

# Uma abordagem experimental para a otimização da rentabilidade de extração de proteína de soja na produção de bebidas

*An experimental approach for the optimization of profitability of extraction of soy protein on the production of beverages*



Carlos Eduardo Fontana<sup>1</sup>  
Pedro Paulo Balestrassi<sup>1</sup>

**RESUMO:** Este trabalho aplica a metodologia de delineamento de experimentos na otimização da rentabilidade e vazão de base, no processo de extração de proteína de soja para a produção de bebidas a base de soja, na planta de uma empresa de bens de consumo. Para a análise das duas respostas, oito fatores foram investigados. Uma solução robusta foi encontrada e corresponde a uma configuração adequada de operação para o processo.

**Palavras-chave:** Extração de Proteína de Soja, Rentabilidade, Delineamento de Experimentos (DOE).

**ABSTRACT:** *This paper applies the methodology of design of experiments to optimize profitability and base flow in the process of extraction of soy protein for the production of soy-based beverages in a consumer goods company. For the analysis of two responses, eight factors were investigated. A robust solution was found and corresponds to an appropriate setting for the process operation.*

**Keywords:** *Extraction of Soy Protein; Profitability; Design of Experiments.*

## 1. INTRODUÇÃO

O principal ingrediente de bebidas de soja, a Base de Soja, pode ser produzido de diversas formas, incluindo farinha de soja, concentrados, proteína isolada e por extração de soja. Durante a produção industrial de bebidas utilizando-se extração, diversos fatores devem ser considerados.

Com o crescimento constante do mercado de bebidas a base de soja, a produção vem sendo anualmente ampliada e em consequência, buscam-se alternativas que permitam este aumento. Uma delas é a melhoria de processos.

Uma vez que se tem um processo complexo e de importância estratégica para a empresa, a obtenção de resultados confiáveis e qualitativos através de simples experimentação e prática demandaria muito tempo de estudo e um grande número de ensaios, o que inviabilizaria qualquer experimento.

Neste cenário, uma boa metodologia de auxílio à experimentação é o Delineamento de Experimento (*Design of Experiments* - DOE), que objetiva determinar a influência de diversas variáveis nos resultados de um dado sistema ou processo, permitindo: i) a redução do número de ensaios sem prejuízo da qualidade da informação; ii) o estudo simultâneo de diversas variáveis, separando seus efeitos; iii) a determinação da confiabilidade dos resultados; iv) a realização da pesquisa em etapas, num processo iterativo de acréscimo de novos ensaios; v) a seleção das variáveis que influenciam num processo com número reduzido de ensaios; vi) a representação do processo estudado através de expressões matemáticas; vii) a elaboração de conclusões a partir de resultados qualitativos e a obtenção do ponto ótimo de funcionamento.

Este trabalho tem como objetivo principal, estabelecer o ponto ótimo de operação para o processo de extração de proteína de soja (ou encontrar uma solução robusta), o qual deverá contemplar a melhoria de duas respostas: i) A rentabilidade do processo em termos de percentual de proteína retido após

<sup>1</sup> Universidade Federal de Itajubá (UNIFEI)

ppbalestrassi@gmail.com

o processo de extração em relação ao percentual de proteína de entrada, contido nos grãos de soja e ii) o aumento da vazão de base de soja.

Através do auxílio da metodologia DOE será determinada uma seqüência ótima de experimentos e, posteriormente, será realizada a análise estatística e gráfica dos resultados provenientes dos mesmos. Esta análise permitirá identificar as variáveis mais significativas para a melhoria do processo.

Este objetivo geral pode ser desdobrado nos seguintes objetivos secundários: estudar e compreender o processo produtivo e o planejamento de experimentos; definir o problema/oportunidade no processo de extração de proteína de soja; levantar e medir os fatores que mais influenciam na rentabilidade da extração; obter seqüência de experimentos; identificar quais são os valores de operação para os fatores e realizar teste com ordem aleatória dos experimentos e medir os resultados; otimizar os resultados e propor novas faixas de operação.

## 2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1. Planejamento de Experimentos

Segundo Montgomery (1991), o experimento projetado ou planejado é um uma seqüência de testes nos quais se induzem mudanças deliberadas ou estímulos nas variáveis de entrada do processo ou sistema, de tal forma que seja possível observar e identificar os efeitos nas respostas ou nas variáveis de saídas. O processo ou sistema de transformação é representado pela combinação de máquinas, métodos, pessoas e outros recursos que transformam uma entrada em produtos acabados ou semi-acabados, com características ou parâmetros específicos, conforme Figura 1.

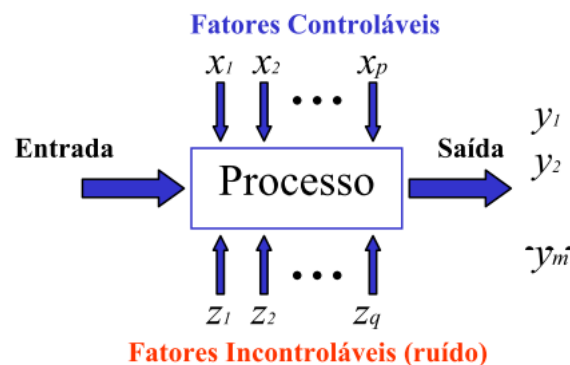


Figura 1 - Modelo Geral de um Sistema de Transformação

Fonte: Montgomery (1991)

As técnicas de planejamento e análise de experimentos são utilizadas basicamente para melhorar as características de qualidade dos produtos ou processo de fabricação, reduzir o número de testes e otimizar o uso de recursos da empresa (material, tempo dos funcionários, disponibilidade de equipamentos etc.).

Esse objetivo pode ser dividido em outros objetivos secundários: identificar as variáveis (fatores de controle) do processo que mais influem nos parâmetros de resposta de interesse; atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que a variabilidade da resposta de interesse seja mínima ou que o valor do resultado (parâmetros de qualidade) seja próximo do valor nominal; atribuir valores às variáveis influentes do processo de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido. Quando se torna importante investigar o efeito provocado nas respostas dos experimentos por dois ou mais fatores de controle e, cada um deles, com dois ou mais níveis de regulagens, é recomendado o uso de técnicas clássicas de planejamento, como por exemplo: técnica de planejamento fatorial completo, fatorial fracionado ou experimentos com pontos centrais.

O **planejamento fatorial fracionado** pode ser utilizado quando os experimentadores pouco conhecem sobre o processo a ser estudado, e neste caso torna-se importante que o maior número possível de fatores seja levado em consideração, já que não se conhecem ainda suas influências sobre o

resultado. Na maioria dos casos, os efeitos das interações de ordem mais elevadas não são significativas e podem, portanto ser desconsiderados, não sendo necessário executar todos os experimentos previstos em um fatorial completo.

Logo, se conclui que pode não ser necessário cobrir todo o espaço amostral com um fatorial completo, mas sim parte deste, e o planejamento fatorial fracionado como o próprio nome sugere, é uma redução do número de experimentos do fatorial completo pela metade, mas podendo ser também de 1/4, 1/8, 1/16,... até que se atinja o limite de experimentos mínimos necessários. O número de experimentos é dado pela fórmula  $2^{k-P}$ , onde  $k = \{1,2,3,\dots,n\}$  é o número de fatores escolhidos e  $P$  é o número de fatores principais confundidos com interações.

Coleman & Montgomery (1993) recomendam que durante o processo de experimentação seja feito um plano estratégico para coordenar as atividades. A seguir, apresentam-se as atividades do procedimento experimental descrito pelos autores:

- Definição dos objetivos do experimento;
- Definição dos parâmetros do experimento;
- Seleção dos fatores de controle e das variáveis de resposta;
- Seleção da matriz experimental;
- Realização do experimento;
- Análise de dados e interpretação dos resultados.

A parte prática deste trabalho é baseada neste roteiro apresentado. Esse plano experimental ajuda a desenvolver e conduzir efetivamente as atividades já definidas e, principalmente, permite maximizar as respostas das questões formuladas pela equipe de trabalho.

A otimização deve satisfazer as exigências para todas as respostas de um grupo. Aqui foi utilizado um indicador denominado *Desirability* (D) que mostra como está a satisfação da combinação dos objetivos para todas as respostas. D tem uma amplitude que varia de 0 a 1. D=1 corresponde a plena obtenção dos objetivos e D=0 corresponde a impossibilidade de satisfação dos objetivos.

## 2.2. O processamento da soja

Segundo Imram, Gomez e Soh (2003), o processo de produção de bebidas a base de soja pode ser representado pela Figura 2.

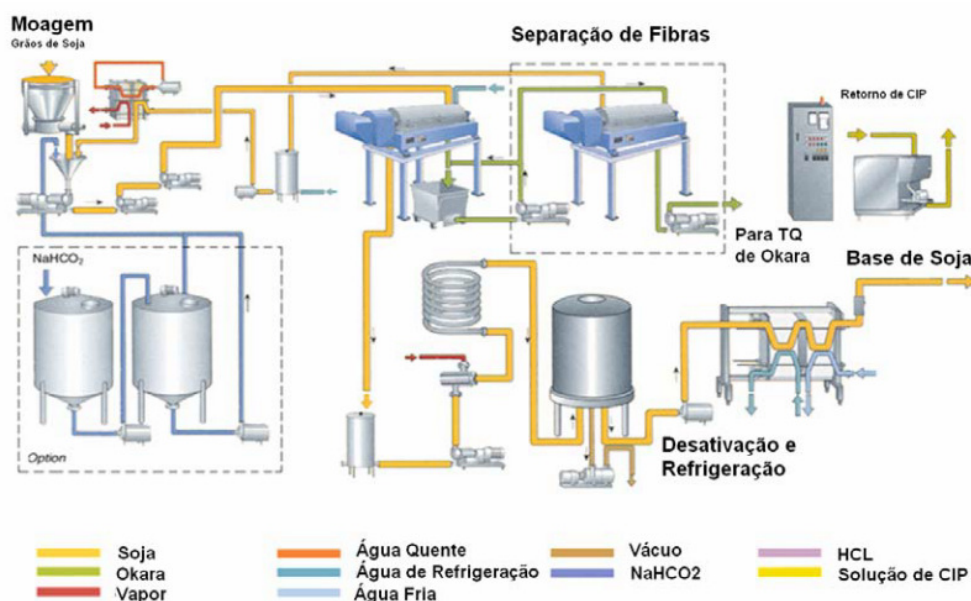


Figura 2 - Fluxograma do Processo de Extração

Fonte: Imram, Gomez e Soh (2003)

Neste processo, grãos de qualidade e tamanhos uniformes são misturados com água quente e bicarbonato de sódio, em seguida bombeados aos moinhos. Após os moinhos, têm-se um extrato composto por fibras e leite de soja, conhecido como *Slurry*. Este é então bombeado ao Decânter, o qual, por força centrífuga, realiza a separação das fibras. Neste ponto, o extrato clarificado de soja é separado do resíduo fibroso, também conhecido como Okara. Após um período de centrifugação, o líquido clarificado é descarregado via discos de regulação de nível na seção final do Decânter. A Okara é bombeada para fora através de um sistema de rosca sem fim.

Para o propósito deste trabalho serão abordados os seguintes processos: Mistura e aquecimento, Moinhos, Decânter e Balanço de Proteína.

O processo de mistura e aquecimento é fundamental para enfraquecer a estrutura celular do grão de soja, reduzindo o tempo de moagem e aumentando a razão de extração de nutrientes.

O primeiro moinho é constituído de uma faca e de um disco perfurado. Neste moinho, o *Slurry* sofre um corte grosseiro e então é transportado para fora via força centrífuga, como ilustra a Figura 3.

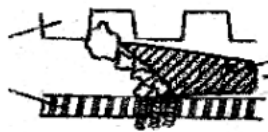


Figura 3 - Esquema de um Moinho Helicoidal

Fonte: Imram, Gomez e Soh (2003)

O *Slurry* é exposto a uma alta força de corte e de fricção. A superfície dentada gira a uma alta velocidade criando causando pressão e tensão nas partículas, como mostra a Figura 4.

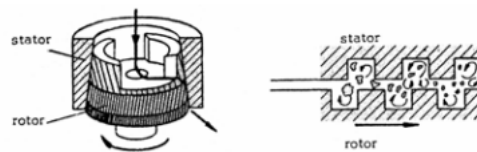


Figura 4 – Esquema de um Moinho Coloidal

Fonte: Imram, Gomez e Soh (2003)

Os moinhos são essenciais para a extração. Sem eles não há como extrair as proteínas que ficam dentro do cotilédone da semente de soja e se eles estão operando fora das condições ou parâmetros ideais, podem prejudicar o diâmetro de partícula, deixando-as grosseiras, o que acarretará em uma péssima separação entre fibras e extrato. Prejudicando a Rentabilidade do processo.

O objetivo da operação de separação de fase (decânter) é realizar uma separação apropriada entre as fibras (Okara) e a suspensão de proteína, chamada base de soja, como mostra a Figura 5. A Okara deve conter a menor quantidade de umidade e proteína possível e, ao passo que, a base de soja deve conter a menor quantidade de fibras e restos de vegetais.

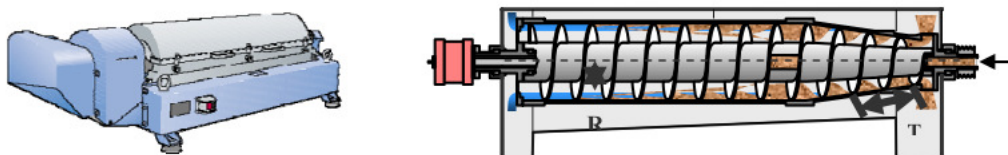


Figura 5 – Vista 3D e Esquema de um Decânter

Fonte: Imram, Gomez e Soh (2003)

Para o processo ser interessante comercialmente, uma alta Rentabilidade de extração de base de soja é sempre desejável. A Rentabilidade pode ser obtida do total de recuperação de sólidos, que significa o percentual (%) de proteína retida no produto final comparado ao percentual (%) de proteína contida nos grãos de soja. Também pode ser obtida através do balanço de massa ou volume, comparando-se o volume de base de soja em função do percentual (%) de proteína extraída pela vazão de grãos de soja em função do percentual (%) de proteína da soja, dada pela equação 1 (onde V é a vazão).

$$\text{Rentabilidade} = \frac{V_{\text{BASE}} \times (\% \text{ de Proteína da Base})}{V_{\text{SOJA}} \times (\% \text{ de Proteína de Soja})} \quad (1)$$

### 3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Definição dos objetivos do experimento

Esse problema é decorrente de um questionamento a respeito dos parâmetros que estavam sendo Aplicados na planta de uma empresa de alimentação e como os resultados para Rentabilidade e Vazão de Base eram obtidos. Pôde-se verificar que a planta estava aquém dos resultados esperados, apresentando Rentabilidades inferiores a 53%. Também foi evidenciada a necessidade de se melhorar o processo de extração para suportar possíveis aumentos na demanda futura.

#### 3.2 Seleção dos fatores de controle e os níveis do processo

Taguchi (1993) define que os fatores de controle do processo são os fatores que podem ser regulados com diferentes níveis e que, quando ajustados corretamente, podem contribuir na robustez do processo de fabricação.

Através do *Handbook* da empresa fornecedora das linhas de extração e dos resultados de *brainstorming* da equipe de coordenação do processo, pôde-se chegar aos fatores que mais influenciam no processo conforme Tabela 1. Os níveis dos fatores foram considerados adequados por especialistas para o procedimento experimental.

Fator	Nível do Fator		Papel no processo
	-1	+1	
1 - Contra pressão no decânter	1,2 bar	1,4 bar	Controla a pressão do <i>Slurry</i> no interior do decânter, regulando o teor de sólidos solúveis na base resultante da filtração.
2 - Velocidade diferencial	35 rpm	60 rpm	Regula a força centrífuga no interior do decânter.
3 - Temperatura da água	85 °C	90 °C	Facilita a extração da proteína, alterando a sua forma.
4 - <i>Gap</i> moinhos	0,25 mm	0,30 mm	Espaço interno entre rotor e estator do moinho coloidal. Controla o tamanho para partícula do <i>Slurry</i> de soja.
5 - Vazão de entrada de soja	660 kg/h	670 kg/h	Entrada para o processo.
6 - Vazão de entrada de água	3270 kg/h	3350 kg/h	Entrada para o processo.
7 - Frequência do inversor da bomba de bicarbonato	50%	60%	Controla a vazão de bicarbonato de sódio, que é adicionado para possibilitar o aumento do pH do <i>Slurry</i> .
8 - Posição do manípulo	3 voltas	4 voltas	

#### 3.3. Seleção das variáveis de resposta

Segundo orientação técnica e a necessidades para o cálculo do balanço de proteína (Rentabilidade), as variáveis de resposta que deveriam ser monitoradas durante o experimento eram: Brix (percentual (%) de sólidos solúveis) da base de soja, vazão da base de soja, pH da base extraída, concentração da solução de bicarbonato, percentual (%) de proteína na okara, percentual (%) de proteína nos grãos de soja e a vazão de okara.

#### 3.4. Seleção da matriz experimental

Definida a etapa anterior, o próximo passo foi construir a matriz de planejamento. Foram considerados oito fatores de controle, cada um deles com dois níveis, utilizando a técnica de fatorial fracionado  $2^{k-p}$

com ( $k=8$  e  $p=3$ ), com resolução IV e duas replicações resultando em 64 combinações. O Anexo 1 apresenta a matriz experimental, com as combinações dos níveis dos fatores que foram testados no processo de extração de proteína.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Nesta fase do procedimento experimental, os experimentos e posteriores cálculos para Rentabilidade foram realizados. Os resultados dos experimentos realizados encontram-se no Anexo 2.

Com os dados obtidos foi possível realizar as análises dos experimentos e obter os gráficos dos efeitos (Figuras 6 e 7) para as duas respostas. Os efeitos principais são mostrados nas Figuras 8 e 9.

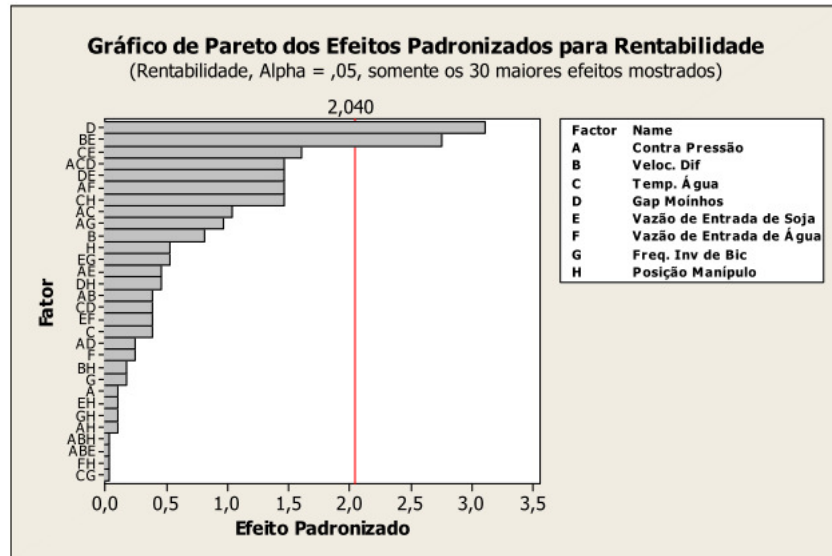


Figura 6 – Gráfico de Pareto para Rentabilidade

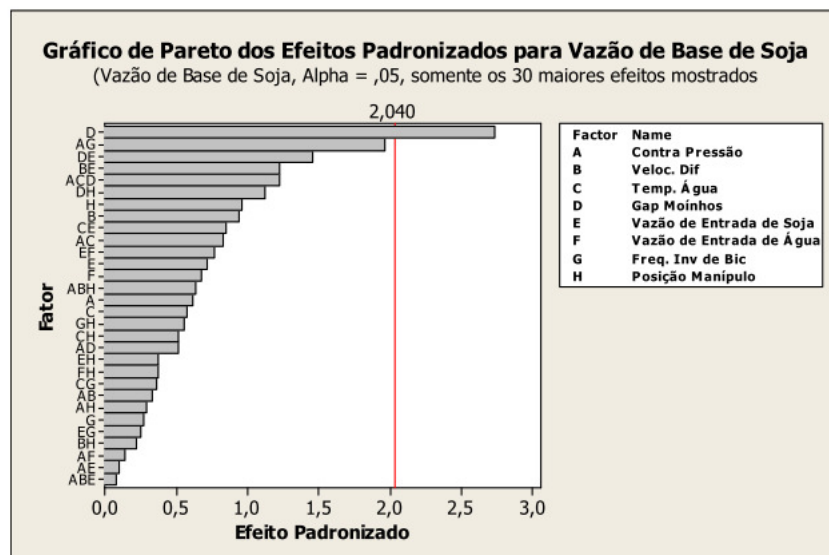


Figura 7 – Gráfico de Pareto para Vazão de Base de Soja

Em uma análise inicial pode-se perceber a existência de um fator influente para as duas respostas (*Gap Moinhos*) e de também uma interação.

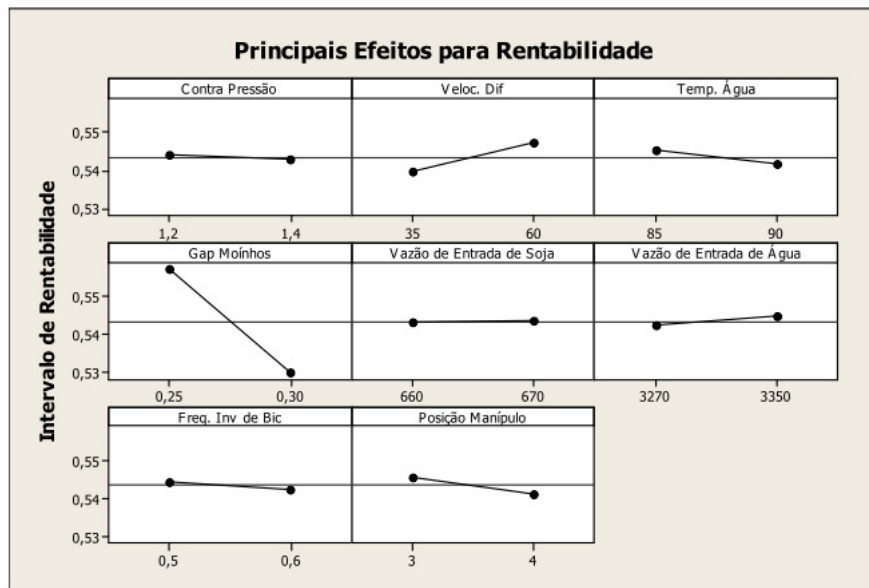


Figura 8 – Principais Efeitos para Rentabilidade

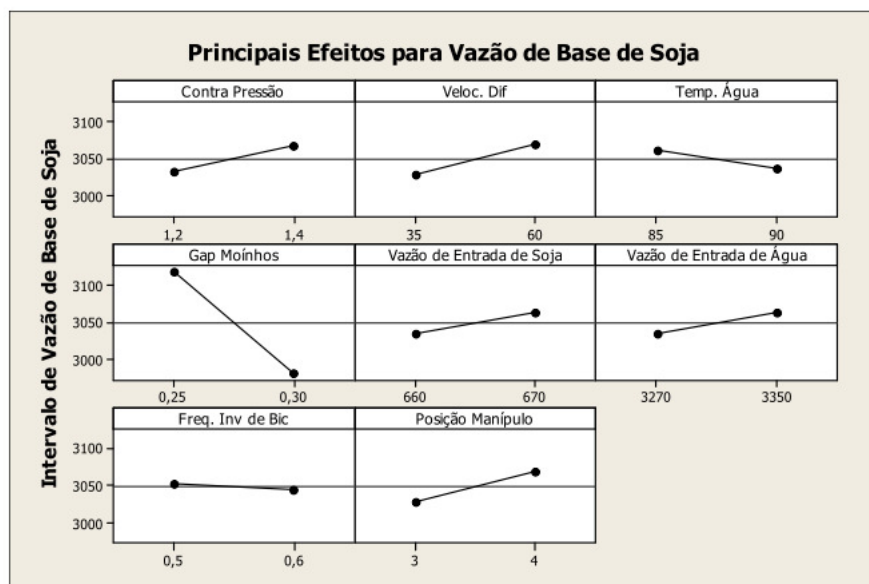


Figura 9 – Principais Efeitos para Vazão de Base de Soja

Das figuras 8 e 9, nota-se uma grande influência, tanto para Vazão de Base de Soja, quanto para Rentabilidade, da variação do fator *Gap Moinhos*. Para Vazão de Base de Soja, qualquer aumento na vazão da água, de soja e contra Pressão, traz melhoria nos resultados.

Estabelecendo-se os parâmetros para o cálculo da *Desirability* (D) com as restrições da Tabela 2 para Rentabilidade e Vazão de Base obteve-se a Tabela 3 para configuração ótima de operação.

Tabela 2 – Restrições para o cálculo da função *Desirability*

Resposta	Alvo	Valor Mínimo	Alvo	Valor Máximo	Peso	Importância
Vazão de base de soja	Maximizar	2600	3000		1	1
Rentabilidade	Alvo	0,55	0,56	0,57	1	1

Tabela 3 – Resultados da otimização

Máxima vazão $y = 3173,22$ $d = 1,00$	Ótimo D 1,00	Máx. Atual Mín.	Contra pressão 1,40 (1,40) 1,20	Velocidade diferencial 60 (35) 35	Temp. da água 90 (85) 85	Gap. Moinhos 0,3 (0,2527) 0,25
Rentabilidade $y = 0,56$ $d = 1,00$	Ótimo D 1,00	Máx. Atual Mín.	Vazão de soja 670 (670) 660	Vazão de água 3350 (3270) 3270	Freq. da inversor 0,6 (0,5) 0,5	Posição do Manípulo 4 (3) 3

Por meio da D pode-se concluir que: operando-se com 1,4 bar de Contra Pressão no Decânter, 35 rpm de Velocidade Diferencial, Entrada de Água à 85°C, Gap dos Moinhos em 0,25 mm, Vazão de Soja a 670 kg/h e 3270 kg/h de Vazão de Água a planta será capaz de produzir 3173 kg/h de Base de Soja a uma Rentabilidade de 56%. Estes resultados podem ser considerados muito satisfatórios para o processo em questão, sendo que o patamar atual do processo para Rentabilidade é inferior a 53% e 3000kg/h para Vazão de Base de Soja.

Um paradigma que envolvia os métodos de operação do Processo de Extração foi também analisado neste trabalho. Referia-se à influência da Vazão de Bicarbonato de Sódio na Rentabilidade do Processo e Vazão de Base. Não foi encontrada uma correlação significativa ( $P\text{-value} > 0.5$ ) entre Rentabilidade, Vazão da Base de Soja e Coeficiente de Vazão de Bicarbonato como mostra os gráficos da Figura 10.

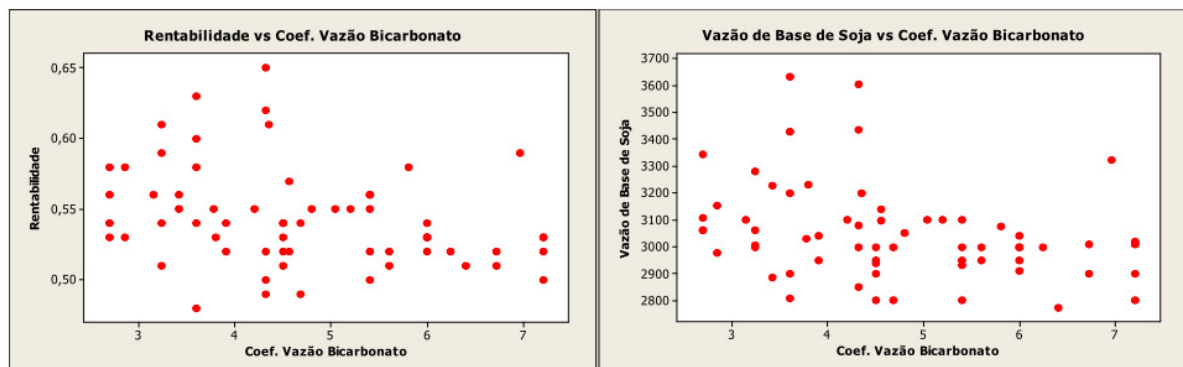


Figura 10 – Correlações Vazão de Bicarbonato x Rentabilidade e Vazão de Base de Soja (Coef – Coeficiente obtido da multiplicação entre: posição do manípulo, frequência do inversor da bomba de bicarbonato e concentração da solução de bicarbonato.)

## 5. CONCLUSÕES

A aplicação feita neste trabalho, descreve a otimização de duas respostas simultâneas para o processo de extração de base de soja em função de oito parâmetros de controle. Os resultados foram muito promissores e uma otimização nesses termos nunca antes fora feita na empresa. Simultaneamente, para Rentabilidade e Vazão de Base de Soja, foi alcançada uma solução adequada permitindo a melhoria dos ganhos da empresa.

Pôde-se verificar que, diferente do que a operação tinha como paradigma, a adição de bicarbonato de sódio não interfere nos dois resultados analisados. Uma vez constatado isso, sua retirada do processo pode ser objeto de estudo para futuros trabalhos na planta, podendo gerar também economias. O experimento poderá ser replicado em outras plantas.

## REFERÊNCIAS

COLEMAN, D. E.; MONTGOMERY, D. C. A systematical approach to planning for a designed industrial experiment. *Technometrics*, v. 35, n. 1, p. 1-12, 1993.

IMRAM, N.; GOMEZ, I.; SOH, V. **Tetra Pak Centre of Expertise Soya**. Soya Handbook, 110p., Singapore, 2003.



MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**, 3ª edição, John Wiley and Sons, 1991.

REY, L. **Planejar e redigir trabalhos científicos**. 2a ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1993.

TAGUCHI, G. **Taguchi on robust technology development: bringing quality upstream**. New York: ASME, 1993.