e temperatura final de 55°C. O concentrado é submetido à cristalização com tempo de residência de 3 horas e redução de temperatura de 30°C para 15°C, permitindo cristalização de 80% da lactose contida no retentado da OR, e seco por atomização, obtendo pó com 4% de umidade.

## **2.2 Análise financeira e de risco**

Foram consideradas as condições de financiamento praticadas pelo BNDES (Banco Nacional do Desenvolvimento Econômico e Social): financiamento de 80% para investimentos e 40% para capital de giro sob taxa de juros de 6,5% a.a. com período de amortização de 5 anos.

A Taxa Mínima de Atratividade - TMA - considerada foi de 13,20% (acréscimo de 20% sobre a taxa SELIC).

Foram utilizados dados de custos de equipamentos, utilidades, mão de obra, materiais de limpeza CIP, matéria prima e insumos, os quais foram

fornecidos por profissionais da área e por meio de pesquisa literária. Custos referentes a instalações, engenharia e contingência foram considerados como percentuais do custo com equipamentos.

Na avaliação financeira dos diferentes cenários de produção de concentrados proteicos, etanol e lactose foram analisados os seguintes índices econômicos:

- ✓ Tempo de Retorno de Capital (TRC);
- ✓ Valor Presente Líquido (VPL);
- ✓ Ponto de Equilíbrio (PE);
- ✓ Taxa Interna de Retorno (TIR).

Como a TIR possibilita a comparação de projetos com dimensões de investimentos distintos, este parâmetro foi analisado mais profundamente por meio de análises de sensibilidade a variações percentuais dos preços de venda dos produtos finais e preço de compra do soro.

Devido a não haver algum órgão que realize o acompanhamento dos preços do soro no Brasil, considerou-se uma aproximação da variabilidade desta variável como sendo uma distribuição de probabilidades triangular, a qual tem apenas três parâmetros a serem considerados: mínimo, moda (número mais provável) e máximo. A escolha desta distribuição foi dada justamente pela falta de informações, uma vez que não há necessidade de grande número de dados, apenas algum profissional que forneça os parâmetros necessários. Esta distribuição pode não representar totalmente a variação do preço do soro, porém possibilita a obtenção de estimativas com alto grau de confiabilidade (MUN, 2006).

Para a variabilidade dos preços do CPS 34, CPS 80 e lactose foram considerados dados de variação semanal do ano de 2010 compilados por Gould (2010). A distribuição de probabilidades que representa estes dados é a distribuição de Weibull (CPS 34 e CPS 80), que necessita de dois parâmetros: a e b, os quais são combinações não lineares da média e desvio padrão. Esta

distribuição é muito flexível, podendo assumir diferentes formas, de acordo com os valores dos parâmetros (RYCHLIK & RYDÉN, 2006). Quanto à variabilidade do preço da lactose, esta pode ser representada pela distribuição triangular. O preço do etanol varia conforme distribuição de Weibull, conforme ajuste referente aos dados semanais do ano de 2010, compilados pelo CEPEA.

Na análise de risco, foram utilizadas as variáveis às quais a TIR se apresentou mais sensível. Foram ajustadas distribuições de probabilidade associadas a dados históricos de valores destas variáveis, realizando o teste de qui-quadrado para indicar a qualidade deste ajustamento. Foi utilizado o software @Risk 5.0 e plano de amostragem de Monte Carlo com 33.000 iterações, de modo a garantir um Intervalo de Confiança de 99% e tolerância de 1% em relação à média e ao desvio padrão da TIR.

### **3. Resultados e Discussão**

#### **3.1 Balanços de massa**

O processamento de 700 m<sup>3</sup>/dia de soro *in natura* possibilitou a produção de creme, CPS 34, CPS 80, lactose em pó e etanol, de acordo com os modelos estudados, em quantidades demonstradas na Tabela 2.3.

Os modelos avaliados permitiram a obtenção de produtos com características semelhantes aos encontrados no mercado nacional (Tabela 2.4), o que permite a comparação de preços e possibilidade de comercialização.

É possível observar que o processo de obtenção do CPS 34 possibilita produzir lactose em pó (Lac-34) com maior teor do constituinte de interesse, porém com maior teor de sais (cálcio, magnésio e sódio, principalmente). Já no processamento de CPS 80, devido à necessidade do processo de diafiltração, há maior concentração de proteínas na lactose em pó (Lac-80). Segundo Jelen

(2009) o fato de os produtos apresentarem composição ligeiramente diferente não inviabiliza a comercialização, uma vez que a aplicação destes produtos não se faz de forma diferenciada.

Tabela 2.3 – Quantidades dos produtos obtidos mediante os processamentos analisados.

Produto	Quantidade (kg/dia)			
	CPS 34 e Lac-34	CPS 34 e Etanol-34	CPS 80 e Lac-80	CPS 80 e Etanol-80
Creme	4.723	4.723	4.723	4.723
CPS 34	18.712	18.712	-	-
CPS 80	-	-	5.050	5.050
Lactose em pó	30.396	-	43.208	-
Etanol	-	9.940	-	13.715

Tabela 2.4 - Composição dos produtos lac-34, lac-80, etanol-34 e etanol-80.

Componente	Composição dos produtos (%)			
	Lac-34	Etanol-34	Lac-80	Etanol-80
Etanol	-	95,15	-	95,20
Água	4,00	4,85	4,00	4,80
Lactose	82,20	-	80,00	-
Gordura	0,00	-	0,00	-
Proteína	0,55	-	5,20	-
Cinzas	13,25	-	10,80	-

### 3.2 Descrição dos custos

Os custos unitários de produção (Tabela 2.5) apresentam valores inferiores ao preço de comercialização no mercado nacional, o que permite a obtenção de lucro, com exceção do etanol para ambos os processos, que apresenta custo de produção muito superior ao preço de venda, inviabilizando sua produção. Esta inviabilização se deve ao fato de o custo com utilidades para produzir etanol a partir da lactose ser muito elevado (R\$2,799/L para Etanol-34 e R\$2,955/L para Etanol-80), sendo necessário o estudo de formas de redução da necessidade de quantidades tão elevadas de vapor, principalmente, devido ao maior percentual de custos referentes a este agente de aquecimento quanto às utilidades. Guimarães *et al.* (2010) relata que a fermentação direta do soro não é economicamente viável, devido ao baixo teor de lactose (4-5%), o que torna o processo de destilação muito caro, uma vez que a demanda por vapor se faria muito grande, sugerindo então o aumento no teor de sólidos para posterior fermentação.

Tabela 2.5 – Custo unitário dos produtos finais em cada modelo.

Parcela de custo	Custo (R\$/kg)				Custo (R\$/L)	
	CPS 34	CPS 80	Lac-34	Lac-80	Etanol-34	Etanol-80
Insumos	1,995	7,449	0,023	0,014	0,036	0,025
Instalações	0,683	1,165	0,193	0,224	0,103	0,136
Mão de Obra	0,110	0,306	0,055	0,043	0,107	0,062
Consumíveis	0,022	0,152	0,001	0,011	0,013	0,028
Cont. de Qual.	0,011	0,031	0,008	0,004	0,016	0,006
Utilidades	1,467	3,345	0,560	0,667	2,503	2,676
Trat. Resíduos	0,010	0,020	0,020	0,020	0,020	0,022
<i>R\$/kg Produto</i>	<i>4,298</i>	<i>12,468</i>	<i>0,860</i>	<i>0,983</i>	<i>2,799</i>	<i>2,955</i>

O gráfico representado pela Figura 2.5 mostra as parcelas de custos de produção de cada processo, demonstrando que todos apresentam maior comprometimento de gastos com utilidades, seguidos de insumos e custos com instalação. É visível o maior comprometimento dos custos de produção com utilidades para os processos em que há produção de etanol, sendo ainda maior aquele integrado à produção de CPS 80. O permeado da diafiltração apresenta maior necessidade de energia para concentração, devido ao menor teor de sólidos comparado ao permeado do processo de ultrafiltração (CPS 34).

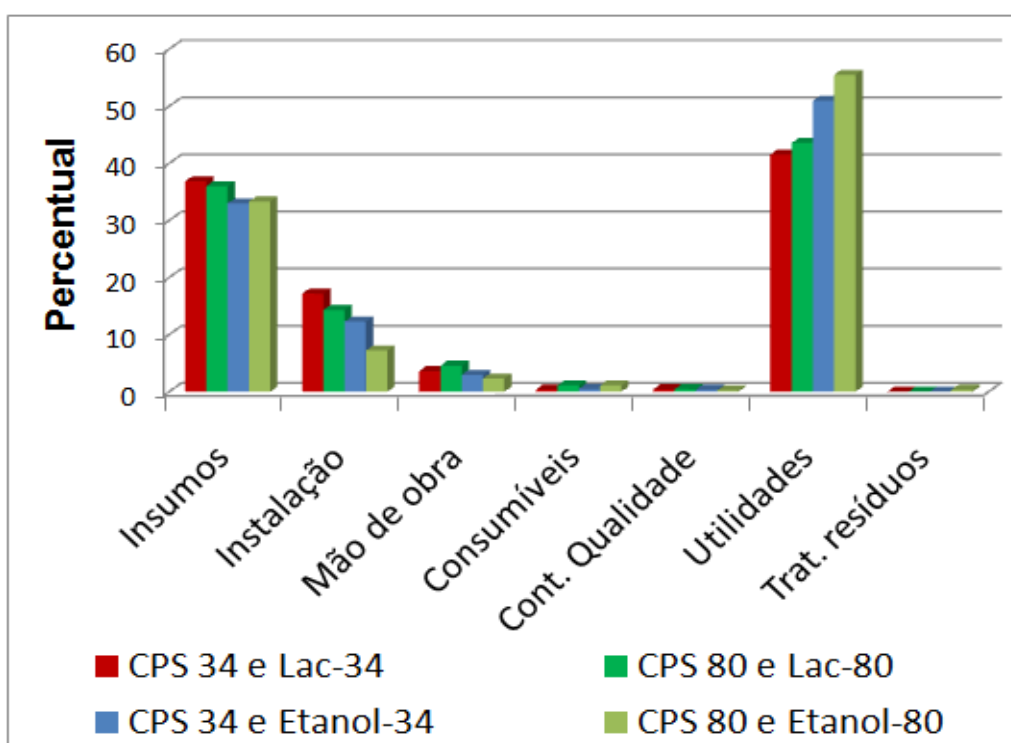


Figura 2.5 – Parcelas dos custos de produção para os modelos avaliados.

Mediante esta análise, os gráficos da Figura 2.6 e da Figura 2.7 possibilitam a visualização de quais são os componentes de custo de insumos e utilidades em cada processo avaliado. A matéria prima (soro) representa o comprometimento de 92 % a 94 % do custo com insumos e a utilidade de maior proporção de custo é o vapor, que determina de 78 % a 89 % do custo total de utilidades com esta finalidade.

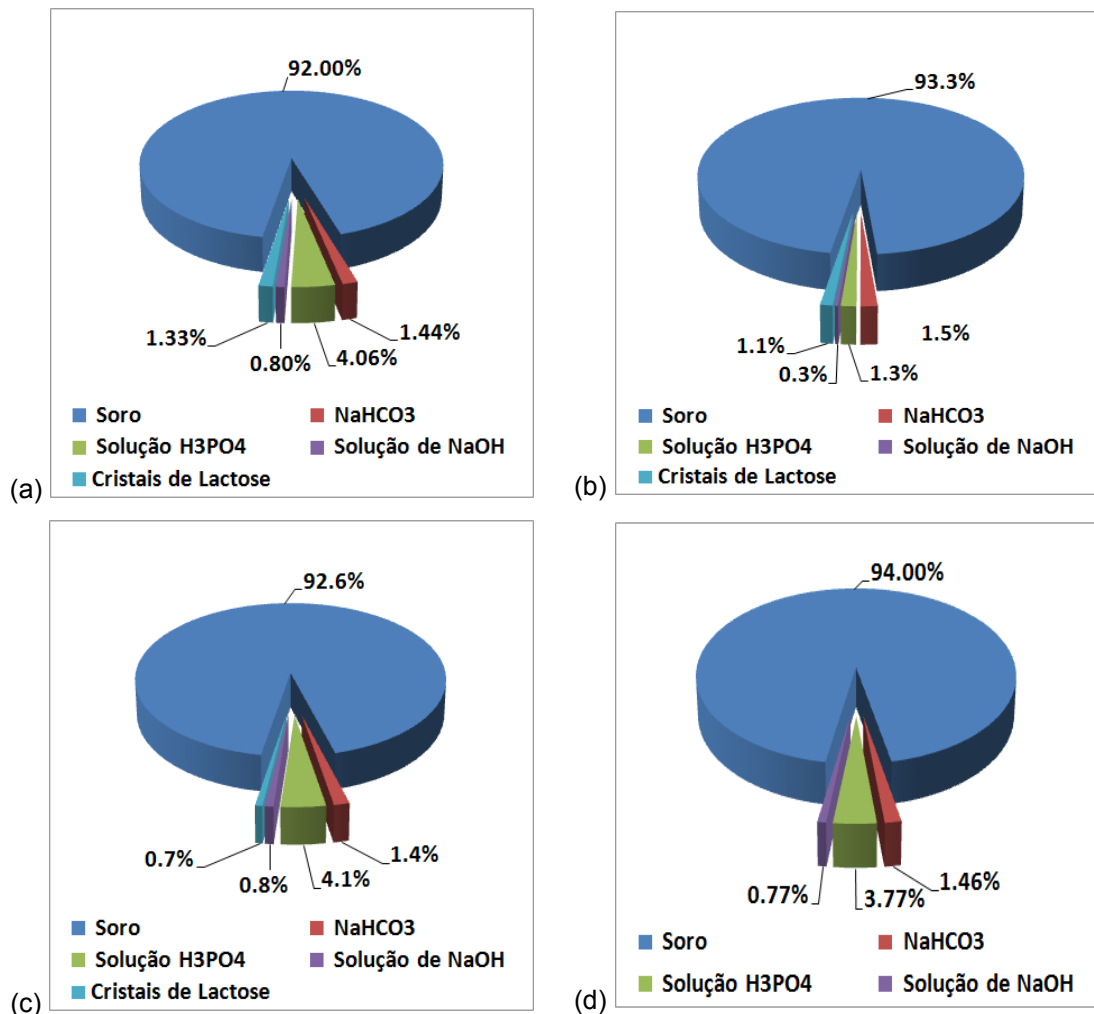


Figura 2.6 – Parcela dos custos de insumos para CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).

### 3.3 Análise financeira e de risco

A viabilidade de um empreendimento deve ser avaliada primeiramente em relação à proporção entre receitas e custos, de modo que se as receitas forem menores do que os custos associados a ela, a viabilidade de implantação está totalmente comprometida. Assim, a análise demonstrada no gráfico da Figura 2.8 ilustra o ponto de equilíbrio (PE) entre estas duas variáveis, mediante receitas obtidas do creme (R\$6,00/kg), CPS 34 (R\$7,40/kg), CPS 80 (R\$23,70/kg), Lac-34 e Lac-80 (R\$4,80/kg) e Etanol-34 e Etanol-80 (R\$1,05/L), de acordo com o modelo analisado.

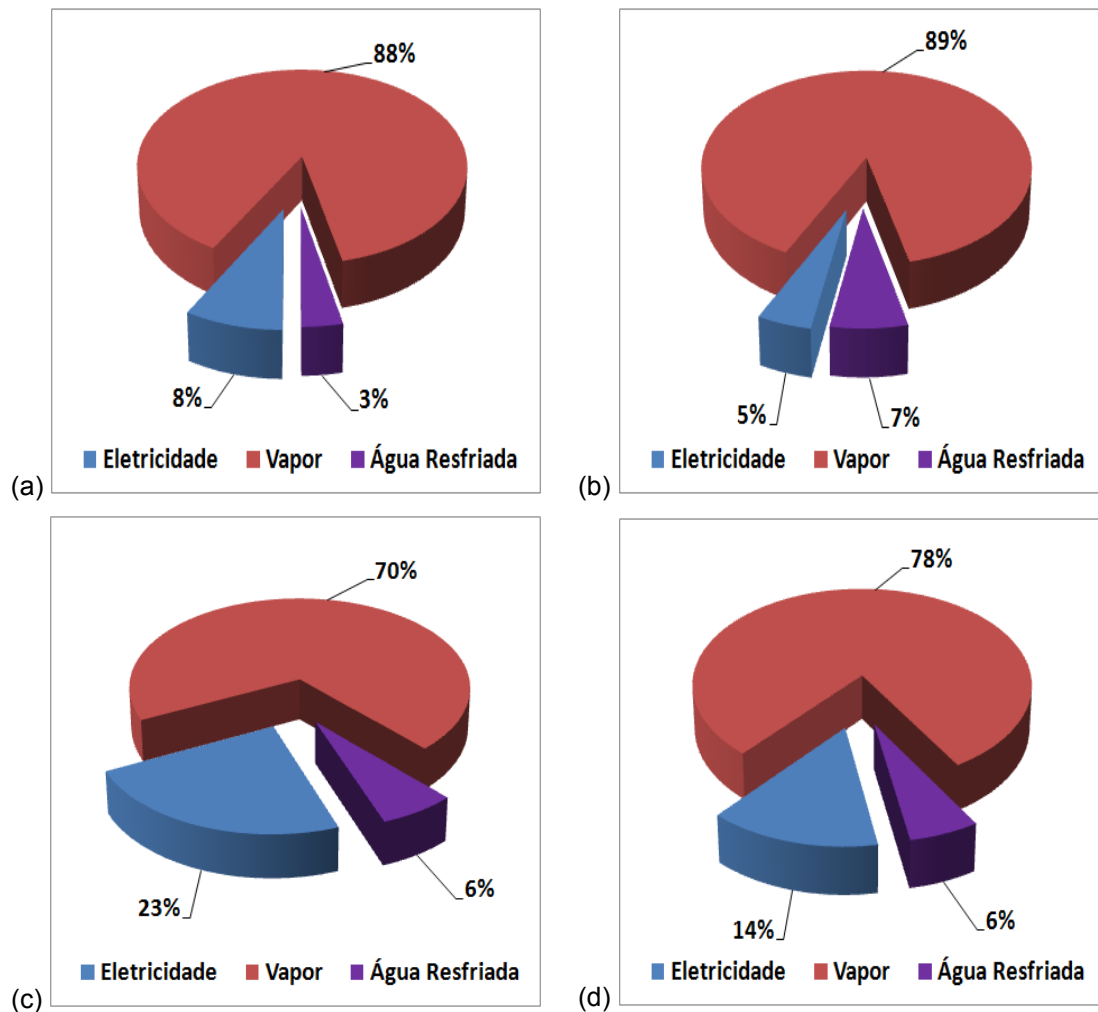


Figura 2.7 – Parcela dos custos de utilidades para CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-80 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).

O PE dos modelos com produção de lactose em pó são menores (8 % e 9% integrados à produção de CPS 34 e CPS 80, respectivamente), comparados aos modelos com produção de etanol (17 % e 22 % integrados à produção de CPS 34 e CPS 80, respectivamente). Possivelmente, isto é devido ao preço de venda do etanol não ser suficiente para cobrir seus custos de produção. O estudo realizado por Kotoupas *et al.* (2007) corrobora com os resultados apresentados, uma vez que mostra a maior viabilidade da produção de lactose cristalizada integrada ao processo de obtenção de CPS, possibilitando menor ponto de equilíbrio e TRC aliado ao maior VPL, quando comparada à produção de etanol integrado ao mesmo processo.

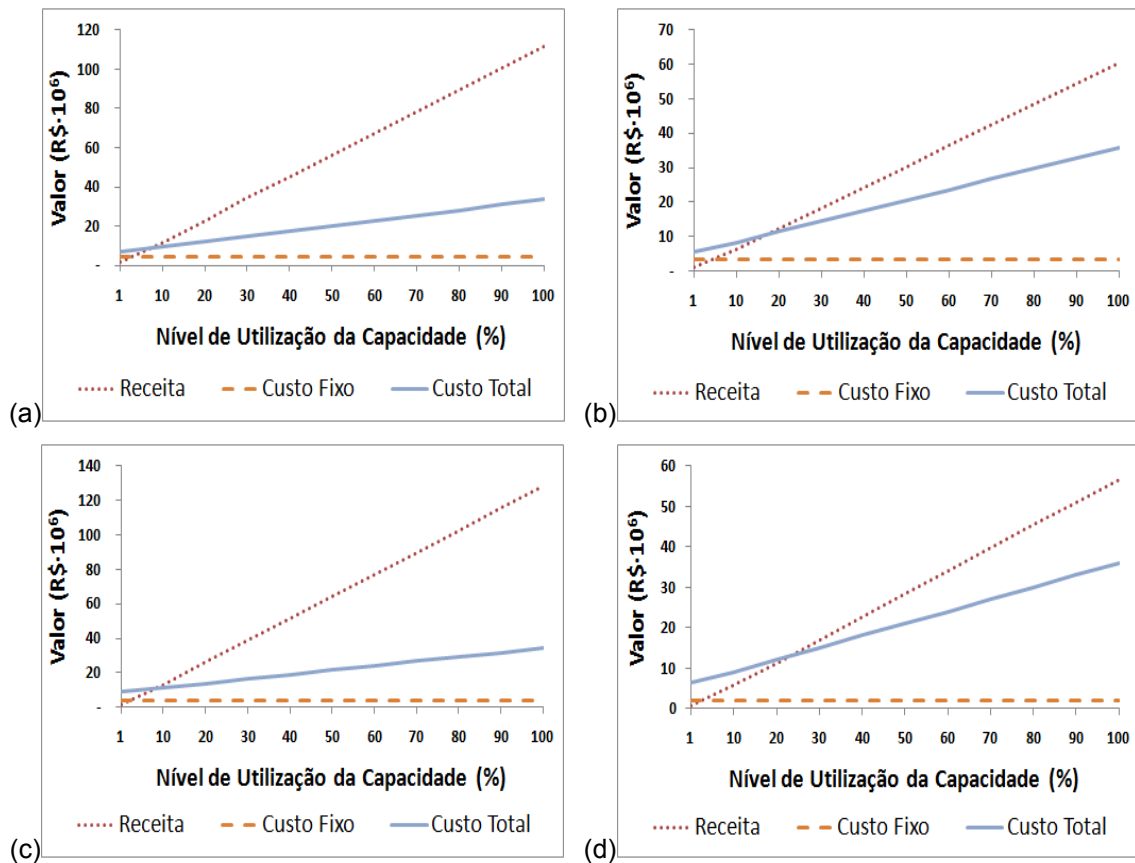


Figura 2.8 – Análise de ponto de equilíbrio dos modelos CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).

O impacto econômico promovido pela implantação das linhas de processamento estudadas foi avaliado pelos índices apresentados na Tabela 2.6, o que permite verificar que todos os processos são viáveis economicamente, devido ao baixo Tempo de Retorno de Capital (TRC) e Ponto de Equilíbrio (PE), aliados ao elevado Valor Presente Líquido (VPL) e Taxa Interna de Retorno (TIR).

As plantas de produção cuja utilização do permeado é para produção de lactose em pó são visivelmente mais atrativas, quando comparadas à produção de etanol, e ainda há maior viabilidade de produção de CPS 80 frente ao CPS 34. Isto é devido aos índices econômicos apontarem nesta direção, uma vez que permite retorno de capital mais rápido, com maior VPL e TIR, além de apresentar PE semelhante e investimento inicial 16,3 % menor.

Tabela 2.6 – Resumo dos parâmetros econômicos das plantas para os modelos analisados.

Parâmetro	CPS 34 e	CPS 34 e	CPS 80 e	CPS 80 e
	Lac-34	Etanol-34	Lac-80	Etanol-80
Invest. Total	R\$61.628.551,00	R\$46.328.000,00	R\$51.568.126,00	R\$26.170.000,00
PE	7,2%	16,7%	8,3%	22,7%
TRC	0,92 ano	2,18 anos	0,64 ano	1,48 ano
VPL	R\$254.898.627,00	R\$60.825.000,00	R\$346.032.924,00	R\$65.352.000,00
TIR	140,08%	59,14%	181,48%	89,77%

Devido à falta de certeza em relação ao comportamento do mercado consumidor e fornecedor da indústria, principalmente relacionado aos preços de venda dos produtos e de compra do principal insumo (soro), é de grande relevância a análise de sensibilidade da TIR em relação a estas variáveis, para maior segurança do investimento.

A Figura 2.9 ilustra como acontece a variação da TIR em relação às variáveis citadas, permitindo verificar que para os modelos de CPS e lactose em pó, a TIR permanece com valores muito superiores à TMA, mesmo com variações de 50 % nos valores do preço do creme, do CPS, da lactose em pó e do soro, indicando grandes possibilidades de estes projetos apresentarem viabilidade. Já para os modelos com produção de etanol, a viabilidade fica comprometida para variações negativas maiores de 30% no preço do CPS em ambos os modelos, devido à alta sensibilidade da TIR em relação a este fator. Também é possível dizer que o preço do creme promove variações muito pequenas ao índice econômico avaliado.

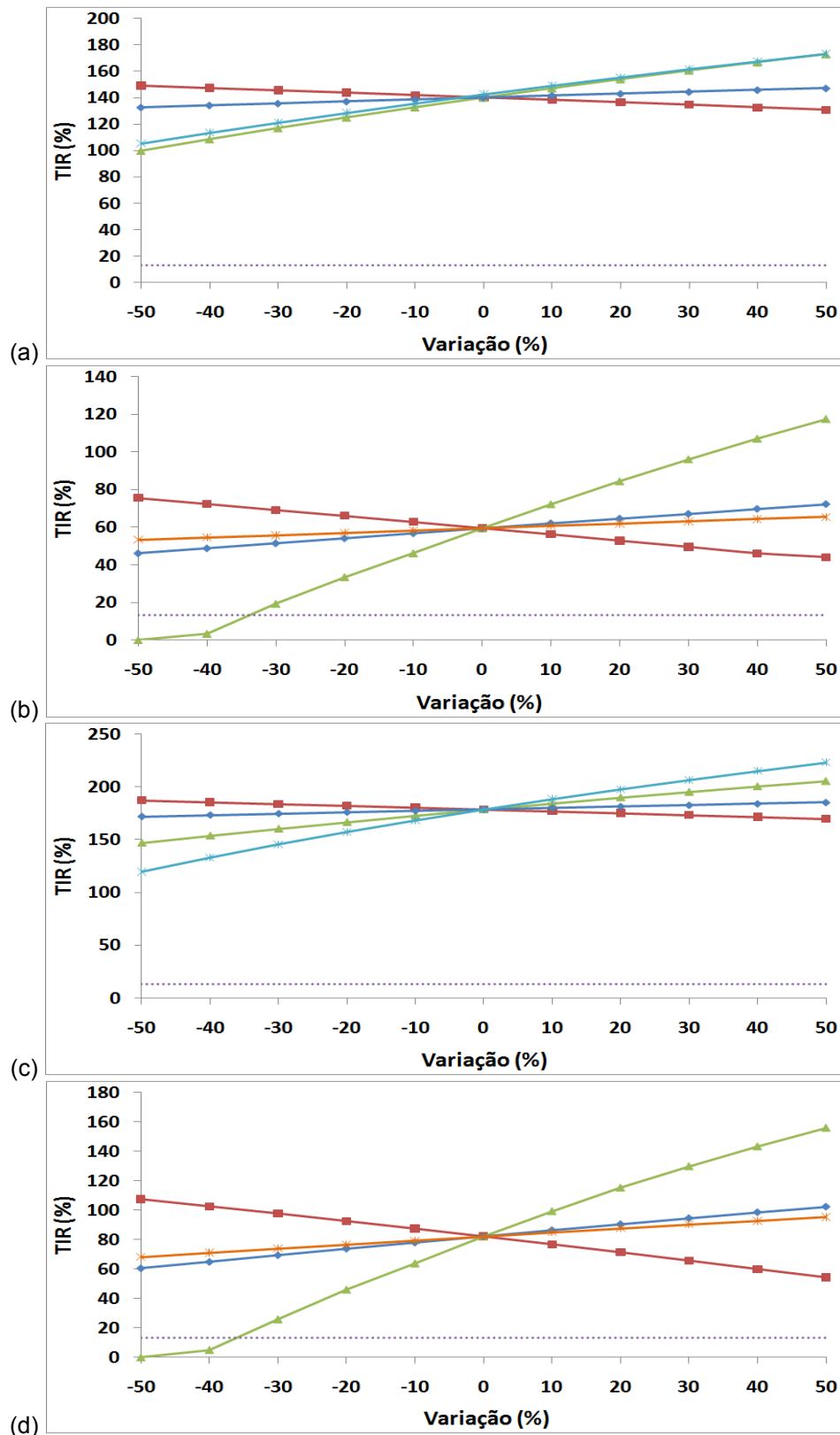


Figura 2.9 – Análise de sensibilidade dos modelos CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d). Em relação ao preço do soro (■), do CPS (▲), do creme (◆), do etanol (✱) e da lactose em pó (✱), comparados à TMA (.....).

A fim de analisar a flutuação da TIR de forma dinâmica, ou seja, com a ocorrência de variações simultâneas de mais de uma variável, foi realizada análise de risco utilizando as variáveis descritas na Tabela 2.7, com suas respectivas distribuições de probabilidade. Estas equações foram ajustadas mediante dados históricos e, no caso do soro, por meio de informações cedidas pelo gerente comercial de uma indústria de beneficiamento de soro. Com isto, foi possível a obtenção das funções de distribuições de probabilidade para todos os modelos, conforme ilustradas na Figura 2.10.

Tabela 2.7 – Distribuições de probabilidade utilizadas para análise de risco, com valores em R\$.

<b>Variável - Preço</b>	<b>Equação</b>	<b>P-valor</b>
Soro	Triangular (0,045;0,055,0.07)	-
CPS 34	Weibull (2,2612;0,55895)	0,49
CPS 80	Weibull (2,2612;1,7688)	0,49
Lac-34/Lac-80	Triangular (1,0356;4,7454;4,7454)	0,19
Etanol-34/Etanol-80	Weibull (1,8733; 0,32715)	0,47

A análise de riscos permitiu observar que as variações históricas indicam a viabilidade do projeto mediante qualquer combinação de valores dos fatores avaliados, uma vez que o valor mínimo de todos os modelos para a TIR foi superior a 49,14%. As plantas de lactose em pó apresentam menores riscos de investimento, uma vez que há 90% de probabilidade de a TIR estar entre 93,2% e 152,3% para o modelo 1 (CPS 34 e Lac-34) e entre 115,7% e 196,5% para o modelo 3 (CPS 80 e Lac-80). Já os modelos para produção de etanol apresentaram TIR entre 56,48% e 72,89% para o modelo 2 (CPS 34 e Etanol-34) e entre 67,58% e 92,11% para o modelo 4 (CPS 80 e Etanol-80) com 90% de probabilidade.

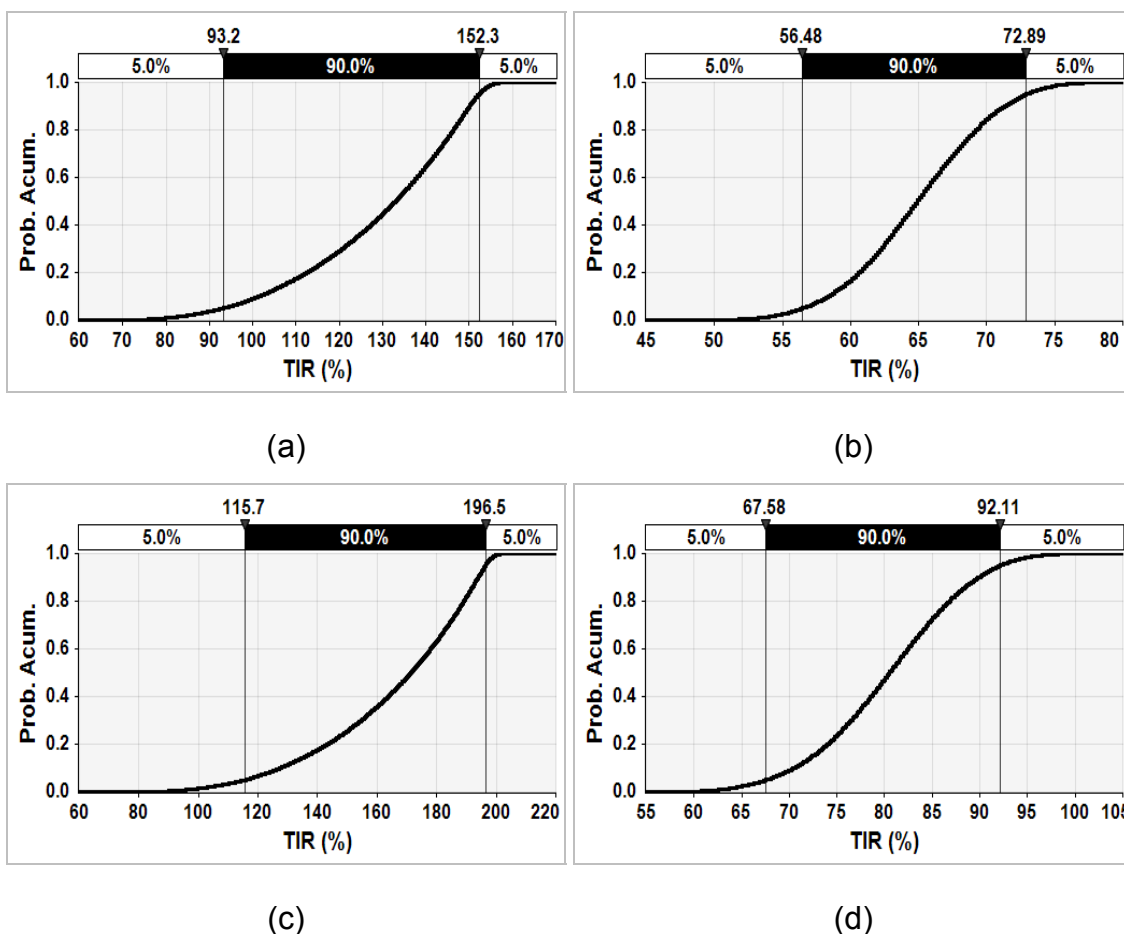


Figura 2.10 – Distribuição de probabilidade acumulada para TIR dos processos de CPS 34 e Lac-34 (a); CPS 34 e Etanol-34 (b); CPS 80 e Lac-34 (c); e CPS 80 e Etanol-80 (d).

### 3.4 Avaliação do impacto poluidor

A fim de avaliar a redução do impacto poluidor do soro *in natura*, a Tabela 2.8 traz os resultados para todos os modelos estudados.

Os processo que envolvem a produção de lactose em pó apresentam maiores reduções de DBO e DQO, uma vez que somente são retirados do soro os resíduos de caseína coagulada (finos), sendo todo o restante processado e mantido nos produtos finais (CPS e lactose em pó). O processo de produção de CPS 80 e etanol apresenta menor redução da carga poluidora, uma vez que a maior purificação das proteínas propicia maior quantidade de nutrientes no

permeado da diafiltração. Desta forma, mesmo o permeado sendo utilizado para fermentação e produção de etanol, os resíduos posteriores apresentam maiores teores de proteína, lactose e biomassa, o que pode ser observado na saída de resíduos da fermentação e no líquido de fundo da destilação.

Tabela 2.8 - Avaliação da redução de DBO e DQO para os processos de produção analisados.

Fase	Corrente	Parâmetro (kg/dia)	Processo			
			(1)	(2)	(3)	(4)
Entrada	Soro	DQO	90.648.677	90.648.677	90.648.677	90.648.677
		DBO	35.856.397	35.856.397	35.856.397	35.856.397
Saída	Resíduo da Fermentação	DQO	-	2.940.833	-	4.658.904
		DBO	-	2.168.454	-	3.289.312
	Destilação- Fundo	DQO	-	5.613.782	-	17.152.463
		DBO	-	3.554.216	-	7.277.362
	Filtro	DQO	16.220.587	16.220.587	16.220.587	16.220.587
		DBO	3.814.569	3.814.569	3.814.569	3.814.569
Redução (%)		DQO	82,1	72,7	82,1	58,0
		DBO	89,4	73,4	89,4	59,9

#### 4. Conclusão

Os modelos desenvolvidos permitiram verificar que as quatro plantas se mostram viáveis técnico-economicamente. Porém, embora os índices econômicos mostrarem a viabilidade da produção de etanol a partir da lactose do soro, os custos de produção deste produto se apresentaram superiores ao preço de venda do produto final. Portanto, os modelos de produção integrada de CPS 80 ou CPS 34 e etanol se mostraram inviáveis, por meio da comparação dos custos de produção com o preço de venda do mercado atual.

As plantas de produção de lactose em pó são mais atrativas economicamente, quando comparadas à produção de etanol, e ainda há maior viabilidade de produção de CPS 80 frente ao CPS 34. Isto é devido aos índices

econômicos apontarem nesta direção, uma vez que o processo integrado de CPS 80 e lactose em pó permite retorno de capital mais rápido, com maior VPL e TIR, além de apresentar baixo PE e investimento inicial 16,3 % menor.

A TIR é mais sensível ao preço do CPS, da lactose em pó, do etanol e do soro, porém, por meio da análise de risco, pôde-se observar que estas variações não os inviabilizam, uma vez que a variabilidade dos preços praticados no mercado destes produtos é pequena. A análise apresentou TIR mínima de 55,02% para o modelo 1 (CPS 34 e Lac-34), de 49,14% para o modelo 2 (CPS 34 e Etanol-34), 75,55% para o modelo 3 (CPS 80 e Lac-80) e de 56,48% para o modelo 4 (CPS 80 e Etanol-80), além de ser possível observar que a TIR máxima pode chegar a 203,05% para produção de CPS 80 e Lac-80.

Também foi possível avaliar a redução do impacto poluidor do soro, permitindo concluir que os processos que envolvem a produção de lactose em pó permitem maior redução da carga poluidora do soro. Para os processos integrados à produção de etanol, a maior purificação das proteínas (CPS 80) possibilitou menor redução de DBO e DQO comparado ao processo de obtenção do CPS 34, devido ao elevado teor de nutrientes advindos do permeado da diafiltração.

Estes modelos desenvolvidos permitem sua utilização para simulações que vão além das estudadas neste trabalho e se constituem como ferramenta no auxílio à implantação de projetos associados ao beneficiamento do soro de leite.

## **5. Referências Bibliográficas**

ATRA, R.; VATAI, G.; BECKASSY-MOLNAR, E.; BALINT, A. (2005) Investigation of ultra- and nanofiltration for utilization of whey protein and lactose. **Journal of Food Engineering**, 67, 325-332.

CEPEA – Centro de Estudos Avançados em Economia Aplicada. Indicador semanal CEPEA/ESALQ. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool>>. Acesso em dezembro de 2010.

CHEN, H. C.; ZALL, R. R. (1982) Continuous fermentation of whey into alcohol using an attached film expanded bed reactor. **Process Biochemistry**, 17 (1), 20-25.

DEMOTT, B. J.; DRAUGHON, F. A & HERALD, P. J., (1981) Fermentation of lactose in direct-acid-set cottage cheese whey. **Journal of Food protection**, 44 (8), 588-590.

GOULD, B. W. Understanding dairy markets. **Agricultural and applied economics**, UW Madison. Disponível em: <<http://future.aae.wisc.edu>>. Acesso em dezembro de 2010.

GUIMARÃES, P. M. R.; TEIXEIRA, J. A. DOMINGUES, L. (2008) Fermentations of high concentrations to ethanol by engineered flocculent *Saccharomyces cerevisiae*. **Biotechnology Letters**, 30, 1953-1958.

GUIMARÃES, P. M. R.; TEIXEIRA, J. A.; DOMINGUES, L. (2010) Fermentation of lactose to bio-ethanol by yeasts as part of integrated solutions for the valorization of cheese whey. **Biotechnology Advances**, 28 (3), 375–384

HOSSEINI, M.; SHOJAOSADATI, S. A.; TOWFIGHI, J. (2003) Application of a bubblecolumn reactor for the production of a single-cell protein from cheese whey. **Industrial Chemical Research**, 42, 764-766.

JELLEN, P. Dried Whey, Whey Proteins, Lactose and Lactose Derivatives Products. In: TAMIME, A. Y. (ed.) **Dairy Powders and Concentrated Products**. England: John Wiley & Sons. 2009. p. 255-267.

KELLY, P. M. Significance of lactose in milk powders. In: FOX, P. F. e MCSWEENEY, P. L. H. (eds.) **Advanced Dairy Chemistry Volume 3: Lactose, water, salts and minor constituents**. New York: Springer. 2009. p. 80-97.

KOTOUPAS, A.; RIGAS, F.; CHALARIS, M. (2007) Computer-aided process design, economic evaluation and environmental impact assessment for treatment of cheese whey wastewater. **Desalination**, 213, 238–252.

LEWANDOWSKA, M.; KUJAWSKI, W. (2007) Ethanol production from lactose in a fermentation/pervaporation system. **Journal of Food Engineering**, 79, 430–437.

MAPA – Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Resolução nº 4, de 28 de junho de 2000**. Institui o produto denominado ‘Manteiga Comum’, para comercialização exclusiva no território nacional, que deverá atender às seguintes especificações de qualidade. Diário Oficial da União, Brasília, 05 de julho de 2000, Seção I, p. 5.

MUN, J. **Modeling risk: applying Monte Carlo simulation, real options analysis, forecasting, and optimization techniques**. New Jersey: John Wiley & Sons. 2006. 605p.

MUÑI, A.; PÁEZ, G.; FARIA, J.; FERRER, J.; RAMONES, E. (2005) Eficiência de um sistema de ultrafiltração/nanofiltração tangencial em serie para el fraccionamento y concentración del lactosuero. **Revista Científica**, 15, 361-367.

OZMIHCI, S.; KARGI, F. (2007) Continuous ethanol fermentation of cheese whey powder solution: effects of hydraulic residence time. **Bioprocess Biosystem Engineering**. 30, 79-86.

RYCHLIK, I.; RYDÉN, J. **Probability and risk analysis; an introduction for engineers**. 2 ed. Berlin: Springer. 2006. 281p.

SANSONETTI, S.; CURCIO, S.; CALABRÒ, V.; IORIO, G. (2009) Bio-ethanol production by fermentation of ricotta cheese whey as an effective alternative non-vegetable source. **Biomass and Bioenergy**, 33, 1687–1692.

SCHAAFSSMA, G. (2008) Lactose and Lactose Derivatives as Bioactive Ingredients in Human Nutrition. **International Dairy Journal**, 18, 458-465.

SOUZA, R.R.; BERGAMASCO, R.; COSTA, S.C.; FENG, X.; FARIA, S.H.B.; GIMENES, M.L. (2010) Recovery and Purification of Lactose from Whey. **Chemical Engineering and Processing**, 49 (11), 1137-1143.

STANISZEWSKI, M.; KUJAWSKI, W.; LEWANDOWSKA, M. (2009) Semi-continuous ethanol production in bioreactor from whey with co-immobilized enzyme and yeast cells followed by pervaporative recovery of product – Kinetic model predictions considering glucose repression. **Journal of Food Engineering**, 91, 240–249.

WALSTRA, P.; WOUTERS, J.T.M.; GEURTS, T.J. **Dairy science and technology**. 2 ed. New York: CRC Press. 2006. 768p.

## CONCLUSÃO GERAL

A implantação de plantas para processamento de soro de queijo se mostram viáveis para produção de CPS 34 e CPS 80, sendo que apresentam viabilidade ainda maior quando integradas à produção de lactose em pó em ambos os processos. Porém, quando o permeado da operação de ultrafiltração ou diafiltração é utilizado para produção de etanol a partir da fermentação da lactose, há menor atratividade financeira, já que todos os índices se mostraram inferiores quando comparados aos processos de produção de CPS.

Pode-se dizer que a modelagem dos processos permitiu a verificação dos parâmetros utilizados, para que houvesse validação dos dados de entrada no modelo, devido aos produtos apresentarem composições similares à esperada para concorrência no mercado brasileiro.

As ferramentas apresentadas neste estudo se mostraram eficientes para fornecer uma direção à tomada de decisão para implantar uma indústria que utilize o soro como matéria-prima, pois possibilitou a visualização e obtenção de dados concretos para que um investimento seja realizado de maneira consciente e com menores incertezas.