

PAULO DE SOUZA COSTA SOBRINHO

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA OPERAÇÃO EVOLUTIVA
(EVOP) PARA MELHORIA DE PROCESSO NA INDÚSTRIA DE
ALIMENTOS

Tese 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
2002

PAULO DE SOUZA COSTA SOBRINHO

UTILIZAÇÃO DA METODOLOGIA OPERAÇÃO EVOLUTIVA (EVOP) PARA
MELHORIA DE PROCESSO NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

Tese 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: 24 de Julho de 2002.

Cláudio Furtado Soares

Maria de Fátima Brant Drumond
(UFMG)

Afonso Mota Ramos
(Conselheiro)

Luiz Antônio Minim
(Conselheiro)

José Benício Paes Chaves
(Orientador)

A Deus, razão única de toda a existência.
Aos meus pais (*in memoriam*), pela presença constante em minha vida.
As minhas irmãs e irmãos, pelo apoio incondicional, estímulo e carinho.
As minhas tias, pelo apoio incondicional e carinho.
À Luciana, pelo amor, incentivo e paciência.

“A tarefa não é contemplar o que ninguém
ainda contemplou, mas meditar, como ninguém
ainda meditou, sobre o que todo mundo tem
diante dos olhos”

Schopenhaver

AGRADECIMENTO

À Universidade Federal de Viçosa e ao Departamento de Tecnologia de Alimentos (DTA), pela oportunidade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro.

Ao professor José Benício Paes Chaves, pelo apoio, oportunidade e amizade.

Aos professores Afonso Mota Ramos e Luiz Antônio Minim, pela disponibilidade e sugestões.

Aos professores Frederico Passos e Marco Túlio, pela amizade.

A Sueli e Geralda, pelo apoio.

Ao Christiano, Aureliano, Eduardo Henrique e a Vânia, pela inestimável amizade.

Aos funcionários e professores do DTA e a todos os amigos que contribuíram para minha formação acadêmica.

BIOGRAFIA

PAULO DE SOUZA COSTA SOBRINHO, filho de Silas Cardoso Costa e Osvaldina de Souza Costa, nasceu na cidade de Senhor do Bonfim, Estado da Bahia, em 16 de Agosto de 1973.

Em Janeiro de 2000, graduou-se em Engenharia de Alimentos, pela Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, Minas Gerais.

Em Fevereiro de 2000, iniciou o Curso de Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos na Universidade Federal de Viçosa, submetendo-se à defesa de tese no dia 24 de Julho de 2002.

CONTEÚDO

RESUMO	viii
ABSTRACT.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. O MÉTODO EVOP (Evolutionary Operation).....	4
2.1 Introdução	4
2.2 Estratégias para melhoria de processos industriais	9
2.3 O método EVOP e a evolução natural	10
2.4 Operação estática e evolutiva	11
2.5 Características do método EVOP.....	12
2.6 Organização de um programa EVOP	16
2.7 A variabilidade do processo	17
2.8 Planejamento de Experimentos.....	17
2.8.1 Esquema EVOP para duas variáveis (fatorial 2 ²)	18
2.8.2 Condição de Referência	20
2.8.3 A medida do erro padrão de média.....	22
2.8.4 Exemplo de um esquema EVOP	23
3. APLICAÇÃO DO MÉTODO EVOP NO PROCESSO DE SECAGEM DE LEITE	25
3.1 Introdução	25
3.2 O Processo.....	28
3.2.1 Definição do leite	28
3.2.2 Mercado e os aspectos econômicos.....	29
3.2.3 Sistema de Secagem.....	31
3.3 Materiais e Métodos	41
3.3.1 A metodologia de pesquisa empregada.....	41
3.3.2 Condução da pesquisa	42
3.3.3 Estrutura do processo	43

3.3.4 As variáveis do processo	44
3.3.5 Planejamento experimental	46
3.3.6 Informações adicionais	53
3.4 Resultados e Discussão	54
3.4.1 O Perfil da Empresa.....	54
3.4.2 Análise dos dados históricos do processo	58
3.4.3 Resultados da Fase I do programa EVOP.....	59
3.4.4 Resultados da Fase II do programa EVOP	66
3.4.5 Resultados da Fase III do programa EVOP.....	73
3.4.6 Resultados obtidos ao final das três fases do programa EVOP	80
3.5 Conclusões.....	85
3.5.1 Quanto a Melhoria do Processo	85
3.5.2 Quanto ao uso do método EVOP	85
4. CONCLUSÕES GERAIS	87
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	88
APÊNDICE.....	92
APÊNDICE A - Folha de trabalho de cada ciclo do programa EVOP.....	92
APÊNDICE B - Dados operacionais do processo de produção de leite em pó	106

RESUMO

COSTA SOBRINHO, Paulo de Souza, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2002. **Utilização da Metodologia Operação Evolutiva (EVOP) para Melhoria de Processo na Indústria de Alimentos**. Orientador: José Benício Paes Chaves. Conselheiros: Afonso Mota Ramos e Luiz Antônio Minim.

O momento atual da indústria de alimentos em um mercado exigente e competitivo exige melhoria contínua da qualidade e de desempenho do processo. Os sistemas de garantia de qualidade adquiriram um enfoque proativo, deixando de ser unicamente um controle de processo e passando a buscar a melhoria contínua e a solução antecipada de problemas. Diante deste quadro, este trabalho foi desenvolvido com o propósito de avaliar a utilização de um método estatístico para melhoria contínua de processo na indústria de alimentos denominado “*Evolutionary Operation*” (EVOP). Este método utiliza técnicas estatísticas simples e eficazes, é desenvolvido diretamente na linha de produção sem promover interrupções do processo, sem demandar grande custo adicional e tempo de desenvolvimento de experimentos. Para atender o objetivo principal do trabalho, o método EVOP foi aplicado ao processo de produção de leite em pó, em um sistema de secagem composto por evaporador tubular de película descendente e um secador atomizador de disco centrífugo. A meta do programa EVOP foi minimizar a quantidade de leite em pó classificada como sedimento B, por meio da otimização das variáveis: teor de sólidos do concentrado (TS) e vácuo produzido na câmara de secagem. Outro objetivo do programa EVOP foi avaliar a influência do teor de sólidos e do vácuo sobre a vazão de leite fluido processado (VAZÃO) e sobre o rendimento do processo de secagem (RENDIMENTO). Após a aplicação do programa EVOP ao processo, verificou-se a redução da quantidade de leite em pó classificada como sedimento B de 4,23% para 0,25% da produção diária. No entanto, para as variáveis respostas vazão de leite fluido processado e rendimento do processo não foram verificados efeitos estatisticamente significativos. Além do ganho de produtividade, a utilização do método EVOP promoveu melhor entendimento do processo pelo pessoal de operação, permitindo uma evolução contínua do processo em estudo.

ABSTRACT

COSTA SOBRINHO, Paulo de Souza, M.S., Universidade Federal de Viçosa, Julho de 2002. **Utilization of the evolutionary operation (EVOP) methodology for the food industry process improvement.** Adviser: José Benício Paes Chaves. Committee Members: Afonso Mota Ramos and Luiz Antônio Minim.

To have a competitive edge in a strict marketplace the food industry must pursue continuous improvement of quality and industrial process performance. The quality assurance systems now have a proactive focus and go beyond of being a pure process control. The quality management system must provide tools for continuous process improvement and to prevent quality problems of happening. In this context, this research has been carried out looking for evaluating the utilization of evolutionary operation (EVOP) technique for continuous improvement of the milk powder drying process. EVOP works with simple statistics techniques and is developed directly in the production line, therefore, without normal process undue interruption. The experiments (assays) are developed without significant additional costs and in shorter than normal experimentation time. The research was run in a milk powder drying plant where the drying system was made up of a descending film tubular evaporator and a centrifuge disk spray drier. The goal of the EVOP program was to minimize the production of the so called sediment B (disk B) milk powder, which is a defect, of course, through the optimization of the variables solid content of the concentrated (TS) and the produced drying chamber vacuum. An additional EVOP program objective was to evaluate the solid content and the vacuum produced effects over processed fluid milk flow (VAZAO), and also over the drying process yield (RENDIMENTO). Following the EVOP program application it has being observed a significant reduction in the amount of sediment B (disk B) milk powder from an initial value of 4.23% to 0.25%, in a daily basis production. However, for the response variables processed fluid milk flow and process yield they where no significant effects of the process variables values changes. In addition to the sediment B milk powder reduction, running the EVOP program provided for better process understanding by the people working on the drying operation.

1. INTRODUÇÃO

As mudanças econômicas e tecnológicas, em particular as novas exigências do mercado e as inovações, impõem às indústrias de alimentos a necessidade de garantia e de melhoria contínua da qualidade de seus produtos e de desempenho de seus processos, a fim de aumentar a produtividade e manter sua competitividade.

No mundo altamente competitivo de hoje, excelência em qualidade não é um luxo, mas uma exigência fundamental do ponto de vista do fabricante e do consumidor. Da forma como está definida, a qualidade é refletida por um conjunto geral de critérios, tais como: o desempenho sobre os valores de especificação; a variabilidade mínima; e o custo mínimo. Geralmente, engenheiros tendem a se preocupar com o primeiro critério; estatísticos estão freqüentemente interessados no segundo critério e os gerentes financeiros no terceiro. É evidente que um produto ou processo bem sucedido é aquele que reúne todos os critérios citados (GOH, 2000).

O Controle Estatístico de Processos (CEP) é uma metodologia estatística orientada para o aprimoramento da qualidade formada por um conjunto de técnicas que visam o controle e a melhoria contínua de um processo. Na ação gerencial de melhoria da qualidade, os métodos e as técnicas estatísticas de otimização de processos são muito usados na fase de análise das possíveis causas do problema, permitindo estudar o efeito simultâneo das várias causas que compõem o processo, identificar as principais causas que se deve atuar e determinar as condições do processo que permita atingir a meta de melhoria, de forma a obter o produto com menor variabilidade e custo e a qualidade esperada pelo cliente (WERKEMA & AGUIAR, 1996).

As técnicas estatísticas de otimização de processos utilizam-se de experimentos seqüencialmente planejados de forma a obter a condição ótima para cada processo, com o menor número possível de experimentos. Esse tipo de pesquisa experimental em uma indústria tem como objetivos principais pesquisar as condições ótimas para operação de um processo ou obtenção de um novo produto; conhecer o comportamento das variáveis de interesse dentro das fronteiras de operação de uma planta industrial; e selecionar os níveis de

controle dos parâmetros do processo para alcançar as especificações dos clientes (DRUMOND et al., 1999).

Segundo DRUMOND et al. (1999), a metodologia de superfície de resposta permite atingir as condições ótimas para operação de um processo com um mínimo de experimentos e a precisão desejada, no entanto, é adequada para pesquisas conduzidas em laboratório ou planta piloto devido às grandes interferências que são realizadas nos fatores. Já as condições ótimas de um processo em escala industrial podem ser alcançadas por meio da metodologia *Operação Evolutiva* ou EVOP (Evolutionary Operation); proposta por BOX (1957;1998) como um método para monitoramento e melhoria contínua de um processo em escala industrial através da alteração das condições de operação em direção a um valor ótimo. Esta metodologia utiliza experimentos em que os fatores são modificados cuidadosamente, de modo que não haja perda de produção ou condições de riscos para os equipamentos.

As transformações ocorridas na indústria de alimentos a partir dos anos 90, trouxeram implicações sobre a competição internacional, principalmente a delimitação de novos espaços de concorrência mais internacionalizados, a aceleração das transformações tecnológicas com a diversificação de produtos e de processos, além da necessidade cada vez maior de otimizar processos e reduzir custos. Desta forma, estes fatores têm levado as indústrias de alimentos a reestruturarem seus sistemas produtivos e suas formas de gestão, para oferecer ao consumidor produtos cada vez mais sofisticados com o mínimo custo (PAIVA, 1999).

Nas novas formas de gestão, há considerável destaque para o processo de melhoria contínua, exemplo disto é a estrutura das normas ISO 9000 versão 2000 (ABNT, 2000), que passou a ter um item dedicado ao processo de melhoria contínua. Na indústria de alimentos, as condições ótimas de operação não podem ser representadas como um ponto fixo em um gráfico, uma vez que apresenta variabilidade de matéria-prima, equipamentos, operadores do processo e também variações de mercado, como por exemplo, custos de matérias-primas e energia, preço de venda do produto final e exigências de qualidade do produto.

Na área de alimentos, há predominância de matérias-primas biológicas, que torna mais difícil definir as especificações dos produtos, devido às variações sazonais que influenciam na qualidade do produto final. Com toda

essa variabilidade, as condições operacionais do processo devem ser ajustadas a fim de produzir com menor custo e atingir eficientemente as características de qualidade do produto exigidas pelo consumidor, ou seja, o processo tem que apresentar flexibilidade para suportar as flutuações ambientais que poderão ocorrer, o que implica na necessidade de utilização de uma metodologia para a melhoria contínua do processo.

Nas indústrias de alimentos no Brasil, principalmente as pequenas e médias empresas, o controle de qualidade dos alimentos ainda está na fase de inspeção ou de aferição do produto acabado, possuindo uma carência técnica para utilização de ferramentas de qualidade, principalmente devido ao baixo grau de escolaridade e nível de treinamento do pessoal envolvido nas operações de processamento de alimentos.

Diante deste quadro, implantar uma ferramenta gerencial de melhoria contínua que seja flexível, simples em sua aplicação e que busque a otimização contínua do processo de produção é fundamental para a indústria alimentícia.

Em resposta a este contexto, este trabalho foi desenvolvido para mostrar a utilização do método chamado EVOP (Evolutionary operation) para otimização do processo, tendo em vista que o método é considerado altamente eficaz, devido ao baixo investimento e a grande chance de acerto (DRAPER, 2001), sem produção de resíduos industriais e sem perda de produção, por se tratar de um processo de otimização que é feito durante o processamento do produto sem interrupções.

O objetivo do trabalho foi estudar a utilização da metodologia denominada EVOP (Evolutionary Operation) como ferramenta para promover a melhoria de um processo alimentício industrial, por meio da otimização de seus parâmetros, da introdução da filosofia do programa EVOP à equipe que trabalha no processo, como também, mostrar passo a passo como esta metodologia pode ser empregada.

O processo a ser otimizado é o de produção de leite em pó. A escolha deste processo para o estudo da metodologia EVOP foi devido ao interesse da empresa pelo estudo e devido à disponibilidade em se ter uma unidade de produção com condições para ser submetida ao programa.

2. O MÉTODO EVOP (Evolutionary Operation)

2.1 Introdução

A excelência na gestão do processo de produção e de desenvolvimento de produto é crucial para as empresas adquirirem vantagem competitiva; para alguns estudiosos como PORTER (1993) a sobrevivência das empresas está na busca permanente da vantagem competitiva. As indústrias de alimentos buscam a melhoria de seus processos a fim de aumentar a produtividade, procurando manter a empresa em posição competitiva.

Atualmente, os consumidores têm acumulado experiências com relação a diversos produtos e estão ficando sensíveis a diferenças sutis em várias dimensões. Isto significa que pequenas melhorias nos produtos ou nos processos aumentam o padrão de excelência do produto alimentício, tornando o processo de melhoria contínua um fator essencial para a competição das empresas. Tão importante que passa a fazer parte explicitamente das normas de garantia de qualidade ISO 9000 (ABNT, 2000).

Com o ressurgimento de métodos estatísticos de controle de qualidade, na última década, tem-se obtido ganhos significativos em qualidade e produtividade. As primeiras aplicações desses métodos, normalmente, envolvem aprendizagem sobre qualidade através da gestão pela qualidade total (GQT), em seguida progresso adicional é alcançado usando controle estatístico de processo (CEP). Por fim, a última etapa consta da aprendizagem e prática de planejamentos estatísticos de experimentos na área de engenharia da qualidade (BARKER, 1992).

Enquanto a gestão pela qualidade total e o controle estatístico de processo estão tendo aceitação e sendo implantados, diariamente, na grande maioria das empresas, planejamento de experimentos, ainda, é uma proposta estranha, mística e cara. Parte da idéia do custo elevado vem do grande número de experimentos requeridos. Alguns outros obstáculos para a utilização de planejamento de experimentos surgem da complexidade aparente destes métodos (BARKER, 1992).

Em uma escala industrial é importante que qualquer ajuste operacional evite a fabricação de produtos fora da especificação, as variações inesperadas

do produto e que relacione diretamente qualquer mudança das variáveis operacionais a efeitos resultantes do processo (SCARRAH, 1997).

Segundo JURAN e GRAYNA (1988) em uma organização que estabelece a filosofia de um sistema de qualidade, três processos básicos ou ações gerenciais são conduzidos: Planejamento da qualidade – cuja finalidade é definir novos padrões ou processos capazes de atingir as metas de qualidade em condições normais de operação; Controle da qualidade – cuja finalidade é cumprir os padrões estabelecidos para o produto e o processo, através da verificação dos resultados e da atuação no processo para corrigir os desvios; Melhoria da Qualidade – cuja finalidade é alterar os padrões estabelecidos na etapa de planejamento da qualidade para atingir novas metas de qualidade.

Planejamento de experimentos e os métodos de otimização fornecem uma abordagem estruturada para melhoria de processo. Eles são eficientes por maximizar a quantidade de informação que pode ser obtida por meio de medidas experimentais, e abrangentes, uma vez que freqüentemente descobrem condições favoráveis não consideradas anteriormente. No entanto, estes métodos estruturados desenvolvidos para guiar estudos em pequena escala têm limitações que reduzem a sua utilização em aplicações industriais, visto que investigam simultaneamente várias variáveis e buscam observar comparativamente grandes efeitos das variáveis do processos de forma que a influência das variações ocasionais (ruído) do processo podem ser ignoradas. No entanto, isto pode subestimar os efeitos individuais das variáveis (SCARRAH, 1997).

SAAD (1994) relata que processos industriais raramente funcionam em condições operacionais ótimas. Freqüentemente, o estudo em pequena escala no laboratório ou planta piloto, nos quais muitos projetos de processos são baseados, fornecem uma aproximação das melhores condições a serem usadas na produção em escala industrial. Além disso, em grande parte dos experimentos realizados em escala industrial as variáveis associadas a um processo são freqüentemente modificadas seguindo a estratégia de “uma variável de cada vez”. Esse tipo de experimentação é demorado e pode ser muito complicado quando se tenta estudar as interações dos parâmetros. Segundo DEMING & ÖBERG (2000) essa estratégia de otimização pode ser enganosa e freqüentemente não atinge as condições ótimas reais.

O uso de experimentos planejados, especialmente experimentos do tipo fatorial, durante o desenvolvimento de um produto fora da linha de produção (“off-line”) antes da produção, tem sido uma técnica bem sucedida por várias décadas. A recente popularização do trabalho de Genechi Taguchi entre engenheiros de qualidade tem resultado no ressurgimento de interesse em planejamento de experimentos. Contudo, a abordagem “off-line” é insuficiente para alcançar a melhoria de qualidade, visto que em um processo plenamente desenvolvido é normal ocorrer mudanças em equipamentos, pessoal, matéria-prima, efeitos de mudanças de escala e em especificações do produto (MATHUR, et. al, 1994); sendo, portanto improvável que o processo esteja operando tão efetivamente quanto possível. Quase todo processo industrial existente tem um potencial para melhoria em produtividade. Esse potencial surge não somente das insuficiências no planejamento original, mas também, das mudanças que podem ocorrer ao longo do tempo (BOX & DRAPER, 1998; HUNTER & KITTRELL, 1966).

Nos experimentos em escala de laboratório ou em plantas piloto obtém-se informações que muitas vezes não são reproduzidas na planta de produção, visto que a mudança de escala altera os efeitos das variáveis envolvidas no processo, podendo causando grandes diferenças econômicas. A Figura 1 ilustra este fato mostrando os resultados da mesma reação química em pequena escala e em escala industrial. Percebe-se que, devido a efeitos de variáveis não considerados na pequena escala, o ponto ótimo do processo da pequena escala não é o mesmo ponto ótimo do processo na escala industrial, apesar de as curvas de nível serem similares. Para alcançar o ponto ótimo na escala industrial (ponto “O”), serão necessários vários ajustes das variáveis de processo na planta industrial, pois nesta situação os efeitos das variáveis são diferentes.

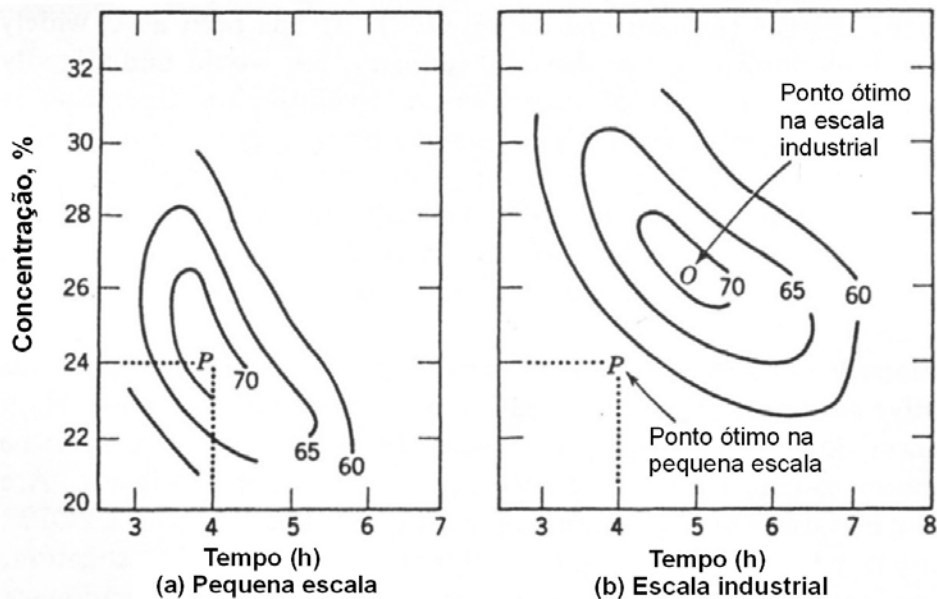


Figura 1: Curvas de nível das superfícies de rendimento, (a) escala reduzida e (b) escala de produção. Fonte: BOX e DRAPER (1998).

A melhoria de um processo em escala industrial introduz três limitações que não são relevantes para estudos em pequena escala. Primeiro, a maioria dos processos envolve múltiplas etapas ou estágios – mudanças em um estágio em particular deve ser introduzida cuidadosamente para evitar romper com os procedimentos normais de operação em outra parte do processo. Segundo, devido a grandes quantidades envolvidas, deve-se evitar a fabricação de produtos fora da especificação. Finalmente, é importante que o produto permaneça consistente; embora o produto possa ser melhorado, propriedades diferentes do produto podem causar problemas para consumidores que estão satisfeitos com as características atuais. A violação de qualquer uma dessas limitações normalmente resulta em perdas econômicas desnecessárias. Portanto, as técnicas sistemáticas para uso em instalações experimentais de pequena escala, ou para resolver modelos matemáticos, normalmente violam as limitações associadas com a melhoria contínua de processos em escala industrial (BOX & DRAPER, 1998; SCARRAH, 1997).

Percebendo os problemas de experimentação em escala industrial, a imprecisão na determinação das condições ótimas em escala de laboratório ou piloto e a aparente complexidade dos métodos de planejamento de experimentos, Box (BOX, 1957) desenvolveu na década de 50 uma abordagem que contorna essas dificuldades e ainda encontra um caminho sistemático para atingir as condições ótimas do processo (MYERS & MONTEGOMERY, 1995; BARKER, 1992).

Segundo BOX & DRAPER (1998); SCARRAH (1987); e FOX (1968) a filosofia básica de EVOP é que é ineficiente para um processo industrial processar somente um produto dentro das especificações desejadas, mas deve também fornecer informações sobre como promover a melhoria do processo ou do produto. Assim sendo, a proposta desse método é o monitoramento e a melhoria contínua do processo em escala industrial alterando as condições operacionais atuais para as condições ótimas.

Para BOX e DRAPER (1998) EVOP é uma ferramenta gerencial em que uma contínua rotina investigativa torna-se o modo básico de operação de um processo industrial e substitui a operação estática normal. Para BANERJEE et. al (1999) a metodologia EVOP pode ser considerada uma técnica multivariada de pesquisa seqüencial. Essa ferramenta produz informações de como melhorar as condições de operação atuais sem os riscos, pessoal especializado e as despesas geralmente associadas com experimentação em uma planta industrial. BOX & DRAPER (1998) e SCARRAH (1987) afirmam que EVOP não é um método que substitui a investigação fundamental empregadas em estudos exploratórios em laboratórios ou plantas piloto, como por exemplo, a metodologia de superfície de resposta; sendo desenvolvida para evitar características indesejáveis de experimentos de processo em escala industrial. Segundo BOX, HUNTER & HUNTER (1978) para evitar mudanças apreciáveis nas características do produto são feitas somente pequenas mudanças nos níveis das variáveis do processo. Para determinar os efeitos dessas mudanças é necessário repetir cada experimento várias vezes e calcular a média das observações. Assim sendo, FOX (1968) acredita que a EVOP minimiza os riscos da produção de grandes quantidades de produtos fora da especificação desejadas e possivelmente invendáveis.

A Operação Evolutiva (EVOP) foi planejada para ser conduzida por operadores num processo de produção em escala industrial, sem, contudo impedir ou alterar a produção satisfatória de produtos simultaneamente a sua aplicação. Deste modo, as circunstâncias são muito diferentes daquelas de laboratório ou planta piloto, em que dinheiro e tempo adicionais devem ser empregados para realização dos experimentos. No entanto, muitos fatores podem ser modificados simultaneamente em experimentos conduzidos cuidadosamente por técnicos qualificados e a produção de produto invendável não ser um problema. Considerando a situação em que EVOP é utilizada, tem-

se que manter a relação sinal-ruído baixa, assim, um grande número de experimentos é normalmente necessário para revelar os efeitos das mudanças; sendo imprescindível a realização destes, que resultam em um custo adicional baixo (BOX, HUNTER & HUNTER, 1978).

2.2 Estratégias para melhoria de processos industriais

MOHANTY e DAHANAYKA (1989) relatam vários métodos para melhorar um processo industrial, quando se tem como metas obter maior rendimento e atender aos requisitos de qualidade: EVOP (Evolutionary Operation); verificação do desempenho de processos; avaliação de desempenho de processos; estudos da capacidade de processos; e experimentos de simulação. Sendo que estes métodos podem ser utilizados independentemente ou em combinação de modo a obter resultados otimizados.

Segundo HOLMES (2001) diversos métodos têm sido propostos e usados para otimização de processos de fabricação, que incluem, por exemplo, redes neurais; lógica “fuzzy”; análise de regressão e sistemas especialistas. Cada um destes métodos tem suas dificuldades, não tanto no que se refere à teoria envolvida, mas bastante na aplicação dentro do ambiente industrial. As dificuldades surgem por diversos motivos, dentre eles, o fato de o processo industrial ser dinâmico e não estático, principalmente pela presença de fatores incontroláveis e pelo impacto das várias combinações destes fatores sobre as variáveis, que não são bem conhecidas tão pouco documentadas. Deste modo, para alcançar o ótimo mais favorável para a variável resposta nas condições de operação industrial, o sistema deve ser treinado para refletir o efeito das mudanças nas condições incontroláveis.

Uma outra dificuldade apontada por HOLMES (2001) é que os métodos de otimização comumente usados atualmente são essencialmente reativos. Tais sistemas de otimização são baseados nas análises dos dados históricos do processo, que resultaram de experimento não planejado, ou seja, a rotina de produção. Esses sistemas atuam sobre valores dos níveis dos vários fatores selecionados, que são permitidos variar à vontade dentro dos limites especificados, dificultando a análise e compreensão dos resultados. Portanto, o sistema de otimização deve ser proativo, isto é, deve usar experimentos

planejados e bem delineados para encontrar o caminho mais favorável para mover a variável resposta para o seu valor ótimo de operação.

Segundo MOHANTY e DAHANAYKA (1989) a metodologia EVOP é uma ferramenta de melhoria de processo bem sucedida, principalmente, por apresentar as seguintes particularidades:

- Classifica as variáveis independentes do processo por sua influência, porque seus efeitos podem ser quantificados numericamente, fazendo com que a seleção das mesmas seja feita de forma objetiva;
- As variações a serem implementadas com as variáveis selecionadas podem ser feitas por meio de uma programação, utilizando a experiência e a vivência de operadores e de engenheiros da planta;
- Uma vez conhecidas a magnitude dos efeitos, estes podem ser interpretados de forma a influenciar as decisões tomadas para melhoria do processo;
- Quando o ponto ótimo for atingido, o processo estará adaptado a condições já incorporadas;
- Participação ativa de todos os componentes que trabalham no processo;
- As mudanças são feitas de forma a não permitir perda de produtos, evitando assim o retrabalho;
- A simplicidade do método faz com que os resultados sejam altamente confiáveis e facilitem o entendimento de como estão sendo conduzidas as melhorias.

2.3 O método EVOP e a evolução natural

O conceito da técnica EVOP, segundo BOX e DRAPER (1998), é comparado com o processo de evolução natural, em que as espécies evoluem e melhoram por meio de uma seleção natural na qual elas sofrem mutação ao longo do tempo, para poderem sobreviver em meios severos. A mutação, nestes casos, ocorre lentamente, passando por várias gerações, sempre mantendo e melhorando as variáveis que influem na sobrevivência.

Analogamente, isto ocorre nos processos químicos, em que é feita a seleção das variáveis de entrada que o influenciam. Sobre estas variáveis são feitas alterações no sentido de melhorar e otimizar o processo.

Os seres vivos, portanto, desenvolvem-se através de dois mecanismos; variabilidade genética e seleção natural, sendo que a seleção natural tem dois componentes essenciais, que são a variação e a seleção das variáveis influentes ou favoráveis. Os processos químicos avançam de forma similar. A descoberta de uma nova rota de manufatura corresponde a uma mutação. Os ajustes feitos nas variáveis de processo para melhores níveis envolvem a seleção natural, em que aquelas condições que influem negativamente são negligenciadas a favor de condições mais favoráveis (BOX e DRAPER, 1998).

2.4 Operação estática e evolutiva

No passado, freqüentemente aceitava-se que em uma operação normal de produção não deveria ocorrer nenhuma variação nas condições de operação padrão; este procedimento de operação é chamado de método de operação estática. Se esse método de operação for rigidamente seguido, impede a possibilidade de um desenvolvimento evolutivo. Os objetivos que a operação estática busca alcançar são essenciais para uma produção bem sucedida (BOX, 1975).

FOX (1968) e KRAMER (1965) relatam que a abordagem de carta de controle é utilizada para apontar para uma situação que está fora de controle quando comparada com uma situação normal, como também, para manter um processo estabilizado dentro dos limites de especificação conhecidos para uma determinada característica de qualidade aceitável do produto, mas não indicam, necessariamente, condições ótimas para circunstâncias particulares. Já o princípio de EVOP é diretamente oposto e complementar a essa abordagem. EVOP busca investigar continuamente as oportunidades de mudanças que poderia resultar em uma melhoria na qualidade do produto ou eficiência do processo. Portanto, o EVOP é um método de otimização que demanda certa flexibilidade na variação dos fatores que influenciam o processo.

Basicamente, a idéia é deixar a agilidade do processo de produção atuar como um laboratório. Diferentemente do laboratório ou planta piloto, não se

espera encontrar grandes efeitos porque o processo de produção não permite fazer grandes mudanças nos valores das variáveis desde que, presumivelmente, já ocorreu algum processo de otimização. Por outro lado, é mais fácil coletar uma grande quantidade de informação, já que, de qualquer modo, o processo está operando. Uma grande quantidade de dados significará variações pequenas para a estimativa dos efeitos, de modo que até mesmo os pequenos efeitos possam ser facilmente detectados (BUYSKE, 1999).

No método EVOP um ciclo cuidadosamente planejado de variações menores é combinado sobre o processo de trabalho. A rotina de operação do processo consiste em seguir cada uma das variações em volta das condições operacionais atuais e repetir continuamente o ciclo; a repetição persistente permite evidenciar os efeitos das variáveis no rendimento, na qualidade e nas propriedades físicas do alimento em torno das condições estáticas do processo. Deste modo, usa-se a rotina de produção não somente para gerar o produto, mas também, para gerar as informações que são necessárias para melhorar o processo de produção (BOX & DRAPER, 1998).

Devido ao dinamismo imposto pela metodologia, as informações devem ser postas de forma convenientemente resumida em um painel e devem ser automaticamente alteradas após o recebimento dos novos resultados operacionais. Portanto, o método EVOP é um método de otimização que demanda certa flexibilidade na variação dos fatores que influenciam o processo.

2.5 Características do método EVOP

SCARRAH (1987) relata que a utilização de algumas técnicas estatísticas simples pode ajudar a evitar perdas econômicas que ocorrerem com a produção de produtos fora de especificação. Com a condução de vários ciclos em cada etapa, os pequenos efeitos virtualmente não detectados no produto durante as fases individuais do experimento podem ser avaliados utilizando técnicas estatísticas. Segundo DEMING & ÖBERG (2000), SAAD (1994); BOX, et al. (1978) outra vantagem da análise estatística é que as interações entre variáveis podem ser facilmente identificadas.

No processo de desenvolvimento de Operação Evolutiva (EVOP) BOX & DRAPER (1998) utiliza o planejamento de experimentos fatorial 2^k para estudar

efeitos de até três fatores simultaneamente. Esses fatores podem ter sido identificados para seleção de variáveis em um experimento conduzido para descobrir que fatores do processo influenciam significativamente a variável resposta. Esse tipo de planejamento fatorial consiste na combinação de todas as variáveis em seus dois níveis. Estes delineamentos freqüentemente são acrescidos de um ponto de referência, normalmente ao centro do delineamento, para formar um delineamento fatorial composto. Recomenda-se selecionar as condições de operação atuais para esse ponto de referência (DEMING & ÖBERG, 2000; SCARRAH, 1997; BOX, et al. 1978). SCARRAH (1997) descreve que as finalidades do ponto de referência são identificar os efeitos de curvatura associados com as variáveis e servir de base para a estimativa do custo do estudo comparando as respostas do processo obtidas do delineamento fatorial com aquelas das condições de operação normais.

Para satisfazer as características de um delineamento fatorial, um experimento é requerido para toda combinação das variáveis do processo em seus dois níveis, geralmente distribuídos acima e abaixo do ponto de referência. Os tratamentos do fatorial correspondem aos vértices do esboço representado na Figura 2, no qual têm-se quatro tratamentos para estudar a influência de duas variáveis (SCARRAH, 1987).

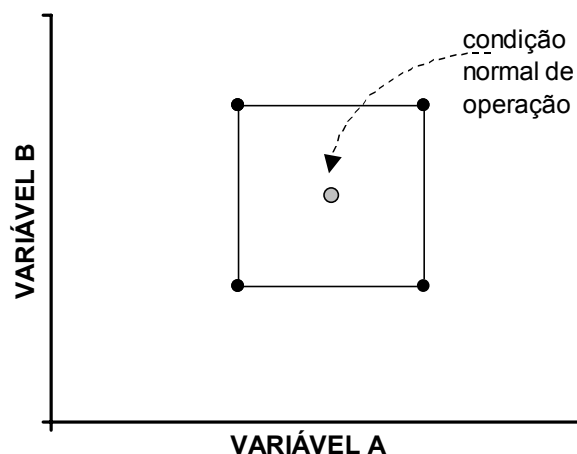


Figura 2: Quatro corridas para investigar a influência de duas variáveis sobre o processo.

O limite prático em considerar no máximo três variáveis é devido à combinação necessária para completar todo o delineamento antes que os dados possam ser analisados e ao fato que o número de experimentos dobra

para cada variável considerada. Os delineamentos fatoriais limitam a flexibilidade experimental, sendo difícil adicionar ou eliminar variáveis. Também, devido às limitações do processo é ocasionalmente impossível operar todas as combinações dos níveis das variáveis requeridos pelo delineamento fatorial (SCARRAH, 1997).

BOX & DRAPER (1998) e SCARRAH (1987) relatam que as informações obtidas sobre as características do processo na vizinhança das condições normais de operação são fornecidas pelo ciclo de experimentos repetido rotineiramente, ou seja, ciclo é definido como um conjunto completo de condições operacionais com variações pré-determinadas que devem ser ensaiadas; sendo que os experimentos repetidos através de um ciclo são definidos como uma fase. Desta forma, após a coleta de grande quantidade de informação, é então possível decidir se a característica de qualidade desejada do produto ou a eficiência do processo pode ser melhorada pela seleção de diferentes níveis das variáveis operacionais com relação aos valores das condições normais de operação. Pode-se a partir daí realizar fases subseqüentes para eventualmente alcançar condições ótimas.

MYERS & MONTEGOMERY (1995) ressaltam que para testar a significância dos efeitos das variáveis do processo e de suas interações é necessária uma estimativa do erro experimental. BOX & DRAPER (1998) sugere que essa estimativa seja calculada a partir dos dados dos experimentos de um ciclo usando um método de variação.

Um aspecto atraente da EVOP é sua abordagem natural, depois que os efeitos das variáveis próximo às condições operacionais atuais forem explorados, pode-se fazer ajustes na direção que promova uma melhoria da eficiência do processo ou da característica de qualidade do produto desejada. Segundo SCARRAH (1987) outro benefício importante da EVOP é que se consegue obter uma melhor compreensão do processo por meio da etapa de preparação para implantar esta metodologia, na qual estabelece-se a meta de melhoria desejada e são identificadas as variáveis operacionais importantes.

De acordo com BOX & DRAPER (1998) e HAHN & DERSHOWITZ (1974) as principais características de processos favoráveis à aplicação de operação evolutiva (EVOP) são: O processo deve ser repetitivo, ou o trabalho de produção deve durar um tempo razoavelmente longo para justificar os esforços de otimização; a Operação Evolutiva deveria ser aplicada em áreas

onde os potenciais benefícios de melhoria do produto são grandes, no entanto, esta não é uma limitação séria, isto porque raramente um processo está sendo operado em condições ótimas; a terceira característica é a capacidade de perturbar facilmente as variáveis do processo; o processo deve estabilizar rapidamente depois de perturbado, já que as futuras condições são determinadas a partir da última execução e é desejável que a variável resposta tenha uma medida rápida.

Embora um processo não satisfaça todos esses critérios é claro que um programa EVOP pode mesmo assim ser iniciado (SCARRAH, 1987).

Para estabelecer um programa EVOP, FOX (1968) considera três pontos fundamentais que a planta industrial deve apresentar. Primeiro, ter um método sistemático e de rotina para introduzir os pequenos ajustes nas variáveis do processo a ser investigado. Segundo, ter um meio efetivo de avaliar o efeito dessas mudanças sobre o produto final; e terceiro, deve suprir as informações obtidas anteriormente aos operadores responsáveis pela produção.

HAHN & DERSHOWITZ (1974) destaca como vantagens da Operação Evolutiva (EVOP) a melhoria do produto, a melhoria da eficiência do processo, o aumento do envolvimento com o desempenho do processo por parte dos operadores. Já SCARRAH (1997) cita como vantagens: aceitação industrial difundida; múltiplas medidas dos efeitos; cálculos simplificados do erro padrão; ausência de efeitos drásticos no produto ou no processo; medidas quantitativas das interações das variáveis e uma estratégia de decisão simples baseada em julgamento. NAKAI (1981) e KRAMER (1965) afirmam que a técnica é vantajosa porque o método pode ser aplicado diretamente na linha de processamento e, portanto, pode ser apropriado para o controle de qualidade on-line, e não somente para pesquisa e desenvolvimento de produtos.

Com relação às desvantagens, HAHN & DERSHOWITZ (1974) aponta os custos de tempo e dinheiro no treinamento de pessoal nas etapas de mudança dos níveis das variáveis e os custos associados com a manutenção e análise de registros e documentos. Esses custos podem ser modestos, mas como na maioria dos investimentos, precedem aos lucros e, considerando sua natureza especulativa, esses lucros infelizmente são sempre incertos.

Pode-se argumentar que por perturbar o processo de suas condições atuais, que podem ser ótimas, tolera-se a possibilidade de incorrer em algumas perdas. No entanto, esse argumento é considerado irreal para a maioria dos

processos, visto que as condições ótimas na maioria dos casos não são as condições operacionais atuais. Essa, na realidade, é a razão para se utilizar EVOP.

2.6 Organização de um programa EVOP

Vários fatores são requeridos para fazer um programa EVOP funcionar; dentre estes, se destacam como pontos principais: o apoio da alta administração; o apoio técnico; a direção do esforço por parte do gerente responsável diretamente pelo desempenho do processo; e a organização e motivação de todos os envolvidos, desde os operadores até a alta administração (GREKEL & CHILDERS, 1973).

Para a utilização eficaz de Operação Evolutiva, seus princípios devem ser entendidos, apreciados e sustentados por pessoas em todos os níveis da empresa. Assim, o suporte ativo da alta administração é fundamental para o sucesso do programa EVOP, uma vez que o mesmo motiva todos os outros setores da empresa.

BOX & DRAPER (1998) sugere o uso de um comitê EVOP e de um quadro de informações. O comitê teria por objetivo auxiliar o engenheiro responsável pelo processo na interpretação dos resultados obtidos e decidir as ações a serem tomadas para alcançar a meta de melhoria. Esse comitê seria composto de especialistas com conhecimentos variados e de diversas áreas da empresa.

Segundo HUNTER & KITTRELL (1966) uma vantagem importante de um programa EVOP bem sucedido é o fluxo contínuo de novas idéias para melhoria; e a existência de tal comitê é essencial para a completa exploração dessas idéias. Desta forma, EVOP atua como um veículo para gerar e avaliar sugestões para melhorar a produtividade do processo industrial.

A metodologia Operação Evolutiva proporciona melhoria natural e automática dos processos, sob um procedimento planejado com linhas bem definidas e de comunicação estabelecida por meio do comitê EVOP, usando recursos já disponíveis e necessitando somente de uma organização para iniciar o programa juntamente com um empenho extra por parte do pessoal de supervisão (BOX & DRAPER, 1998).

O engenheiro responsável pelo processo é a pessoa mais indicada para comandar um programa EVOP, visto que sua experiência na solução de problemas anteriores fornece a credibilidade exigida pelos operadores de produção (SCARRAH, 1987).

2.7 A variabilidade do processo

Uma planta alimentícia tem como característica as variações de processo consideradas como ruído, isto é, variações pequenas devido à variabilidade das matérias-primas; aos desvios dos instrumentos de controle; incapacidade de reproduzir réplicas homogêneas e devido a variáveis que são desconhecidas e fogem ao controle do pesquisador, etc.. Este ruído aumenta com o aumento da variabilidade dos fatores que compõem o processo; sendo que a variação final é a soma de todas as variações individuais. A magnitude da variação é medida por uma quantidade chamada de desvio padrão (σ), que é a raiz quadrada do quadrado médio dos desvios (BOX e DRAPER, 1998).

Em um processo industrial, o valor do desvio padrão depende do grau de controle do processo e varia à medida que a planta se desgasta ao longo do tempo. Estes desvios são chamados de “ruídos”. Se a mudança de um nível de uma variável produz um efeito na resposta do sistema que excede ao nível de ruído, este efeito pode ser explorado e detectado com facilidade, caso contrário ficará encoberto pelo ruído. Para descobrir os efeitos que estão encobertos pelos ruídos, deve-se aumentar o sinal do efeito ou reduzir os ruídos. Em um programa EVOP é aplicado tanto o aumento de sinal quanto a redução dos ruídos. Aumenta-se deliberadamente o sinal do efeito quando se introduz mudança nas variáveis do processo cuidadosamente escolhida. Já o efeito do ruído é reduzido pela repetição dos ciclos calculando-se a média dos resultados (BOX e DRAPER, 1998).

2.8 Planejamento de Experimentos

Os planejamentos experimentais mais utilizados para EVOP, são os planejamentos fatoriais 2^k , com duas ou três variáveis, ou seja, k igual a 2 ou

3. No entanto, é possível trabalhar com qualquer número de variáveis, porém o método perde o fator simplicidade, considerado um dos pontos mais positivos (BOX e DRAPER, 1998).

Planejamentos fatoriais são amplamente utilizados em experimentos em que há vários fatores de interesse. Segundo BOX et al. (1978) os planejamentos fatoriais 2^k são importantes pelas seguintes razões:

- Exigem relativamente poucos experimentos por fator estudado; e embora não permitam explorar plenamente uma ampla região no espaço de fatores, podem indicar as principais tendências e determinar assim uma direção promissora para experimentação posterior;
- Quando se deseja uma exploração local mais profunda, podem ser convenientemente ampliados de modo a formar os planejamentos compostos;
- Constituem a base dos planejamentos fatoriais fracionados com 2 níveis. Tais planejamentos são muito úteis nos estágios iniciais de uma pesquisa, quando é conveniente conduzir experimentos preliminares para observar detalhadamente um pequeno número de fatores;
- Esses planejamentos e os fracionados correspondentes podem ser usados como blocos de construção de modo que o planejamento final possa atender à sofisticação do problema;
- A interpretação das observações produzidas pelos planejamentos pode ser feita usando bom senso e matemática elementar. Claro que os pacotes estatísticos facilitam consideravelmente essa tarefa, principalmente quando o número de fatores é grande.

2.8.1 Esquema EVOP para duas variáveis (fatorial 2^2)

No planejamento fatorial 2^2 estuda-se o efeito de duas variáveis, cada uma em dois níveis. Uma ou outra variável pode ser quantitativa ou qualitativa. A Figura 3 mostra os quatro tratamentos experimentais que caracterizam um planejamento fatorial 2^2 para os fatores (variáveis) A e B.

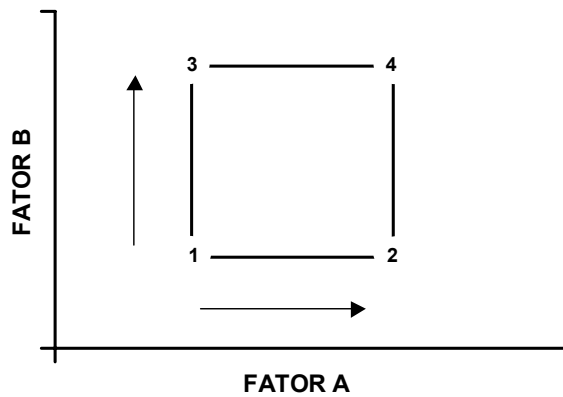


Figura 3: Um planejamento fatorial em duas variáveis (fatores) A e B.

Efeito principal de um fator

O efeito de um fator (A) pode ser definido como a mudança sofrida pela variável resposta quando passamos do nível baixo (-) de A para o nível alto (+) de A, como mostrado na Figura 4. Desta forma, o efeito principal de um fator A pode ser definido como a média dos efeitos do fator A, obtidos para os dois níveis do fator B.

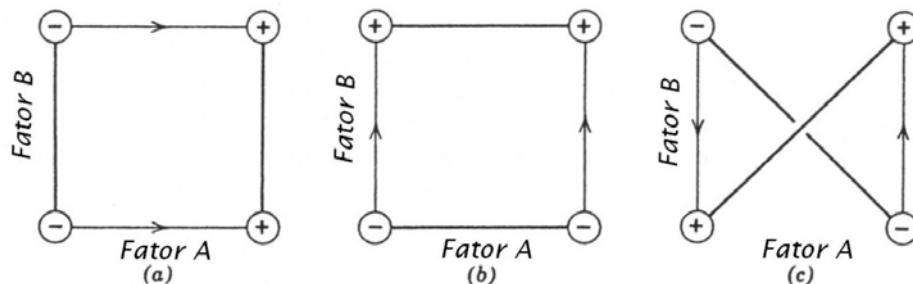


Figura 4: Representação dos efeitos para um experimento fatorial 2^2 : (a) Efeito do fator A; (b) Efeito do fator B; (c) Efeito da interação entre os fatores A e B. FONTE: BOX e DRAPER, 1998.

Com base na Figura 3, o efeito principal de A pode ser calculado do seguinte modo:

Efeito principal de A = $\frac{1}{2}(\bar{y}_4 + \bar{y}_2) - \frac{1}{2}(\bar{y}_3 + \bar{y}_1)$; em que y_i é a média dos resultados da variável resposta obtidos para o tratamento i, representado na Figura 3.

Similarmente, para o efeito principal do fator B:

$$\text{Efeito principal de B} = \frac{1}{2}(\bar{y}_4 + \bar{y}_3) - \frac{1}{2}(\bar{y}_2 + \bar{y}_1)$$

Efeito da interação entre dois fatores

Se o comportamento de um fator não é o mesmo nos dois níveis do outro fator, é dito que existe interação entre os fatores. Neste caso, a definição de efeito principal apresentada na seção anterior não tem sentido prático.

A interação entre dois fatores é definida como a metade da diferença entre os efeitos de um fator nos dois níveis do outro fator. Deste modo, a medida da interação AB entre a variável A e a variável B, é:

$$\text{Efeito da interação AB} = \frac{1}{2}(\bar{y}_4 + \bar{y}_1) - \frac{1}{2}(\bar{y}_2 + \bar{y}_3)$$

2.8.2 Condição de Referência

Tal como ocorre em um programa EVOP, existirá em cada fase, o que pode ser chamado de melhores condições atuais. No início do programa essas condições serão as especificações de operação do processo, mas a medida que as melhorias são incorporadas, as condições atuais serão modificadas. Potencialmente, cada nova fase pode estabelecer um novo conjunto de condições atuais. Quando uma nova fase é iniciada, é geralmente útil poder comparar os resultados diretamente com uma referência apropriada.

Quando as condições atuais de operação são incluídas em cada ciclo como uma referência (como um ponto adicional ou como um dos pontos do planejamento fatorial, ver Figura 5), esta referência é utilizada para comparar o desempenho médio alcançado durante os ensaios do planejamento EVOP com o desempenho que teria sido obtido se todos os ensaios tivessem sido feitos nas condições de referência.

Não importa onde o ponto de referência está localizado, como mostrado na Figura 5; uma comparação semelhante é sempre fornecida pelo contraste entre a resposta média de todos os ensaios no ciclo EVOP e a resposta média

nas condições de referência. Este contraste é chamado de efeito de “mudança na média”.

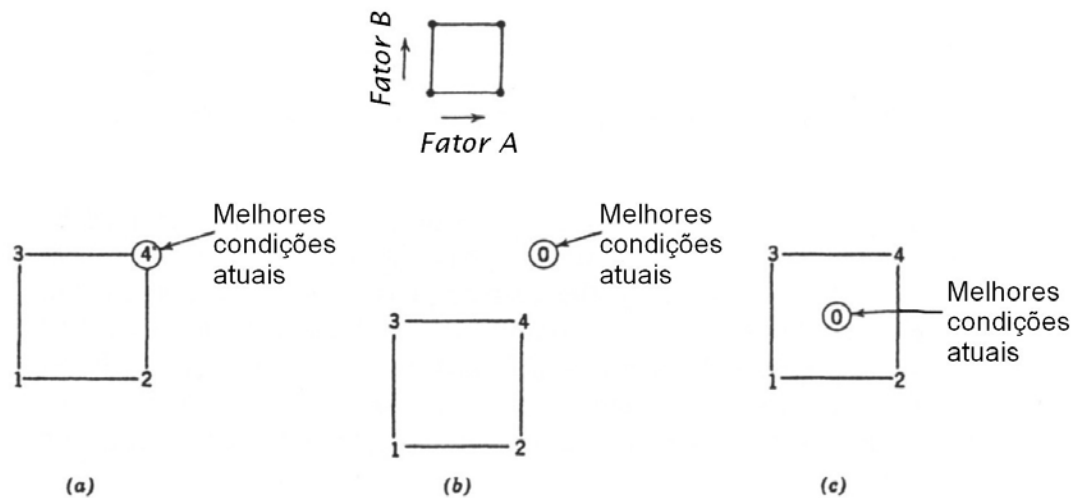


Figura 5: Um planejamento fatorial em relação às condições atuais de operação. FONTE: BOX e DRAPER, 1998.

Desta forma, baseado na numeração dos ensaios do planejamento fatorial mostrado na Figura 5, tem-se que o arranjo (a),

$$\text{Efeito da mudança na média} = \frac{1}{4}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4) - \bar{y}_4$$

Para os arranjos (b) e (c);

$$\text{Efeito da mudança na média} = \frac{1}{5}(\bar{y}_1 + \bar{y}_2 + \bar{y}_3 + \bar{y}_4 + \bar{y}_0) - \bar{y}_0$$

Portanto, o efeito de mudança na média é a diferença entre a média da fase menos a média nas condições de referência. Constitui assim, um sinal de curvatura conforme a Figura 6. É utilizado em conjunto com os efeitos, para indicar quando um máximo (ou mínimo) tiver sido alcançado e assim para indicar a sensibilidade da resposta às mudanças nos fatores independentes JURAN e GRZYNA (1988).

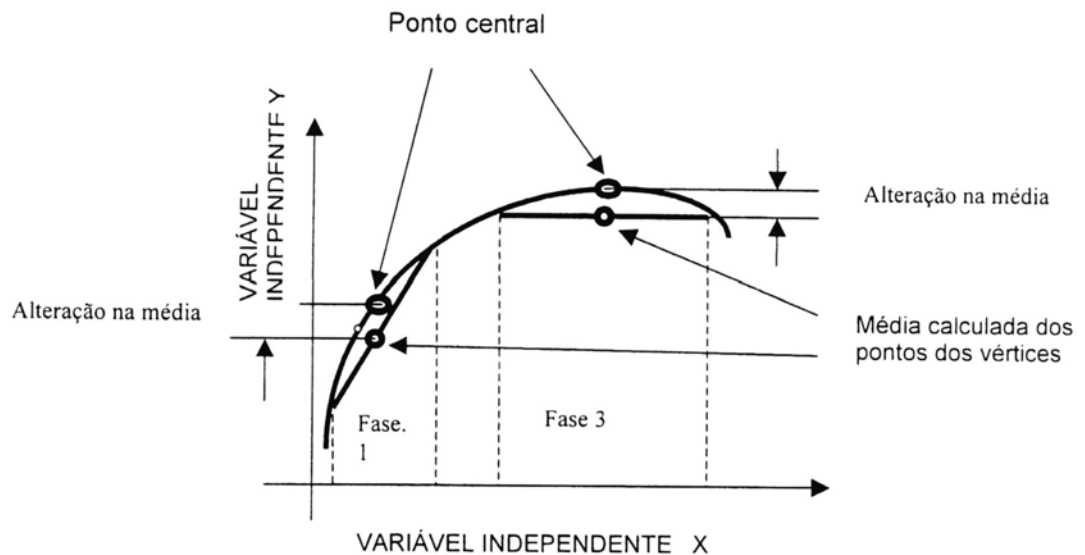


Figura 6: Seção Transversal de uma superfície de resposta. Mudança na média indica curvatura. FONTE: JURAN e GRZYNA (1988)

Segundo BOX e DRAPER (1998) a mudança na média é a medida direta do custo incorrido para obter as informações em uma fase particular. Esta medida diz se o resultado das condições de operação durante a fase dá um resultado melhor ou pior do que o resultado das condições de referência, por isso a mudança na média dá uma indicação direta desse custo. Em casos raros, pode ocorrer que a primeira fase esteja localizada simetricamente em torno do máximo com relação aos dois fatores independentes escolhidos. Nesse caso, os fatores devem ser não significativos, mas a mudança na média pode ser significativa.

2.8.3 A medida do erro padrão de média

No programa EVOP, a medida do erro é usualmente o intervalo de confiança da média dos ensaios individuais e é dado por duas vezes o erro padrão de média, o que abrange 95% da área de confiança, desde que a distribuição de probabilidade do erro experimental siga uma distribuição normal. O Quadro 1 indica as variâncias e os erros padrões de média para experimentos fatoriais em dois níveis com p variáveis e n ciclos. O erro padrão para cada efeito é obtido tomando-se a raiz quadrada da variância e substituindo o desvio padrão σ pelo desvio padrão estimado s .

Quadro 1: Variâncias e erros padrões de média estimados para os efeitos e interações para experimentos fatoriais do tipo 2^p ao final de n ciclos. Fonte: BOX e DRAPER (1998).

Experimento	2^p	2^2	2^3
Variância	$\frac{4\sigma^2}{n2^p}$	$\frac{\sigma^2}{n}$	$\frac{\sigma^2}{2n}$
Erro padrão de média (E.P)	$\frac{2s}{\sqrt{n2^p}}$	$\frac{s}{\sqrt{n}}$	$\frac{s}{\sqrt{2n}}$

2.8.4 Exemplo de um esquema EVOP

Para ilustrar, será utilizado um estudo desenvolvido por JENKINS (1969) e apresentado por BOX et al. (1978), em que foi investigado o efeito de duas variáveis, a razão de refluxo da torre de destilação e a relação entre o fluxo de reciclo e o fluxo de purga. A variável resposta em questão foi o custo médio por tonelada. O planejamento utilizado foi um fatorial 2^2 com um ponto central. Três fases do programa EVOP são mostradas na Figura 7.

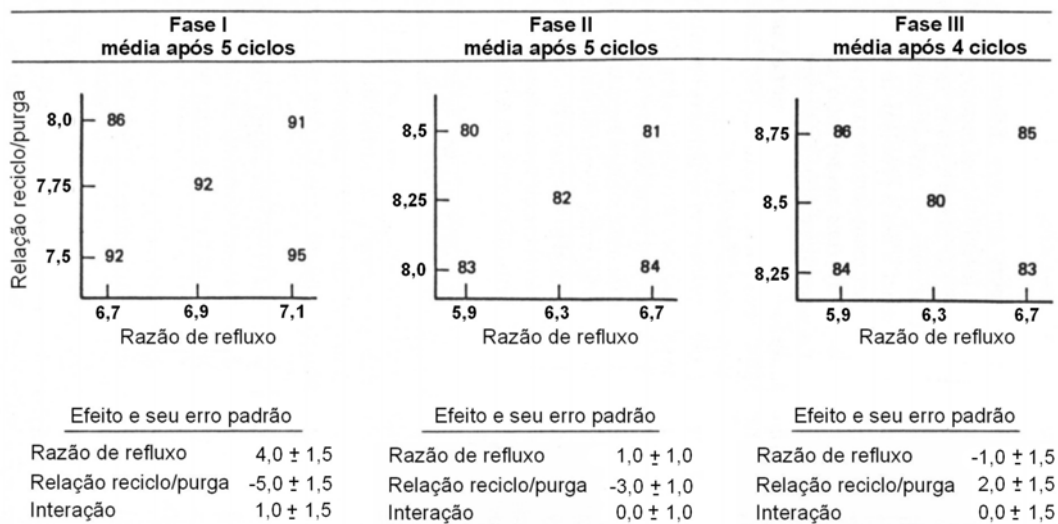


Figura 7: Informações obtidas de uma planta petroquímica de um programa EVOP, com duas variáveis ao final das fases I, II e III com objetivo de redução de custo por tonelada. FONTE: BOX, HUNTER e HUNTER (1978).

Na fase I podem ser visto quatro pontos nos vértices do quadrado, em que os valores indicam os resultados médios do custo por tonelada após os ensaios dos cinco ciclos, os valores são 92, 86, 91 e 95 para os vértices e 92

para o ponto central. As condições utilizadas para cada ponto estão indicadas na abscissa e na ordenada, razão de refluxo e a relação fluxo de reciclo/fluxo de purga, respectivamente.

As condições da fase II, foram obtidas utilizando-se como um dos pontos o ponto ótimo obtido na fase I, isto é, nas condições 6,7 e 8,0 para razão de refluxo e a relação fluxo de reciclo/ fluxo de purga; respectivamente. Contudo, na fase II a média do resultado do ponto foi de 84, o que é normal, devido a variação de outros parâmetros do processo ou devido ao ruído do processo.

Nos resultados da primeira fase, há uma indicação dos efeitos de cada variável do processo e os erros padrões de média. O efeito da variável razão de refluxo ($4,0 \pm 1,5$) indica que esta variável tem grande influência no resultado de custo, pois comparado com o valor de duas vezes o erro padrão, o valor é estatisticamente significativo. Como o sinal do efeito é positivo, indica que a redução do custo por tonelada ocorre com a redução do valor da variável razão de refluxo da torre de destilação. Já para o efeito da variável relação reciclo/purga ($-5,0 \pm 1,5$), o valor negativo indica que o custo diminui quando ocorre o aumento do valor da relação reciclo/purga. Com relação ao efeito da interação das variáveis ($1,0 \pm 1,5$), indica que o efeito não é significativo, visto que está contido no intervalo de confiança dos dois erros padrão. Após a análise dos resultados da fase I, ficou decidido que já havia evidência suficiente para justificar a alteração da razão de refluxo para um valor menor e a relação reciclo/purga para um valor maior, iniciando desta forma uma segunda fase no programa EVOP.

Os resultados apresentados na fase II sugerem que novamente é possível reduzir os custos aumentando o valor da relação reciclo/purga e mantendo o valor da razão de refluxo, visto que na avaliação dos efeitos, a variável razão de refluxo não tem efeito significativo na redução do custo por tonelada, indicando a direção para uma nova fase do programa EVOP. Com os resultados da fase III, a conclusão é que o menor custo (£80) foi obtido com o valor da razão de refluxo da torre de destilação de 6,3 e o valor da relação entre fluxo de reciclo e o fluxo de purga de 8,5. O programa durou 4,5 meses com um custo de £6.000, e a economia resultante devido a redução do custo por tonelada foi um total de £100.000 anuais.

3. APLICAÇÃO DO MÉTODO EVOP NO PROCESSO DE SECAGEM DE LEITE

3.1 Introdução

O método de tentativa e erro é o modo tradicional para melhorar um produto ou um processo; que consiste de mudar uma variável de cada vez e observar os resultados, sendo uma abordagem simples e comum, e tem o mérito de, normalmente, ocorrer na planta sem interferir com a produção. O procedimento pode ser demorado e freqüentemente não produz resultados satisfatórios. O uso de métodos estatísticos para planejamento de experimentos oferece uma nova abordagem mas introduz problemas intrínsecos; o planejamento de experimento baseado em estatística freqüentemente requer interrupção da operação normal e mudanças nas condições operacionais. Também requer pessoal com um conhecimento de estatística como também conhecimento técnico. Através do uso de controle estatístico de qualidade, a indústria de alimentos tem sido capaz de obter produtos de excelente qualidade e com alto grau de uniformidade. Para este propósito a carta de controle (\bar{X}) é facilmente usada. No entanto, surge um problema, como melhorar continuamente um produto ou processo até um ótimo ser alcançado, isto é, como promover a otimização de produto ou processo em escala industrial (JONES, 1982).

BOX (1957) e BOX e DRAPER (1998) desenvolveram uma metodologia para otimizar um processo durante a rotina de controle de qualidade por meio do método de operações evolutivas (EVOP), combinando métodos estatísticos simples e eficazes com realimentação (“*feedback*”) como uma abordagem para solução de problemas. Esta é a metodologia “*Evolutionary Operation*” (EVOP) em que cada período, batelada ou ciclo de produção deverá contribuir com informação relativo ao efeito de uma, duas ou três variáveis do processo sobre o rendimento ou propriedades de interesse do produto. Deste modo, EVOP pode ser empregado sobre a linha de produção sem interrupção no período de produção.

A indústria de alimentos tem exemplos da aplicação bem sucedida de EVOP. SAMUEL (1962), citado por HUNTER & KITTRELL (1966), relata aplicações do método EVOP em unidades de salga e defumação de carne e

em fábricas de extração de óleo vegetal. MOGENSEN (1983) utilizou o método EVOP para determinar a condição ótima de temperatura e pH para uma cultura inicial (“starter”) na produção de manteiga. EVOP foi usado por MUNETA et al. (1977) para obter condições ótimas para o descascamento de batatas com hidróxido de potássio. KOCK (1982) utilizou EVOP para melhorar a cor e o sabor de rodela de abacaxi em conserva. REMMERS e DUNN (1961) discutem o uso e aplicação de EVOP para aumentar a produtividade de processos de fermentação. BANERJEE e BHATTACHARYYA (1993) e BANERJEE et al. (1999) descrevem a aplicação de EVOP no estudo da função metabólica na síntese de uma enzima por microorganismos. Apesar de ser um método bastante conhecido, no Brasil não existem relatos da aplicação desta ferramenta para melhoria de processos alimentícios, principalmente nas pequenas e médias empresas.

O sistema de secagem de leite

O leite é extremamente perecível, portanto por várias razões é desejável preservá-lo para consumo posterior. A secagem é um dos métodos mais importantes de conservação. A vantagem é que com as técnicas modernas de secagem é possível produzir leite em pó sem nenhuma perda do valor nutritivo comparado ao leite fresco. A desvantagem é que o processo de secagem tem um alto consumo de energia, é o processo da indústria de alimentos que tem a maior demanda de energia por tonelada de produto final. Isto é devido ao fato do leite ter em sua composição, aproximadamente, 90% de água, e toda a água tem que ser removida por evaporação usando calor (KNIPSCHILDT e ANDERSEN, 1994).

Com técnicas modernas de concentração por membrana é possível remover certa quantidade da água mecanicamente, sem a utilização do calor. No entanto, estes métodos têm limitações, não sendo facilmente usados na prática. Por outro lado, o aumento acentuado no custo da energia estimulou o desenvolvimento de equipamentos e de processos que tornou possível produzir leite em pó com um consumo de energia por tonelada de produto final aproximadamente metade do que era necessário a alguns anos atrás (KNIPSCHILDT e ANDERSEN, 1994).

Na década de 30, o processo de secagem de leite por atomização, “spray dryer”, começou a ganhar importância, mas os maiores avanços em desenvolvimento tiveram destaque somente após a segunda guerra mundial. Nos últimos 30 anos, vários centros de pesquisa têm direcionado atenção para a produção de leite e soro de leite em pó, dada a importância crescente destes produtos. A secagem de leite tornou-se parte essencial da extensa cadeia agroindustrial do leite, entre o produtor e o consumidor final. A indústria de leite em pó passou a ter importância internacional considerável. Através da indústria de leite em pó é possível tornar o leite disponível em regiões que são desfavoráveis a implantação de laticínios ou em lugares que a produção de leite é insuficiente; também é possível abastecer os mercados durante todo o ano (KNIPSCHILDT e ANDERSEN, 1994).

O processamento de leite em pó tem como pré-requisito obvio a remoção de água do leite. Esta remoção de água é realizada em duas etapas, a primeira etapa é a concentração e a segunda é a secagem.

As tecnologias atuais permitem basicamente três abordagens para promover a concentração do leite: Evaporação; Osmose reversa e Ultrafiltração. Os processos mecânicos de separação, como osmose reversa, ultrafiltração, centrifugação, etc.; são em grande parte mais eficiente energeticamente do que os processos térmicos. No entanto, quando separação mecânica não é possível, a evaporação deve ser considerada. Embora a evaporação seja um processo térmico, a eficiência térmica da remoção de água é muitas vezes maior que a de um secador. Em um grande sistema, é possível evaporar 7 ou 8 unidades de massa de água para 1 unidade de massa de vapor. A evaporação com recompressão mecânica pode ter uma maior eficiência de energia (APV, 2000b).

A qualidade do leite em pó depende muito da qualidade da matéria-prima, uma vez que a tecnologia de produção pode ser facilmente replicada em equipamentos automáticos, controlado por meio de computadores. No entanto, as variáveis do processo de secagem são muito sensíveis a pequenas variações, principalmente na manutenção dos padrões de qualidade do produto ao longo do período de produção. Por exemplo, a variação da umidade relativa do ar, durante o período de produção, influencia o teor de umidade do produto final (PINHEIRO, [199?]).

A operação unitária de secagem consiste na remoção da água do produto a níveis que garantem sua conservação. A secagem, quando mal conduzida, reduz a qualidade do produto, durante o processo e acelera a sua alteração durante o armazenamento, principalmente, quando se tratam de produtos contaminados com metais, microrganismos, etc. (APV, 2000a).

3.2 O Processo

O processo alimentício em que se baseia este estudo é o de produção de leite em pó por meio de evaporação térmica e secagem por atomização. Neste tópico serão abordados a matéria-prima do processo, o mercado e o sistema de secagem de leite.

3.2.1 Definição do leite

Tecnicamente, o leite pode ser definido como “o produto obtido da ordenha completa e ininterrupta em condições de higiene, de vacas leiteiras sãs, bem alimentadas e em repouso. O leite de outros animais deve denominar-se segundo a espécie da qual proceda”. Já o leite em pó, é definido como “o produto obtido por desidratação do leite de vaca integral, desnatado ou parcialmente desnatado e apto para a alimentação humana, mediante processos tecnologicamente adequados” (BRASIL, 1996). As características físico-químicas do leite em pó são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2: Padrões de identidade e qualidade para características físico-químicas do leite em pó. FONTE: BRASIL (1996).

REQUISITOS	INTEGRAL	PARCIALMENTE DESNATADO	DESNATADO
Matéria Gorda (% m/m)	Maior ou igual a 26,0	1,5 a 25,9	Menor que 1,5
Umidade (% m/m)	Máx. 3,5	Máx. 4,0	Máx. 4,0
Acidez titulável (ml NaOH 0,1 N/10g sólidos não gordurosos)	Máx. 18,0	Máx. 18,0	Máx. 18,0
Índice de solubilidade (ml)	Máx. 1,0	Máx. 1,0	Máx. 1,0
Leite de alto tratamento térmico			Máx. 2,0
Partículas queimadas (máx.)	Disco B	Disco B	Disco B

3.2.2 Mercado e os aspectos econômicos

A abertura do mercado brasileiro, seguido pela desregulamentação dos mercados agropecuários no início da década 90, trouxe novos padrões de concorrência à realidade agrícola brasileira. No caso particular da agroindústria do leite, houve considerável aumento no consumo *per capita* por ocasião do plano real, aliado à forte valorização cambial ocorrida, promoveram mudanças no ambiente competitivo. Como consequência, no mercado de lácteos, foi verificado forte crescimento das importações brasileiras de derivados lácteos. No caso específico do leite em pó, produto que responde, em média, por 60 a 80% do total das importações de lácteos. A Figura 8 mostra um aumento, até o ano de 1999, das importações de leite em pó. Nos anos seguintes as importações reduziram-se bastante, principalmente no ano de 2000, devido à imposição de direitos antidumping nos produtos lácteos importados. Como consequência, os lácteos estrangeiros tornaram-se mais caros, diminuindo as importações em praticamente 50% em relação ao ano de 2000 (BARROS et al., 2001).

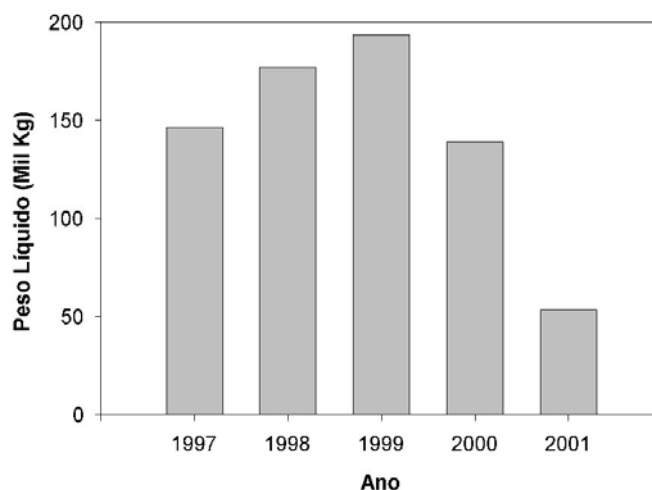


Figura 8: Evolução das importações de leite em pó.

Fonte: SistemaAlice; Elaboração: CNA/Decon

O Brasil tem um grande mercado potencial para produtos lácteos e condições favoráveis para produzir leite suficiente para suprir a demanda interna e gerar excedentes exportáveis. O setor de laticínios tem se ajustado rapidamente às transformações na economia, por meio da utilização de novas tecnologias e a ampliação da fronteira agrícola em direção a regiões de maior

potencial produtivo e menor custo de produção. Como resultado, a produção de leite no Brasil vem crescendo a taxas acima da média, a partir do ano de 1994 (VILELA et al., 1998). Com aproximadamente 20 bilhões de litros de leite por ano, o Brasil ocupa o quinto lugar na produção mundial de leite, liderada pela União Européia. Veja, no Quadro 3 a seguir, a situação do leite no mundo (TERRA VIVA, 2002).

Quadro 3: Situação do leite no mundo, em valores aproximados.
 FONTE: LEITE BRASIL, citado por Terra Viva (2002).

Região	Pecuarista (em mil)	Produção anual (bilhões de litros)	Média por produtor (1000 litros/ano)
União Européia	625	120,5	146,0
EUA	97	70,3	724,4
Índia	-	36,0	-
Rússia	-	33,0	-
Brasil	800	20,0	25,1
Nova Zelândia	15	11,0	733,3
Argentina	22	9,0	409,0
Austrália	14	8,4	600,0

Na última década, uma mudança importante na indústria de laticínios foi a crescente concentração industrial, tendência similar a que se verificou em todo o setor industrial brasileiro. A busca de novos mercados leva a indústria a ampliar o leque de derivados e, por conseqüência, a concentração industrial (VILELA et al., 1998).

Ainda segundo VILELA et al. (1998), na indústria os problemas identificados são: falta de exigência de certificados de origem e de qualidade dos produtos lácteos; pouca automação e informatização dos processos; altos custos de transporte e armazenamento; falta de marketing institucional dos produtos lácteos; pouca ênfase em processos de reaproveitamento de produtos; reduzido investimento em desenvolvimento de microorganismos de interesse industrial e reduzida vida útil dos produtos.

Segundo WILKINSON (1993) os indícios de modernização das relações de trabalho a nível industrial são difíceis de avaliar. A aplicação de técnicas organizacionais, inclusive nos segmentos mais modernos, limita-se a uma modesta aplicação de "just in time" externo e ao controle estatístico do processo produtivo. Os dados de controle e garantia de qualidade colhida das

entrevistas não permitem discriminar novas modalidades das tradicionais necessidades de controle típicas da indústria de laticínios. Os dados apontam para a importância de treinamento, inclusive na área de produção, mas não permitem uma discriminação mais específica ou por categoria de trabalhador ou por segmento da indústria.

O segmento de leite em pó é estratégico não apenas pela importância do mercado final, mas pelo papel do leite em pó como forma de estocagem de leite e como insumo re-hidratado de leite fluido.

3.2.3 Sistema de Secagem¹

O sistema de secagem de leite mais utilizado em escala industrial envolve a concentração do leite por meio da evaporação a pressão reduzida e a secagem por meio de secadores atomizadores ou pulverizadores (“spray dryer”), em que a remoção da água ocorre pela aplicação do calor a temperaturas acima da temperatura ambiente.

3.2.3.1 Concentração

Ao longo dos anos, vários modelos de evaporadores foram desenvolvidos, no entanto, na área de laticínios, os mais recentes e eficientes modelos são os evaporadores a placas e de filmes descendentes e ascendentes.

Durante os últimos 20 anos, a capacidade para muitas aplicações na indústria de laticínios ficou extremamente grande. O evaporador a placa, que foi planejado principalmente para funções higiênicas, tem uma capacidade máxima de cerca de 27.000 Kg/h e oferece a vantagem de variar facilmente a superfície de aquecimento adicionando ou removendo algumas placas. Esta flexibilidade torna a planta mais versátil e capaz de processar uma grande variedade de produtos. Muitas aplicações na indústria de laticínios excedem este limite, e portanto é necessário usar evaporadores tubulares.

Para satisfazer as necessidades de processamento destas grandes indústrias de alimentos e, em especial de laticínios, o projeto e fabricação de

¹ O texto apresentado nesta seção foi baseado nas seguintes referências bibliográficas: KNIPSCHILD e ANDERSEN (1994); FOUST et al. (1982); APV(a)(2000) e APV(b)(2000).

evaporadores tubulares foram conduzidos em conformidade com os padrões legais estabelecidos por vários grupos reguladores oficiais para operações sanitárias.

O sistema de um evaporador tubular consiste principalmente dos seguintes componentes:

- Um pacote de tubos de aquecimento vertical que é alojado dentro de uma camisa a vapor ou calandra isolada; atuando como um trocador de calor.
- Um dispositivo de distribuição que permite um fluxo de líquido uniforme sobre a circunferência do tubo, impedindo portanto, a formação de manchas secas sobre a superfície de transferência de calor.
- Um separador para extrair eficientemente gotículas líquidas do fluxo de vapor, ou seja, separar o vapor e o concentrado e assim minimizar o transporte do produto.
- Um condensador para o vapor;
- Equipamento para redução de pressão e remoção do condensado.

A estes são adicionados tanques de alimentação, pré-aquecedores, tubulações CIP e para o produto, e bombas necessárias.

O processo de concentração do leite a baixas temperaturas por meio da evaporação a vácuo é baseado na lei física de que o ponto de ebulição de um líquido diminui quando o líquido é exposto a um ambiente de pressão mais baixa que a pressão ambiente. Na evaporação a vácuo, o leite é levado a ebulição à baixa temperatura em um equipamento com pressão reduzida. A temperatura de ebulição máxima admitida em um evaporador moderno é aproximadamente 70°C.

O evaporador é a parte mais importante do sistema de secagem, com relação a qualidade do concentrado e a eficiência de operação.

Outras vantagens do evaporador de filme descendente são a construção simples, o baixo nível de perdas térmicas e a alta eficiência de operação. A Figura 9 mostra as partes que compõem um evaporador tubular de filme descendente.

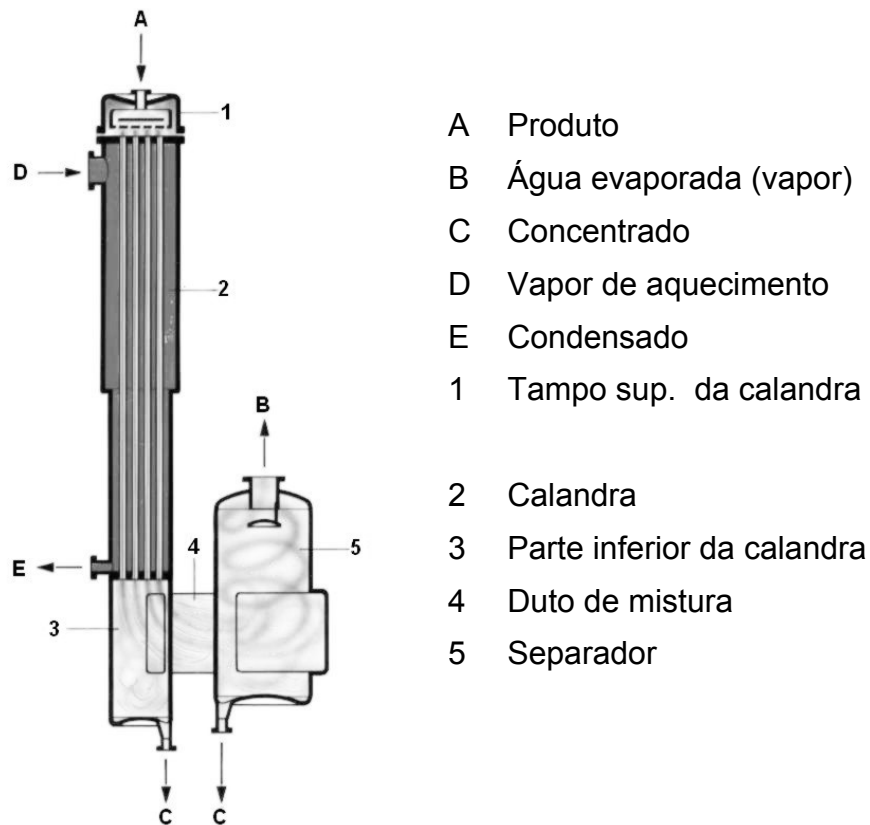


Figura 9: Evaporador tubular de filme ou película descendente

3.2.3.2 Secagem

Atualmente, há secadores em operação na maioria das indústrias de processo, inclusive química, farmacêutica, e de alimentos. Na área de alimentos, há uma gama de produtos que são secados, como pigmentos orgânicos, proteínas, leite, soro, frutas, etc.. Por causa deste espectro de utilização, há uma grande variedade de secadores disponível no mercado. A escolha correta depende das propriedades do alimento e das características desejadas para o produto final.

Em todo alimento e processo industrial, há várias exigências para a secagem térmica. Algumas envolvem a remoção de água e outros compostos voláteis de materiais pastosos como pigmentos, borrachas sintéticas e substâncias químicas finas. Outras envolvem a secagem de soluções ou suspensões líquidas como leite, soro e café.

O processo de secagem pode ser visto como uma continuação da etapa de concentração, com o objetivo de obter um produto estável, com baixo teor

de umidade, com o mínimo de alterações sensoriais e com atributos funcionais apropriados para o uso final do produto.

Fundamentalmente, a secagem por atomização ou pulverização é um processo simples. Entretanto, o projeto de uma planta de secagem por atomização eficiente requer consideráveis habilidades junto com acesso a instalações para realização de teste em grande escala; particularmente onde as exigências do tamanho da partícula e a densidade no produto seco são críticas. A avaliação de secadores atomizadores a partir de uma base puramente térmica é uma questão comparativamente simples, uma vez que, de forma abrangente, a evaporação é unicamente uma função da diferença de temperatura através do secador. Testes em equipamentos de escala piloto não são suficientes diante de certos parâmetros como a predição do tamanho e da densidade das partículas.

Secadores pulverizadores produzem pó com taxas variando desde unidades em escala piloto até unidades industriais com produção de 25 ton/h. Ao contrário dos secadores a tambor, que produzem flocos e estão limitadas as baixas ou moderadas escala de produção. Outra vantagem do secador atomizador está na curta exposição do produto aos gases quentes, ao mesmo tempo em que a evaporação da água das gotículas mantém baixa a temperatura do produto, na presença de ar com temperatura muito elevada. Em virtude da extensa faixa de utilização e da forma conveniente do produto, os secadores pulverizadores são usados com uma variedade enorme de produtos alimentícios, tais como leite, soro, café, corantes, amidos, enzimas, isolados protéicos, etc.. A secagem de leite por atomização implica na mistura, em uma câmara de secagem, de leite concentrado pulverizado em gotículas com diâmetro menor que $300\mu\text{m}$, com ar quente a uma temperatura entre 150 e 220°C . O ar tem a função de fornecer calor para a evaporação da água e, além disso, atua como carreador para o vapor e para o leite em pó. Os secadores pulverizadores são relativamente grandes e podem ser pouco eficientes na utilização da energia. A energia requerida por quilograma de água evaporada na secagem por atomização é de 16 a 20 vezes a energia requerida por quilograma de água removida no evaporador a pressão reduzida.

A Figura 10 mostra uma instalação típica de um secador atomizador; em que o ar é injetado através de um filtro e de um aquecedor, penetrando pelo topo da câmara de secagem, fluindo em corrente paralela com as gotículas a

serem secas, que são formadas por meio de um bocal atomizador ou em um atomizador de disco giratório. À medida que as gotículas atomizadas caem, a umidade da gotícula evapora no ar quente. As partículas de pó maiores caem até o fundo da câmara, as menores são arrastadas pelo gás até os ciclones separadores. A câmara de secagem pode operar em contracorrente com o fluxo de ar e o fluxo do produto, ou ter uma configuração mista de fluxos. O sistema de coleta do produto usa geralmente um ciclone coletor.

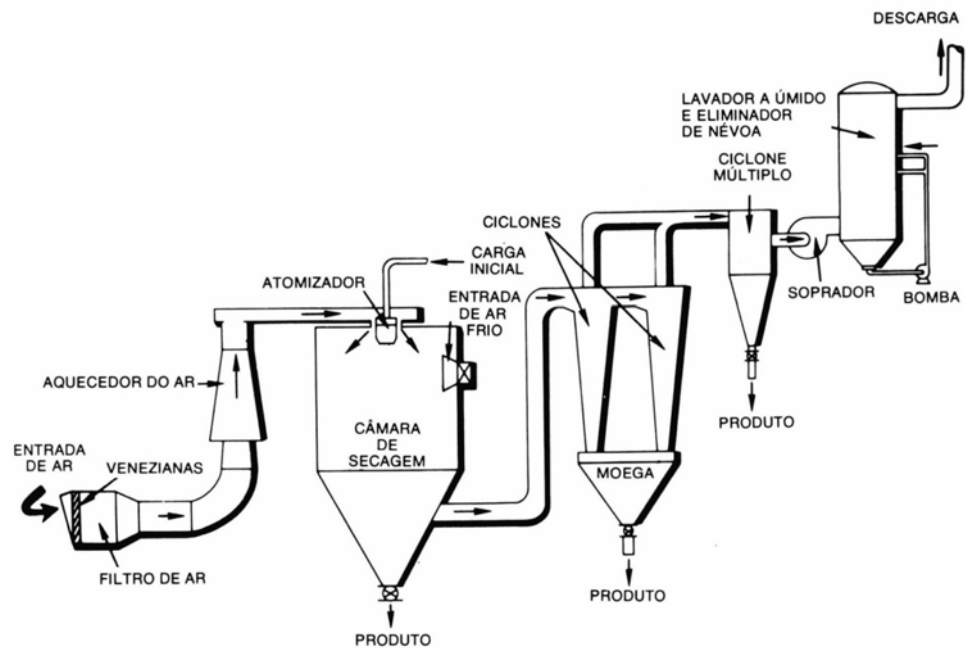


Figura 10: Fluxograma de um típico sistema de secagem por atomização.
 FONTE: FOUST et al., 1982.

Qualquer sistema de secagem por atomização é composto pelas seguintes partes principais: sistema injetor de produto a ser seco e o atomizador, sistema de produção e de injeção de ar quente, câmara de secagem, sistema de separação sólido-ar e sistema de descarga do produto. O projeto de cada sistema em particular depende do produto a ser secado e é influenciado pelos projetos das outras partes da unidade. Assim, a forma final do secador pulverizador pode variar bastante de produto para produto e mesmo de instalação para instalação do mesmo produto.

Os modelos iniciais de secadores por atomização foram desenvolvidos para secagem em único estágio, em que toda a umidade é removida na câmara de secagem principal. Tais modelos, agora obsoletos, foram substituídos por secadores de 2 e 3 estágios, nos quais o processo é concluído

em secadores de leito fluidizado. Estes secadores possuem vantagens consideráveis em termos do consumo de energia, da melhoria das propriedades do pó e, também no aumento da flexibilidade com relação ao tipo de produto a ser desidratado. Em um típico secador com 3 estágios, o teor de umidade do pó que deixa a câmara de secagem (1º estágio) é de 10-15%, sendo reduzida para 5-6% na primeira seção do secador de leito fluidizado (2º estágio) e reduzida para o teor de umidade desejado no produto final na segunda seção do secador de leito fluidizado (3º estágio).

Os secadores de leito fluidizado consistem de um leito de produto apoiado em um prato de apoio poroso pelo qual o ar é soprado. O leito pode ser estacionário ou vibratório. A velocidade do ar é controlada entre a velocidade necessária para espalhar a camada de produto e a velocidade com a qual partículas individuais ficam suspensas, ou sejam, flutuam. Os tempos de secagem e de resfriamento são influenciados pelo diâmetro das partículas; pela largura do leito e pelas condições do ar.

A capacidade evaporativa de um secador por atomização é determinada pela diferença entre a temperatura do ar de entrada e a temperatura do ar de saída. Além disso, a perda de calor e a umidade do ar ambiente afetam a capacidade do secador. O tempo de secagem de um produto vai depender da temperatura, da umidade e das condições de escoamento do ar de secagem, das dimensões das gotículas produzidas pelo atomizador e das propriedades da matéria-prima a ser processada. Da mesma forma, as propriedades do produto final dependerão desses mesmos fatores.

A seguir são feitas algumas considerações sobre algumas partes e variáveis do processo de secagem por atomização (“spray dryer”)

Atomização

A atomização do alimento é de fundamental importância para uma secagem eficiente. Este é o processo que transforma um alimento líquido em pequenas gotículas imediatamente antes da secagem. O tamanho das partículas formadas controla o tamanho das partículas de pó que saem de um secador por atomização de único estágio. Os dois principais meios de atomização são centrífugos e bocais de pressão, cada um tem suas vantagens e desvantagens e a escolha é dependente do alimento, das propriedades do pó e da aplicação específica. Três dispositivos básicos de atomização são usados

extensivamente: os bicos ou bocais injetores a dois fluidos; bicos injetores a um só fluido e os atomizadores a disco centrífugo. Os secadores com bicos injetores a um só fluido e alta pressão operam com uma taxa de produção maior do que o de bico injetores a dois fluidos e produzem gotículas maiores e mais uniformes, sendo mais freqüentemente adotados nos secadores em escala industrial. Tanto os bicos pneumáticos quanto os bicos a alta pressão exigem que o fluido a ser pulverizado passe através de passagens estreitas. Por este motivo, quaisquer partículas, cristais ou outros sólidos suspensos no fluido, entupirão o bico. O terceiro tipo de atomizadores, são os de disco centrífugo que podem ser usados para pulverizar líquidos que não se consegue homogeneização suficiente para passar através de um bico injetor. Os atomizadores a disco centrífugo produzem gotículas de dimensões muito uniformes e não necessitam de uma alta carga de pressão e nem atribuem velocidade axial as gotículas pulverizadas. São menos afetados pelas variações nas propriedades do concentrado, como a porcentagem de sólidos ou a viscosidade e pelas variações na vazão de concentrado.

Viscosidade

A habilidade para atomizar um líquido é largamente dependente da viscosidade no dispositivo de atomização. Quando a viscosidade é muito alta, o líquido tende a formar partículas não esféricas. Atomização ineficiente também pode ser indicada por um anel estreito ao redor do nível da parede do secador com o atomizador. A maneira mais simples para reduzir a viscosidade é com adição de água, mais isto reduz muito a capacidade do secador por atomização para produzir pó. Um modo mais eficiente para reduzir a viscosidade é aumentar a temperatura de alimento. Esta tem a vantagem adicional de aumentar a capacidade do secador por atomização, desde que uma menor quantidade de calor é requerida para elevar a temperatura da gotícula dentro do secador.

Bocal de pressão

Um atomizador de bocal de pressão requer o uso de uma bomba de alta pressão para alimentar o líquido para o secador. Normalmente produz um pó com uma alta densidade e uma distribuição de tamanho de partícula estreita. A

principal desvantagem em secagem por atomização é que há muito poucos ajustes nas possíveis taxas de fluxo sem modificar as propriedades do pó.

Taxas de fluxo

A taxa de fluxo do líquido no secador por atomização é usada para controlar a temperatura de saída do secador e para sustentá-la em um determinado valor para manter a umidade do pó controlada. Se um determinado produto pode ser seco a uma temperatura de entrada de ar mais alta, então a taxa de fluxo será maior para manter a temperatura de saída do secador baixa.

Atomizador centrífugo

Em um atomizador centrífugo o líquido alimentado é acelerado a uma alta velocidade por um disco giratório. A alta velocidade relativa, entre filme líquido e o ar circundante à extremidade do eixo de rotação, induz o líquido a formar pequenas partículas. O líquido deixa a extremidade externa do disco radialmente na direção da corrente de ar quente como uma nuvem plana de partículas.

Velocidade do eixo de rotação

Um atomizador centrífugo é um dispositivo muito mais simples para operar que um atomizador de bocal de pressão, desde que o principal fator que afeta o tamanho das partículas é a velocidade do eixo de rotação. Para obter uma partícula mais fina com um atomizador centrífugo é preciso operar o eixo de rotação em alta velocidade. Para uma partícula mais grossa, usa-se uma velocidade de rotação mais baixa.

Temperatura do ar de entrada

Temperaturas mais altas de entrada de ar melhoram a eficiência térmica da operação de secagem por atomização como também a taxa de produção.

Umidade ambiente

A secagem de pó muito higroscópico tem um efeito muito grande sobre o depósito de sedimentos na câmara de secagem. Se a umidade ambiente é baixa, a câmara normalmente trabalha limpa, mas condições de alta umidade

podem conduzir rapidamente a formação de depósito de pó na câmara, que pode forçar uma parada da planta para limpeza.

Temperatura do ar de saída

A temperatura de saída do secador é controlada ajustando a taxa de alimentação para o atomizador. Isto é realizado ajustando a velocidade da bomba de alimentação por meio de um impulso de frequência variável. Assim, uma maior quantidade de alimento é atomizado na câmara de secagem, isto esfria o ar na câmara e a temperatura de saída abaixa. É importante notar que a menos que o alimento seja atomizado adequadamente, a temperatura de saída não será reduzida.

Teor de umidade do pó

O teor de umidade residual no pó é largamente controlado pela temperatura de saída do secador. Uma temperatura de saída mais baixa causa o aumento da umidade do pó. A temperatura da entrada do ar também afeta a umidade do pó por mudar a umidade do ar de saída. Se a temperatura de entrada é aumentada para obter uma maior taxa de produção, a temperatura de saída também precisará ser elevada ligeiramente para manter a mesma umidade do pó. Como regra geral, para cada aumento de 100 graus na temperatura de entrada de ar, a temperatura de saída deveria ser aumentada de 12 graus. Isto mantém a mesma umidade relativa no ar de saída e conseqüentemente, a mesma umidade de pó.

Fluxo de ar

A corrente de ar pelo distribuidor de ar principal, em associação com a temperatura do ar de entrada, afeta diretamente a taxa de produção de um secador atomizador. Se o fluxo de ar é reduzido, por opção ou devido a um problema, a taxa de produção do secador também será reduzida.

Variação de pressão no ciclone

A corrente de ar através do aquecedor, secador atomizador, tubulações de transporte e ciclone causa uma variação de pressão, que aumenta com o fluxo. No caso do ciclone, a variação de pressão é usada para circular o pó e o

ar ao redor da superfície interna, induzindo o pó a ser lançado para a superfície e cair na parte mais baixa do ponto de descarga.

A variação de pressão mais alta, mais rápido o material circula em torno da parte interna. A variação de pressão é significativamente afetada pelo diâmetro do cone introduzido no centro do topo do ciclone.

3.3 Materiais e Métodos

O presente trabalho foi desenvolvido em ambiente industrial de uma empresa do setor alimentício e no Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa. O processo estudado foi o de produção de leite em pó em uma indústria de laticínios do Estado de Minas Gerais. Nesta seção serão apresentadas:

- A metodologia empregada na pesquisa;
- As variáveis de processo para a produção de leite em pó;
- A escolha das variáveis para o planejamento EVOP;
- Os métodos para estimativa das variáveis;
- A metodologia utilizada no planejamento e análise dos experimentos; e
- A melhoria do processo por meio da otimização de seus parâmetros.

3.3.1 A metodologia de pesquisa empregada

Do ponto de vista dos procedimentos técnicos, a metodologia de pesquisa empregada neste trabalho é classificada como pesquisa-ação, que segundo THIOLENT (1996): “É um tipo de pesquisa social com base empírica, que é concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo e no qual os pesquisadores e os participantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo”.

Esse tipo de pesquisa tem um enfoque completamente prático, não ficando restrita a um simples levantamento de dados e publicação de conclusões. PAIVA (1999) relata que “embora a pesquisa-ação tenha um enfoque na resolução de problemas sociais, ela tem sido empregada também na resolução de questões nas áreas organizacional e tecnológica”. Principalmente quando se promove a intervenção em empresas.

Na metodologia de pesquisa-ação dá-se uma co-participação dos estudiosos e das pessoas envolvidas no problema sob investigação, o que não se dá nos métodos tradicionais de pesquisa que existe uma separação entre o

observador e os observados. Neste sentido, a ação dos pesquisadores é orientar a investigação utilizando os meios disponíveis e fazer um controle deste processo, objetivando a resolução de problemas, aumentando o nível de conhecimento das pessoas envolvidas, não substituindo desta forma, a atividade própria das pessoas envolvidas nas organizações. Os funcionários possuem autonomia para controlar o processo de melhoria e também têm ação significativa na agregação de conhecimento.

Dentro deste quadro, tem-se que o tema deste trabalho é a utilização da metodologia EVOP (Evolutionary Operation) para melhoria de processo na indústria de alimentos, e a problemática, a dificuldade das indústrias alimentícias, principalmente as pequenas e médias, em otimizar seus processos ou melhorar seus produtos no decorrer da produção industrial (online) com baixo custo por meio do uso de métodos estatísticos.

A escolha da pesquisa-ação é justificada, por haver uma associação direta entre o objetivo deste estudo e os conceitos que envolvem tal metodologia. Uma forma de mostrar os benefícios do uso do método proposto nesta pesquisa é aplicando-as em uma situação real e observando os resultados obtidos.

3.3.2 Condução da pesquisa

A escolha da indústria e do processo de produção de leite em pó para o estudo do método EVOP foi devido ao interesse e a disponibilidade da empresa e pelas condições favoráveis detectadas a aplicação do método a partir de uma análise exploratória do ambiente e dos processos da empresa. A análise exploratória foi realizada por meio de visitas ao local e de reuniões com a gerente e engenheira da fábrica.

A etapa seguinte, após aprovação do trabalho pela diretoria, foi a apresentação do método para a equipe, formada pela gerente e engenheira responsável pela indústria, o chefe de produção e os supervisores da produção e da manutenção. Em seguida, foram discutidos alguns possíveis problemas enfrentados pela empresa e que poderiam ser resolvidos com a utilização do método EVOP. O principal problema identificado foi a alta quantidade de partículas queimadas na produção de leite em pó, classificando o produto como Disco B ou sedimento B, segundo os padrões da *American Dry Products*

Institute (ADPI), sendo que o padrão de qualidade definido pela empresa é sedimento A. Além disso, a empresa tinha interesse em estudar as melhores condições de operação com relação ao rendimento do processo de secagem que é considerado pela empresa como sendo a quantidade de litros de leite fluido que fornece um quilograma de leite em pó; e também a vazão de leite fluido processado em litros por hora. Os principais objetivos do estudo são, portanto: otimizar a produção de leite em pó com sedimento B; acompanhar o rendimento e a vazão de leite processado. Sendo que as variáveis, rendimento e vazão, também foram estudadas como parâmetro restritivo da quantidade de leite em pó classificado como sedimento B.

A quantidade produzida de leite em pó classificado como sedimento B foi medida, em percentagem, sobre o total de leite em pó produzido por dia de produção. A vazão em litros por hora e o total de leite fluido processado por dia de produção foram medidos por meio de um medidor de vazão da marca Danfoss (MAG 6000) que apresenta um erro leitura de medição de 0,25%.

A etapa seguinte foi a identificação das variáveis de processo que poderiam influenciar nas variáveis resposta, ou seja, identificar as variáveis independentes cujos efeitos seriam determinados pelo programa EVOP. A identificação foi realizada por meio de reuniões com a equipe formada e por meio de consulta ao representante da empresa fabricante do equipamento de secagem (um secador por atomização de disco centrífugo).

3.3.3 Estrutura do processo

O sistema de secagem da empresa pesquisada é composto por um evaporador de filme ou película descendente e um secador por atomização (spray dryer) de disco centrífugo em único estágio. O sistema apresenta as seguintes características:

Evaporador de 3 Efeitos

- Marca: Scheffers.
- Capacidade: 10.500 Litros por hora para leite integral e 11.000 litros por hora para leite desnatado.

- Quantidade de tubos: 123 no primeiro efeito, 81 no segundo e 81 no terceiro.
- Diâmetros dos tubos: 51 milímetros.
- Comprimento dos tubos: 6 metros.
- Diâmetro do separador: 900 milímetros no primeiro efeito; 800 no segundo e 900 no terceiro efeito.
- Temperatura de projeto da carcaça de cada calandra: 78°C no primeiro efeito; 68°C no segundo efeito e 59°C no terceiro efeito.

Secador por atomização

- Marca: Niro Atomizer;
- Teor de sólidos do concentrado (leite integral): 48% (15°Baumé a 60°C);
- Tempo de operação: 20 h/dia;
- Capacidade evaporativa: 1315 kg/ h;
- Capacidade produtiva: 1285 kg/h;
- Umidade remanescente no produto: 3%;
- Meio de aquecimento: Vapor;
- Pressão de vapor no aquecedor: 1418,55 KPa;
- Consumo de vapor (seco e saturado): 2900 kg/h;

Como base de cálculo para as características citadas acima, temos:

- Temperatura do ar atmosférico: 20°C;
- Umidade relativa do ar atmosférico: 75%;
- Pressão atmosférica: 92 KPa;
- Poder calorífico do vapor: 2792,6 KJ/kg.

3.3.4 As variáveis do processo

No processo de produção de leite em pó diversas variáveis de entrada ou variáveis independentes podem ser consideradas no estudo de otimização, dentre estas, destacam-se:

- Teor de sólidos do concentrado;

- Vazão de concentrado para o secador;
- Temperatura do ar na entrada da câmara de secagem;
- Umidade relativa do ar que entra no secador;
- Pressão ou vácuo na câmara de secagem;

Para este estudo, a seleção das variáveis foi feita de modo que a melhoria do processo acontecesse com o mínimo de investimento e de custo de produção possíveis. Por esta razão, o número de variáveis de processo selecionadas caiu bastante. Além disso, o equipamento de secagem utilizado é antigo, foi adquirido em 1973, e não permite controlar ou modificar algumas variáveis, como a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem (195-198°C) e a umidade relativa do ar que entra no secador.

As variáveis respostas ou variáveis dependentes selecionadas para o estudo foram a quantidade, em percentagem, de leite em pó produzida e classificada como sedimento B; a vazão de leite processado diariamente, em litros por hora, e o rendimento do processo, definido como a quantidade de litros de leite fluido que produz um quilograma de leite em pó. Desta forma, a melhoria do processo ocorrerá com a redução da quantidade de leite em pó com sedimento B e com o aumento da vazão de leite processado. Basicamente, o investimento foi o tempo de estudo dos supervisores, operadores e da engenheira de processo, o custo com retrabalho não foi considerado significativo.

O teor de sólidos do concentrado foi medido por um hidrômetro de Baumé durante toda a produção em intervalos de 30 minutos, sendo que no início da produção foi medido de 10 em 10 minutos.

Já a viscosidade do concentrado não foi monitorada por falta de um equipamento de medida. Além disso, a equipe considerou a viscosidade do concentrado como uma variável secundária, sem muita influência sobre as variáveis dependentes escolhidas para o estudo.

O efeito da temperatura do ar na entrada da câmara de secagem não foi avaliado devido a restrições no fornecimento de vapor, visto que a capacidade da caldeira não permitiu elevar a temperatura do ar acima dos valores normais de operação. Já a redução da temperatura do ar de entrada, inviabilizou a produção de leite em pó com o teor de umidade estabelecido pelas especificações do produto, o teor de umidade ficou acima de 3,5%, que é o

padrão utilizado pela empresa. A temperatura de entrada de ar mais baixa promoveu a redução da vazão de concentrado para o secador.

A umidade do ar de entrada não é possível de ser controlada, apesar de ter influência sobre as condições de secagem, devido a estrutura física da indústria.

Por fim, a equipe de pesquisa identificou a pressão ou o vácuo na câmara de secagem e o teor de sólidos do concentrado, como as variáveis a serem estudadas pelo programa EVOP, a fim de melhorar a produção de leite em pó com sedimento B e avaliar o efeito destas variáveis sobre o rendimento e a vazão de leite processado.

3.3.5 Planejamento experimental

Foi considerado no programa EVOP, o planejamento fatorial 2^2 , em que as condições de operação atuais foram incluídas como um dos pontos do experimento fatorial. A escolha deste planejamento foi devido ao menor número de condições experimentais necessárias para o programa EVOP, minimizando as alterações a serem feitas no processo. Os intervalos das variáveis foram escolhidos conforme descrição a seguir. Em relação ao vácuo na câmara de secagem, o intervalo de variação foi de 5 milímetros de coluna de água; já para o teor de sólido do concentrado o intervalo de variação foi de $0,5^\circ$ Baumé, como mostrado na Figura 11. No processo de escolha dos intervalos de variação, foi levada em conta a precisão e a escala do equipamento de medição; o histórico do processo e o fato de não poder promover alterações na qualidade do produto.

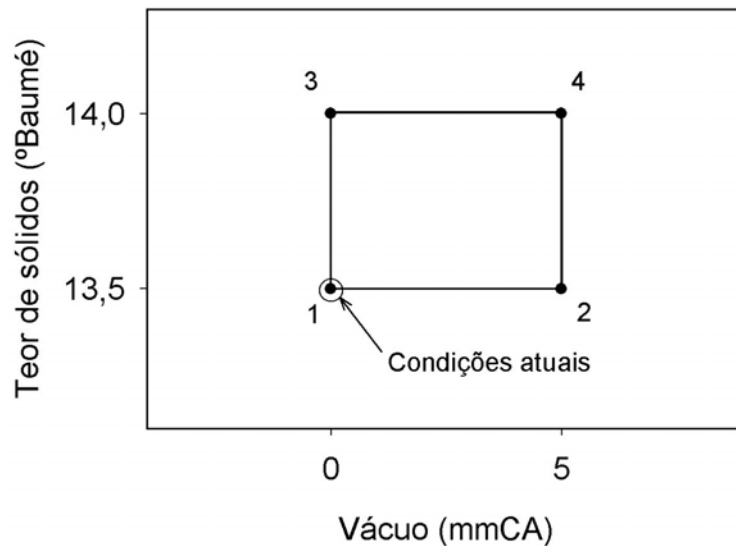


Figura 11: Planejamento experimental para a primeira fase do programa EVOP.

A melhor condição atual de operação, mostrada na Figura 11, para a variável “teor de sólidos” foi definida como sendo a média dos valores desta variável presente no histórico do processo, visto que a empresa não trabalhava com um ponto fixo para esta variável, o controle era por meio de um intervalo de variação, entre 13,5 e 15° Baumé.

O planejamento experimental dos ensaios é apresentado no Quadro 4, indicando a quantidade e seqüências dos ensaios, os níveis dos fatores e os ciclos da fase I.

Quadro 4: Condições de operação para a Fase I do programa EVOP para melhoria do processo de secagem de leite em pó.

Ensaio	Ciclo	Teor de sólidos (codificados)	Vácuo (codificados)	Teor de sólidos (°Baumé)	Vácuo (mm CA ou Kg/m ²)
1	1	-1	-1	13,5	0
2	1	1	-1	14,0	0
3	1	-1	1	13,5	5
4	1	1	1	14,0	5
5	2	1	1	14,0	5
6	2	-1	1	13,5	5
7	2	1	-1	14,0	0
8	2	-1	-1	13,5	0
9	3	-1	-1	13,5	0
10	3	1	-1	14,0	0
11	3	-1	1	13,5	5
12	3	1	1	14,0	5
13	4	1	1	14,0	5
14	4	-1	1	13,5	5
15	4	1	-1	14,0	0
16	4	-1	-1	13,5	0

Um ciclo foi definido como o período de um dia de trabalho, ou seja, um período de aproximadamente 20 horas de produção. Cada ciclo na Fase I teve 4 repetições. Portanto, a Fase I foi concluída em 16 dias de produção.

Durante a produção, o teor de sólidos do concentrado foi controlado alterando a vazão de entrada e saída de leite no evaporador. Enquanto que o vácuo foi controlado, abrindo ou fechando a entrada ou saída de ar no sistema de secagem.

A coleta de dados foi realizada por meio das fichas de acompanhamento do processo de concentração e do processo de secagem da própria empresa, em que são monitoradas as variáveis do processo.

3.3.5.1 A folha de trabalho para o programa EVOP

A folha de trabalho utilizada no programa EVOP, mostrada na Figura 12, foi desenvolvida com a planilha de cálculo Excel (Microsoft® Excel 2000), na qual foram realizados os cálculos. Os índices estatísticos foram inseridos na folha para facilitar o trabalho de cálculo.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S									
1	CÁLCULO DAS MÉDIAS																										
2	Condições operacionais			1	2			3			4																
3	Soma do ciclo anterior			24.3	7.7			11.0			2.6																
4	Média do ciclo anterior			8.1	2.6			3.7			0.9																
5	Novas observações			9.2	8.2			8.3			0.0																
6	Diferenças			-1.1	-5.6			-4.6			0.9																
7	Novas somas			33.5	15.9			19.3			2.6																
8	Novas médias			A 8.4	B 4.0			C 4.8			D 0.6																
9	CÁLCULO DOS EFEITOS																										
10	EFEITO VÁCUO				EFEITO TS				EFEITO INTERAÇÃO																		
11	B	4.0	A	8.4	C	4.8	A	8.4	A	8.4	B	4.0															
12	D	0.6	C	4.8	D	0.6	B	4.0	D	0.6	C	4.8															
13	F	4.6	G	13.2	5.5				12.4				9.0				8.8										
14	13.2				12.4				8.8																		
15	-8.6				2				-6.9				2				0.2										
16	-4.3				-3.4				0.1																		
17	EFEITO DA MUDANÇA NA MÉDIA						MÉDIA DA FASE																				
18	F	4.6	A	8.4	H						17.8																
19	G	13.2	Ax4						33.5																		
20	H	17.8	Ax4						33.5																		
21	-15.7																										
22	4						4						4.5														
23																											
24	RESULTADOS									FATORES																	
25	EFEITO VÁCUO = -4.3 ± 2.9									n									K								
26	EFEITO TS = -3.4 ± 2.9									2									0.34								
27	EF. INTERAÇÃO = 0.1 ± 2.9									3									0.40								
28	EF. DA MÉDIA = -3.9 ± 2.6									4									0.42								
29										5									0.43								
30	OBS:									6									0.44								
31										7									0.45								
32	PRODB é a percentagem de leite em pó									8									0.45								
33	com sedimento B produzido em um dia									9									0.46								
34	de produção									10									0.46								
35										11									0.46								
36										12									0.47								
37										13									0.47								
38										14									0.47								

TEOR DE SÓLIDOS (TS)		VÁCUO	
4.8	0.6	8.4	4.0
3	4	1	2

CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO			
Soma anterior	=	6.1	
Novo S (= amplitude*K)	=	6.5*0.42	= 2.7
Nova soma S	=	8.8	
Nova média SA = (Nova soma S)/(n-1)	=	2.9	
Média anterior	=		
n (número de ciclos)	=	4	

CÁLCULO DE 2EP LIMITES DE ERRO			
Para novas médias e novos efeitos			
L*AS =	1.00	x	2.9
			= 2.9
Para efeito de alteração/mudança na média			
M*SA =	0.87	x	2.9
			= 2.6

PROGRAMA EVOP			
Otimização da produção de leite em pó			
Data:	28/3/02		
RESPOSTA:	PRODB (%)		
ELABORADO POR:	Paulo Sobrinho		
FASE:	1		
CICLO:	4		

Figura 12: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 1. (Modificado de JURAN e GRZYNA, 1988).

Os efeitos foram estimados no final do primeiro ciclo, não sendo possível calcular uma estimativa do desvio padrão, já que não existem repetições do experimento. No entanto, foi calculada uma estimativa do desvio padrão do erro experimental com base nos registros históricos da operação do processo, a qual foi utilizada para avaliar a significância dos efeitos. Concluído o segundo ciclo, foi possível calcular a estimativa dos efeitos e a estimativa da variância do erro experimental.

Os efeitos estimados e seus intervalos de confiança foram calculados utilizando as instruções para a folha de trabalho e tomando como referência as condições apresentadas na Figura 11. O desvio padrão é obtido a partir da amplitude das variações por intermédio da utilização do fator K, proveniente das tabelas aplicadas por BOX e DRAPER (1998). A incerteza da estimativa dos efeitos é expressa como intervalo de confiança e o efeito de mudança ou alteração na média é calculado comparando os resultados dos quatro vértices com o resultado da melhor condição atual de operação. Este efeito expressa a não linearidade do modelo, no domínio experimental estudado.

Na folha de trabalho da Figura 12, o lado esquerdo é utilizado para registro de dados e a estimativa dos efeitos. O lado direito apresenta o diagrama da fase e é utilizado na determinação dos limites de erro, das médias, dos efeitos e dos vértices.

O erro padrão é chamado de “EP” e os limites dos erros são chamados de “2EP” para “dois erros padrões”. Os efeitos mais ou menos (\pm) 2EP abrange, normalmente, 95% da área de confiança. A significância estatística dos efeitos somente é apresentada após a conclusão de no mínimo três ciclos.

O processamento de dados dos ensaios é feito conforme os esquemas mostrados anteriormente na Figura 4, e é acompanhado pela folha de trabalho da Figura 12.

Diferenças

Subtraia as “*novas observações*” (célula F4) das “*médias do ciclo anterior*” (célula F5) e anote o sinal algébrico da diferença. No exemplo, para a condição 1: (célula F4) – (célula F5) = (célula F6) \Rightarrow 8,1 - 9,2 = -1,1.

Novas Somas

Some os valores das “novas observações” aos valores das “soma do ciclo anterior”. No exemplo, para a condição 1: (célula F3) + (célula F5) = (célula F7) $\Rightarrow 24,3 + 9,2 = 33,5$.

Novas Médias

Divida as “novas somas” por “n”, o número de ciclos da fase atual, apresentado no quadro esquerdo inferior “PROGRAMA EVOP”. No exemplo, para a condição 1: (célula F8) = (célula F7) \div (célula S16) $\Rightarrow 33,5 \div 4 = 8,4$.

Cálculos dos Efeitos

Tomando-se o efeito do fator A (VÁCUO) como exemplo. Escreva as “Novas médias” para as condições de operação 2 e 4 opostas B (célula H8) e D (célula L8). Some as duas de forma a obter o número do espaço F (célula B13). Execute a operação correspondente as “Novas médias” das condições de operação 1 e 3, A (célula F8) e C (célula J8) para obter o número para o espaço G (célula D13).

A próxima operação é a subtração. Copie (G) embaixo de (F) e subtraia (F) de (G), a seguir divida por 2. O sinal deve ser mantido conforme o resultado obtido. Este resultado é transportado para o quadro indicado “RESULTADOS”.

Por exemplo, tem-se $(B + D) = (F) = 4,0 + 0,6 = 4,6$; $A + C = 8,4 + 4,8 = 13,2$; $F - G = -8,6$; Efeito A (Vácuo) = (célula B15) \div (célula A15) = (célula B16) $\Rightarrow -8,6 \div 2 = -4,3$.

O efeito B (efeito do teor de sólidos do concentrado - TS) e o efeito da interação entre teor de sólidos do concentrado e o vácuo na câmara de secagem (TS x VÁCUO) seguem a mesma seqüência, no entanto, nos seus respectivos quadros de cálculo, mostrado na folha de trabalho da Figura 12.

Efeito da mudança na média

Copie (F) e (G) conforme mostrado, em seguida some os dois. Multiplique (A) por 4. a próxima operação é a subtração igual à anterior, agora divida o valor da subtração por 4.

No exemplo, $F + G = 4,6 + 13,2 = H = 17,8$; $A \times 4 = 8,4 \times 4 = 33,5$;

$$\text{Efeito da mudança na média} = (17,8 - 33,5) / 4 = -3,9$$

Média da Fase

Copie (H) do quadro “efeito da mudança na média” e divida por 4. Por exemplo,

Média da Fase = $H \div 4 = (\text{célula H18}) \div 4 = 17,8 \div 4 = 4,5$, valor descrito na célula H22 da Figura 12.

Cálculo do desvio padrão

O desvio padrão será calculado por meio da amplitude. A amplitude é definida pela diferença algébrica entre as diferenças mais positivas e mais negativas. A amplitude é sempre positiva. O desvio padrão é estimado multiplicando a amplitude pelo valor da constante K.

No exemplo, Amplitude = $|(\text{célula L6}) - (\text{célula H6})| = |0,9 - (-5,6)| = 6,5$

A constante K para 4 ciclos é igual a 0,42, portanto, desvio padrão “s” é igual a 2,7 ($s = 6,5 \times 0,42 = 2,7$).

Cálculo de limites do erro ou intervalo de confiança (2EP)

O limite de erro para novas médias e novos efeitos é calculado multiplicando-se a constante L pela “Nova média SA” (célula S14), em que a “Nova média SA” é a “Nova soma S” (célula S13) dividido por $n-1$, em que n é o número de ciclos (célula S16). No exemplo,

$L \times (\text{Nova média SA}) = L \times (\text{Nova soma S}) / (n-1) = 1,00 \times (8,8) / (4-1) = 2,9$; sendo que a “Nova soma S” é a soma dos desvio padrão anterior mais o desvio padrão estimado no ciclo atual (Novo S).

O limite de erro para o efeito da mudança na média é calculado multiplicando-se a constante M pela “Nova média SA”. No exemplo,

$$M \times (\text{Nova média SA}) = 0,87 \times 2,9 = 2,6.$$

Constantes K, L e M

Leia os fatores K, L e M da tabela, mostrada na folha de trabalho no quadro central inferior. K é uma constante que depende do número de ensaios

por ciclo e do número de ciclos ensaiados. Este fator é proveniente de um método simplificado para estimar o desvio padrão, sendo BOX e DRAPER (1998). Sendo que:

$$K = f_{q,n} = \left(\frac{n-1}{n} \right)^{1/2} \times w_q ;$$

$$L = \frac{2}{\sqrt{n}} ; e$$

$$M = \frac{1,73}{\sqrt{n}}$$

Em que n é o número de ciclos até o momento do cálculo, q é o número de condições experimentais ou de operação no programa EVOP e w é uma constante que depende de q .

Havendo efeito estatístico significativo, isto é, verificado que o efeito da variável é maior que o limite de erro ($2xEP$) para somente uma determinada variável de processo, deve-se alterar o planejamento da próxima fase na direção da variável importante. Com relação a outras variáveis que não tiverem efeito significativo, deve-se elimina-las do programa ou aumentar sua amplitude de variação. Quando os efeitos das duas variáveis são significativos, o centro do plano ou a condição de referência é deslocado para um ponto nas duas direções, proporcionalmente ao tamanho dos efeitos. Sempre que o planejamento for alterado, tem-se inicio uma nova fase. A segunda fase e as posteriores utilizam-se, com freqüência, a estimativa anterior do desvio padrão, uma vez que foi obtida sob o método de operação atual (JURAN e GRAYNA, 1988).

Segundo JURAN e GRAYNA (1988) o método EVOP deve ser conservador, as alterações devem ser contíguas, isto é, pelo menos um ponto da fase anterior deve coincidir com os da nova fase. Desta forma, as possíveis relações entre duas fases de um programa EVOP são mostradas na Figura 13.

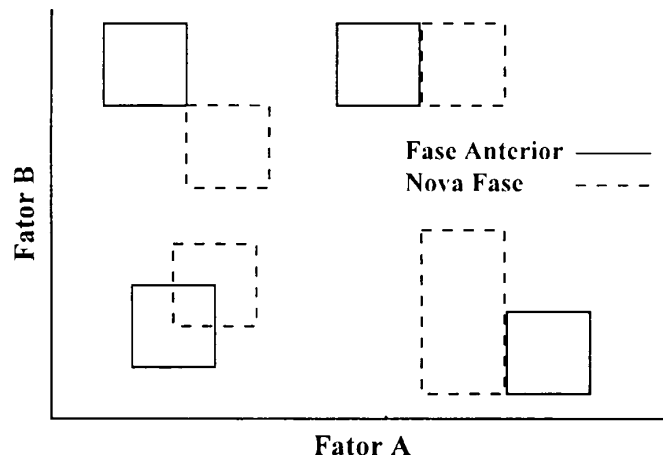


Figura 13: Possíveis relações entre a fase anterior e a nova fase. FONTE: WERKEMA e AGUIAR (1996).

3.3.6 Informações adicionais

- Os ensaios foram acompanhados de forma que os dados não fossem afetados por fatores desconhecidos;
- As variações de processo foram grandes, devido a variações no fornecimento de vapor; na qualidade da matéria-prima, principalmente estabilidade térmica e acidez; e devido as variáveis incontroláveis (ruído) do processo.
- Nenhum investimento em equipamento adicional foi feito no processo durante o programa EVOP;
- A rotina de operação não foi alterada devido ao programa EVOP.
- O pesquisador foi a pessoa responsável pela condução de todas as etapas do programa EVOP, agindo de forma interativa com a equipe de trabalho.

3.4 Resultados e Discussão

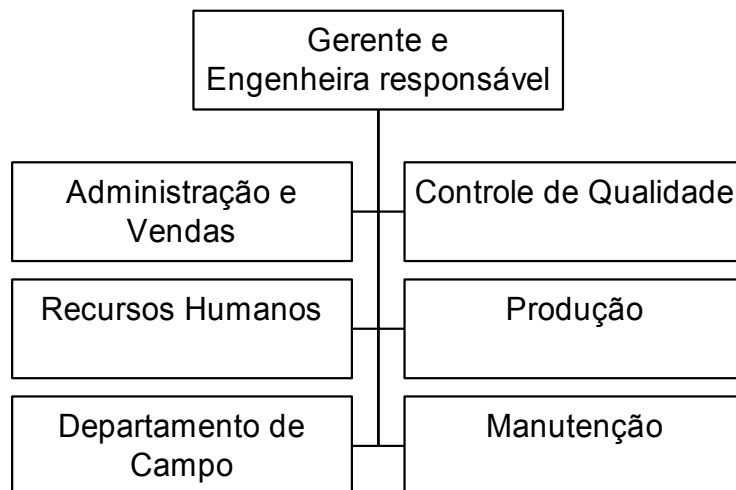
Nesta seção serão abordadas as características do processamento de leite em pó na empresa pesquisada, os resultados obtidos e sua interpretação com a utilização do método EVOP. Será verificada a evolução do processo pela condução do EVOP na otimização da etapa de secagem para produção de leite em pó.

3.4.1 O Perfil da Empresa

A empresa foi construída em 1973 com início das atividades em 1974; tem cerca de 150 funcionários; produz leite em pó integral e desnatado, leite tipo “C”, doce de leite e manteiga. A empresa teve uma recepção de 65,1 milhões de litros de leite no ano de 2001. A matéria-prima é, praticamente, toda destinada a produção de leite em pó. Foram produzidas aproximadamente 7,65 mil toneladas de leite em pó no ano de 2001.

A fábrica está organizada pelos seguintes setores: Administração e vendas, Recursos Humanos, Almoxarifado, Armazém, Concentração e secagem, Departamento de campo, Doce de leite, manteiga e empacotamento, Estocagem, Fracionamento, Laboratório de físico-química, Laboratório de microbiologia, Laboratório de rotina, Manutenção, Pasteurização, Produção de frio, Produção de vapor, Recepção, Refeitório e Tratamento de água.

A empresa dispõe de boa estrutura para controle de qualidade, no entanto, não dispõe de pessoal qualificado tecnicamente na área de qualidade, principalmente no que tange aos sistemas e ferramentas para gestão da qualidade. A empresa vinha tendo problema com a produção de leite em pó com sedimento B e com o controle de qualidade da matéria-prima. A empresa dispõe de um quadro técnico pouco qualificado, mas com grande experiência na área de laticínios. O quadro técnico é composto por uma engenheira de alimentos, um químico industrial, dois técnicos em nutrição e supervisores de produção sem formação técnica. Organograma administrativo da empresa e mostrado a seguir.



3.4.1.1 Etapas de produção de leite em pó na indústria pesquisada

O processo de produção de leite em pó na empresa pesquisada pode ser resumido em quatro etapas principais: seleção; padronização, concentração e secagem.

A etapa de seleção da matéria-prima é feita em laboratório por meio de análises físico-químicas e biológicas de rotina, tais como, acidez; densidade; gordura, redutase; alizarol; antibióticos; etc.. Após estas análises, o leite é resfriado a 4-5°C e armazenado em tanques de estocagem isotérmicos.

Uma vez nos tanques de estocagem, o leite é bombeado por meio de bomba centrífuga e sanitária para o tanque de equilíbrio da concentração, passando pelo primeiro pré-aquecedor tubular, sendo aquecido à temperatura de 42-45°C aproveitando os vapores do terceiro efeito do evaporador. Passando também, pelo segundo pré-aquecedor tubular, sendo aquecido à temperatura de 54-56°C. Em seguida o leite passa por uma centrífuga para padronização e clarificação de forma a se obter o padrão de gordura desejado no produto final, que no caso do leite em pó integral é de 26%, e é levado ao tanque de equilíbrio da concentração, também chamado de maturador.

A partir daí, o leite é bombeado do tanque de equilíbrio para o terceiro pré-aquecedor, atingindo a temperatura de aproximadamente 63°C, utilizando os vapores do primeiro efeito do evaporador. Em seguida, o leite entra em um termocompressor atingindo na saída a temperatura aproximada de 75°C, sendo

a partir daí pasteurizado em um pasteurizador tubular alcançando uma temperatura de 96°C.

A próxima etapa é a concentração do leite, realizada à vácuo em um evaporador tubular. Após passar pelo termocompressor o leite entra no primeiro efeito de concentração. A temperatura utilizada é de 78°C, sendo os vapores arrastados pelo termocompressor para reaproveitamento e, o produto para o segundo efeito com aproximadamente 20-23 % sólidos totais.

Uma vez no segundo efeito, o leite semi-concentrado sofre uma pressão rarefeita mais intensa, com uma temperatura mais baixa (68°C). Daí, passa para o terceiro efeito de concentração, a uma pressão rarefeita de aproximadamente 90,6-93,3 KPa, temperatura de 59°C, sendo transportado deste efeito por meio de uma bomba centrífuga sanitária provida de válvula de retenção a uma temperatura de 52°C, e com aproximadamente 45-49 % de sólidos totais, para os tanques de alimentação do secador.

O concentrado, já nos tanques de alimentação, é impulsionado por uma bomba sanitária ao atomizador. É então aspergido em finíssimas gotículas dentro da câmara de secagem, por meio de um disco atomizador em alta velocidade, diante de uma corrente de ar aquecido a 196 °C, o aquecimento do ar é feito por um radiador a vapor. O concentrado nestas condições perde quase totalmente a sua umidade em frações de segundos. O leite em pó é retirado do interior da câmara de secagem por gravidade e transportado pneumaticamente. O leite em pó mais fino é separado por meio de corrente de ar em ciclones, onde uma válvula rotativa joga o produto na rede de ar secundária, ar de resfriamento, em que é misturado com o leite em pó mais denso, extraído por gravidade, para que tenhamos um produto homogêneo. Daí, segue para o ciclone final onde é separado do ar de resfriamento, sendo retirado do ciclone por uma válvula rotativa direto para uma peneira, e é em seguida embalado. O produto final deve conter, no máximo, 3,5% de umidade.

A Figura 14 mostra a seqüência das etapas de concentração e secagem de leite em pó.

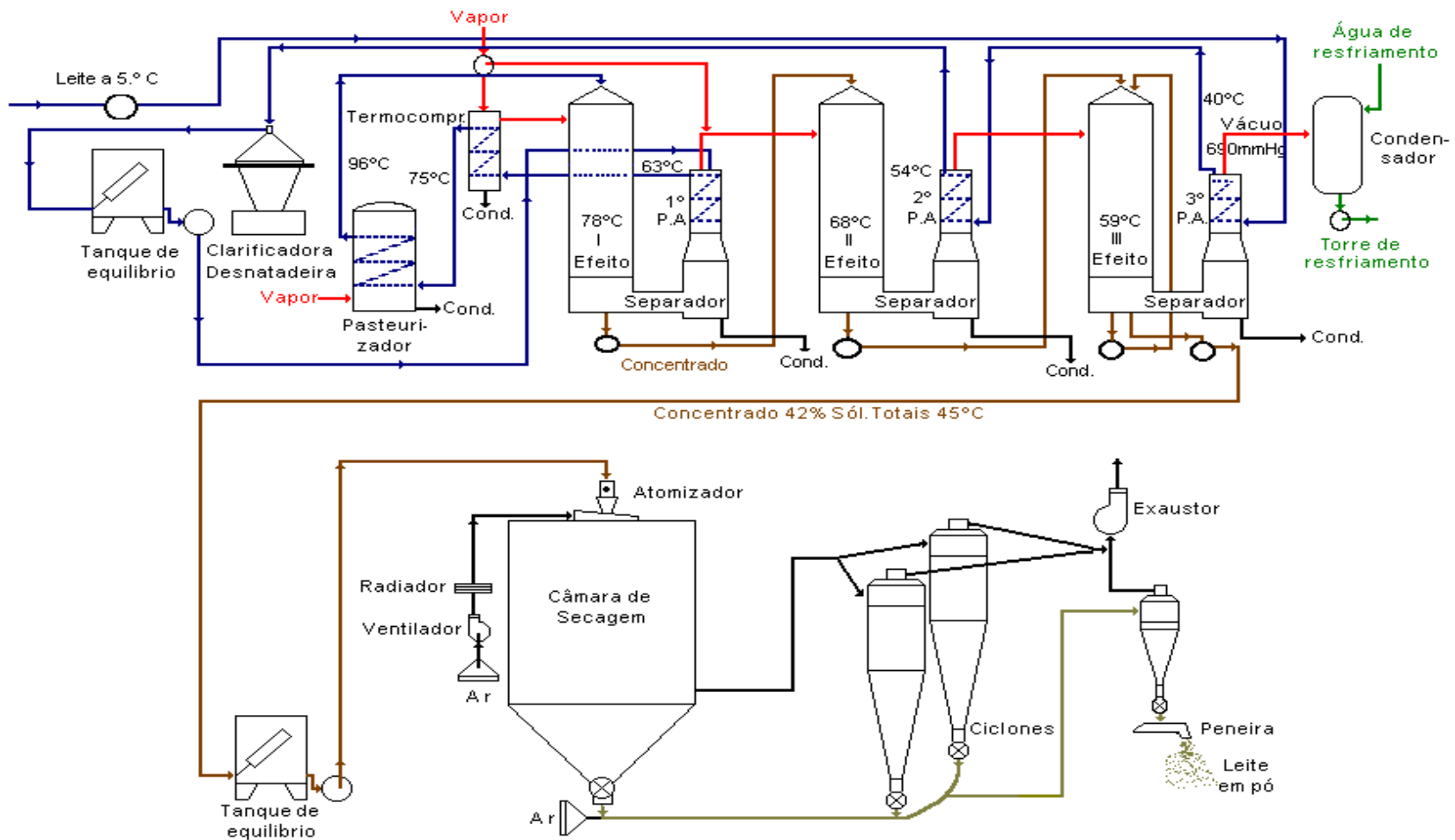


Figura 14: Fluxograma do processo de secagem de leite na indústria pesquisada.

3.4.2 Análise dos dados históricos do processo

Com o objetivo de conhecer o comportamento das variáveis do processo de produção de leite em pó na empresa pesquisada e enriquecer o estudo, foram construídas cartas de controle para variáveis, mostradas na Figura 15; e foi determinado por meio de gráficos, ver Figura 16, as correlação ou independência entre as observações das variáveis respostas. Desta forma, é possível visualizar o comportamento destas variáveis com o tempo, e verificar se o processo "está sob controle", isto é, verificar sua estabilidade. De acordo com BOX e DRAPER (1998) o gráfico de cada observação, exceto a primeira, contra a observação precedente pode determinar a correlação entre as observações feitas para uma variável.

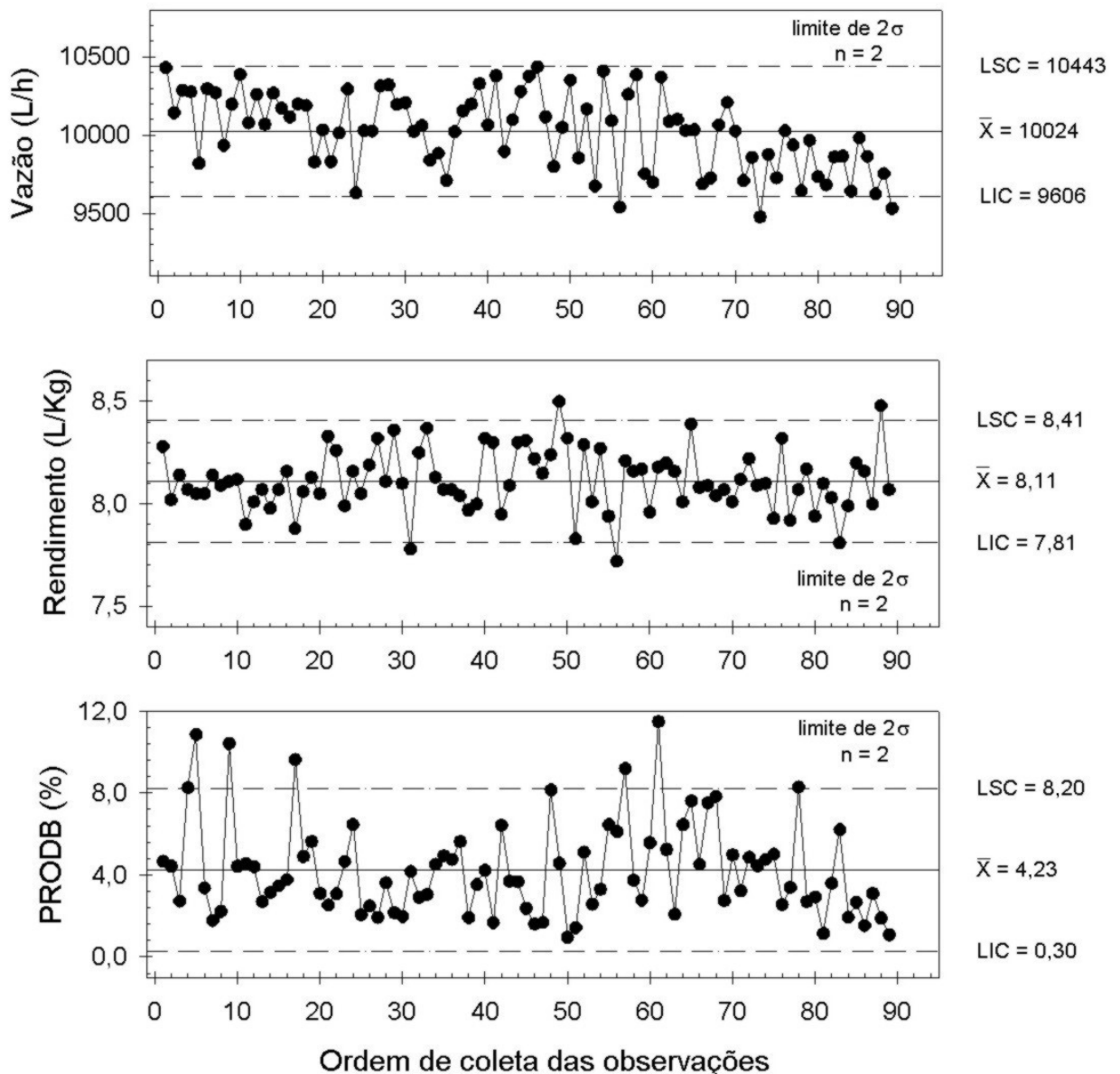


Figura 15: Cartas de controle individuais para as observações das variáveis respostas de interesse no programa EVOP.

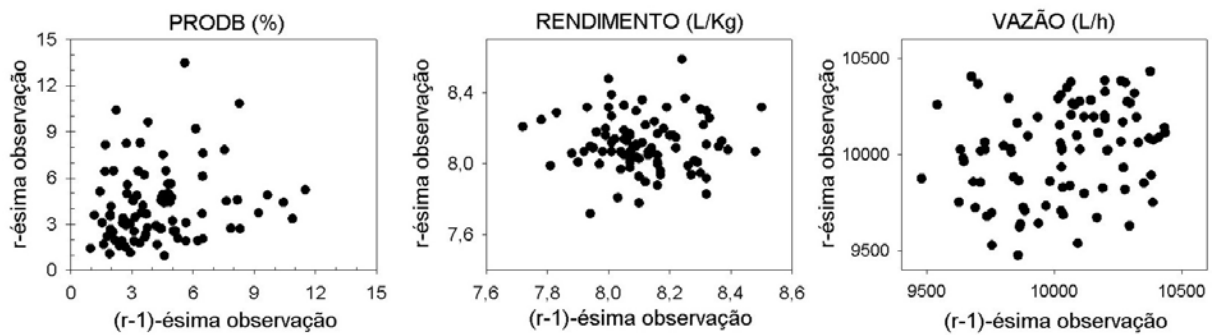


Figura 16: Gráficos para avaliar a autocorrelação entre as observações de cada uma das variáveis respostas de interesse no programa EVOP.

Analisando a Figura 16, nota-se que não há correlação entre as ordens das observações coletadas para qualquer uma das variáveis. Por meio das cartas de controle, nota-se que o processo está operando sob controle, ver Figura 15. Quando um processo está sob controle, somente causas aleatórias atuam sobre ele e, a ocorrência de causas identificáveis levará o processo a ficar fora de controle

3.4.3 Resultados da Fase I do programa EVOP

Os ensaios foram baseados nos parâmetros do planejamento EVOP, conforme o Quadro 4. Nesta primeira fase foram realizados 4 ciclos, com 4 repetições, em um total de 16 ensaios. Como um ensaio corresponde a um dia de produção, tem-se que a fase I do programa EVOP foi concluída em um período de 16 dias. As variáveis estudadas foram o teor de sólidos do concentrado (TS) e variação de pressão no secador, ou seja, o vácuo produzido no secador (VÁCUO).

O Quadro 5 mostra as condições operacionais e os resultados obtidos, com os 16 ensaios, para as variáveis respostas: Quantidade, em percentagem, de leite em pó classificado como sedimento B por dia de produção (PRODB); quantidade de litros de leite fluido que produz um quilograma de leite em pó (RENDIMENTO) e vazão de leite fluido para o sistema de secagem, em litros por hora (VAZÃO). A condição de referência para a Fase I foi 13,5° Baumé para TS e 0 (zero) mmCA para o vácuo. No caso da variável TS, o valor de 13,5° Baumé não representa a melhor condição de operação conhecida, porque o processo não trabalhava com um valor alvo para esta variável, mas com um intervalo, entre 13,5° a 14,5° Baumé, dependendo do ajustes necessários para estabilizar o processo.

Quadro 5: Dados obtidos na Fase I do programa EVOP, para a melhoria do processo de produção de leite em pó.

Ensaio	Ciclo	TS (°Baumé)	VÁCUO (mm CA)	PRODB (%)	RENDIMENTO (L/Kg)	VAZÃO (L/h)
1	1	13,5	0	5,2	8,20	10088
2	1	14,0	0	5,0	7,93	9728
3	1	13,5	5	2,4	8,31	10403
4	1	14,0	5	0,1	8,09	10113
5	2	14,0	5	0,0	8,01	9959
6	2	13,5	5	1,6	8,22	10435
7	2	14,0	0	2,6	8,32	10028
8	2	13,5	0	13,5	8,18	10371
9	3	13,5	0	5,6	7,96	9700
10	3	14,0	0	3,4	7,92	9938
11	3	13,5	5	3,8	8,16	10386
12	3	14,0	5	2,5	7,92	9977
13	4	14,0	5	0,0	8,12	9990
14	4	13,5	5	8,2	8,24	9801
15	4	14,0	0	8,3	8,07	9645
16	4	13,5	0	9,2	8,21	10262

A vazão de leite fluido para o sistema de secagem foi a variável resposta que se mostrou mais influenciada pelas variáveis do processo, principalmente pelas variáveis perturbadoras ou “ruído”, pelo fato de depender fortemente da qualidade do leite fluido; que por sua vez depende de vários fatores, desde a alimentação do animal, a ordenha, o armazenamento pós ordenha, o transporte e a estocagem. Além disso, a medição desta variável é influenciada no sistema de secagem tanto pela etapa de evaporação quanto pela etapa de secagem no secador atomizador. Portanto, para a análise dos resultados desta variável talvez fosse interessante explorar mais ciclos para se tirar uma conclusão mais exata.

Embora seja desejável aleatorizar a ordem de coleta de dados para tentar neutralizar os efeitos de possíveis variáveis perturbadoras, no método EVOP isto não é necessariamente realizado, já que alterações na ordem de coleta das observações a cada vez que um novo ciclo é realizado poderiam ser difíceis de serem implementadas sob as condições de operação do processo na linha de produção.

É possível calcular os efeitos dos fatores considerados e de suas interações após a conclusão de cada ciclo. No primeiro e segundo ciclo desta primeira fase do programa EVOP, os efeitos dos fatores em estudo foram comparados com o erro padrão estimado a partir dos dados históricos do processo. No terceiro e quarto

ciclo, a estimativa do erro padrão foi determinada por meio da amplitude e da constante K, como discutido em BOX e DRAPER (1998).

Discussão da Fase I

Os resultados da Fase I, apresentados na Figura 21, foram extraídos das folhas de trabalho de cada ciclo da Fase, mostradas nas Figuras 17 a 20 para a variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB). Para as variáveis RENDIMENTO e VAZÃO, o procedimento é similar.

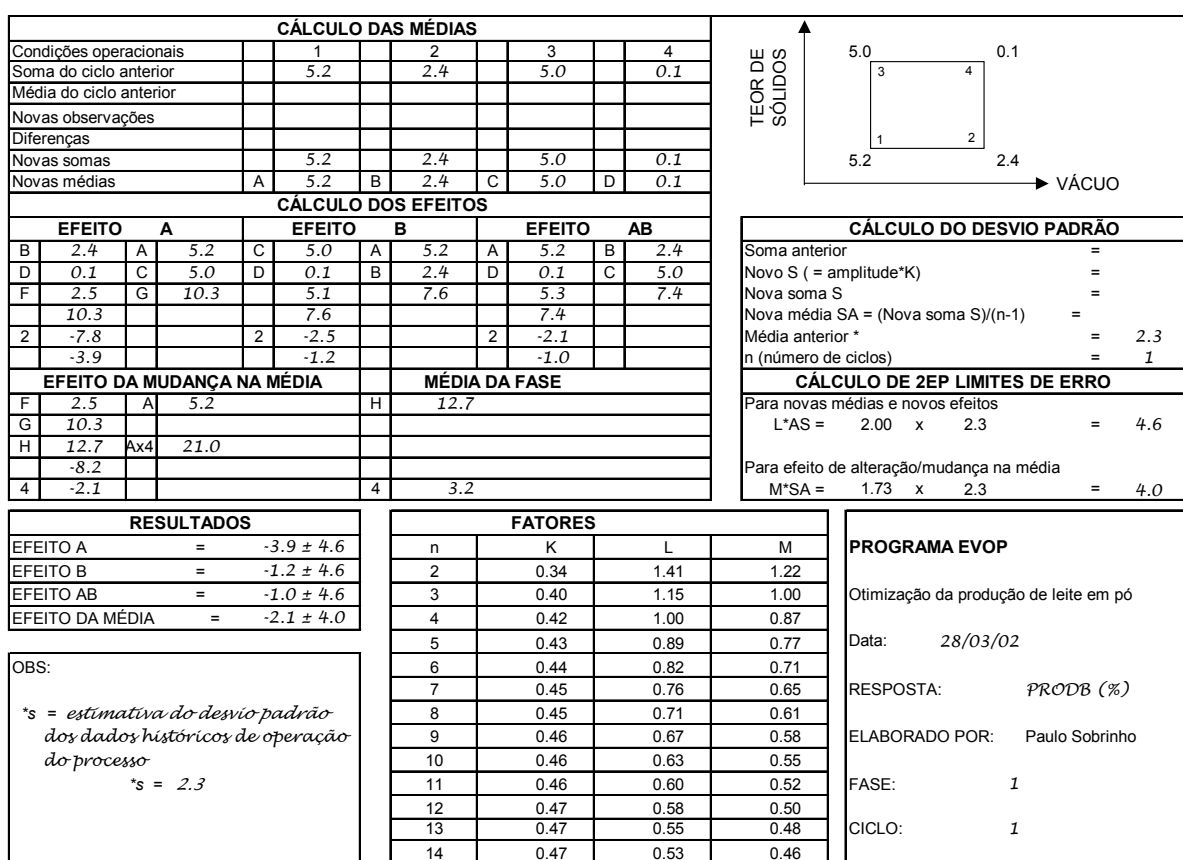


Figura 17: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 1.

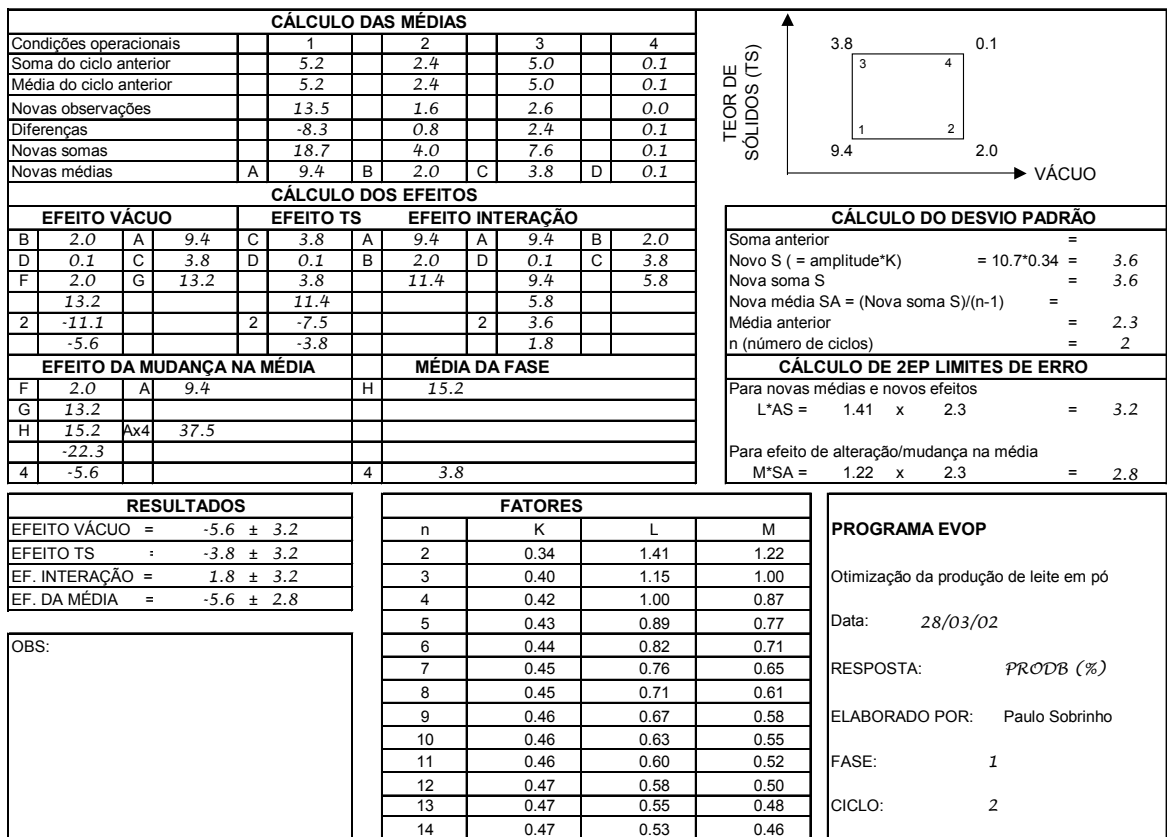


Figura 18: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 1.

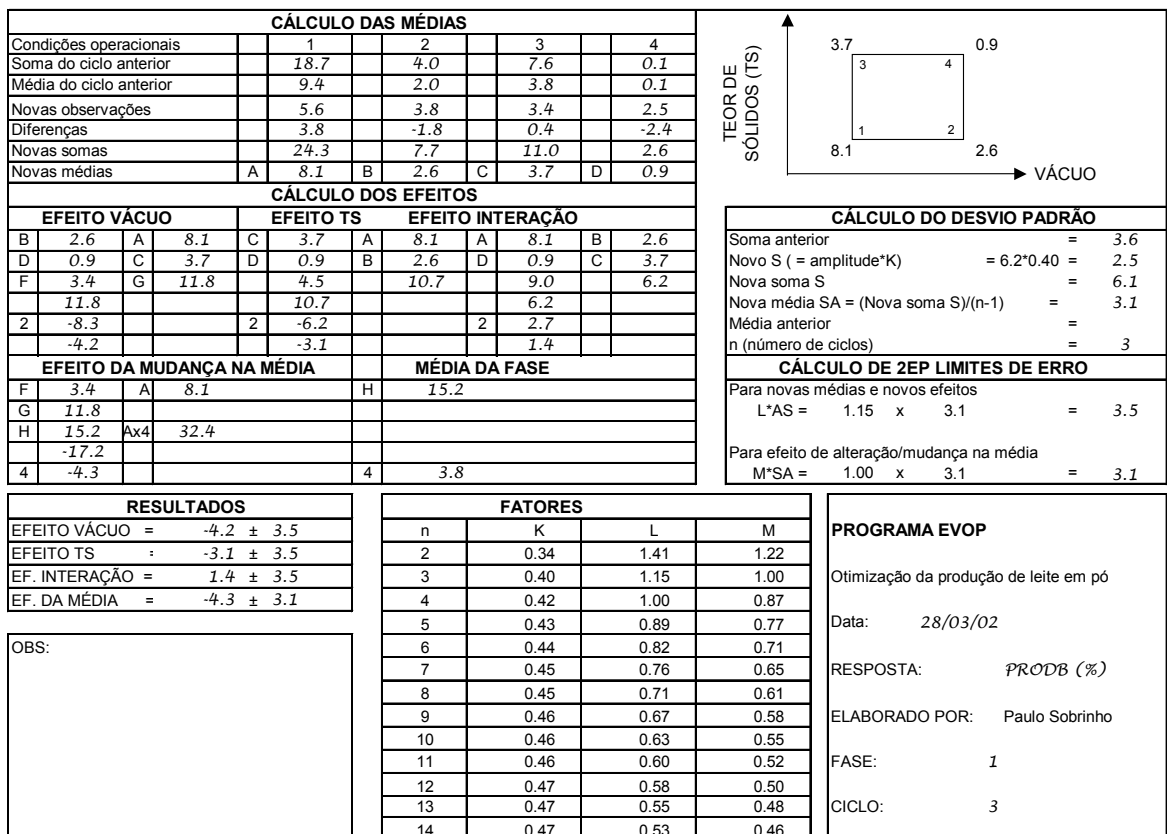


Figura 19: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 1.

CÁLCULO DAS MÉDIAS									
Condições operacionais			1		2		3		4
Soma do ciclo anterior			24.3		7.7		11.0		2.6
Média do ciclo anterior			8.1		2.6		3.7		0.9
Novas observações			9.2		8.2		8.3		0.0
Diferenças			-1.1		-5.6		-4.6		0.9
Novas somas			33.5		15.9		19.3		2.6
Novas médias	A		8.4	B		C	4.8	D	0.6

CÁLCULO DOS EFEITOS											
EFEITO VÁCUO				EFEITO TS				EFEITO INTERAÇÃO			
B	4.0	A	8.4	C	4.8	A	8.4	A	8.4	B	4.0
D	0.6	C	4.8	D	0.6	B	4.0	D	0.6	C	4.8
F	4.6	G	13.2		5.5		12.4		9.0		8.8
	13.2				12.4				8.8		
2	-8.6			2	-6.9			2	0.2		
	-4.3				-3.4				0.1		
EFEITO DA MUDANÇA NA MÉDIA				MÉDIA DA FASE							
F	4.6	A	8.4	H	17.8						
G	13.2										
H	17.8	Ax4	33.5								
	-15.7										
4	-3.9			4	4.5						

CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO	
Soma anterior	= 6.1
Novo S (= amplitude*K)	= 6.5*0.42 = 2.7
Nova soma S	= 8.8
Nova média SA = (Nova soma S)/(n-1)	= 2.9
Média anterior	=
n (número de ciclos)	= 4

CÁLCULO DE 2EP LIMITES DE ERRO	
Para novas médias e novos efeitos	
L*AS = 1.00 x 2.9	= 2.9
Para efeito de alteração/mudança na média	
M*SA = 0.87 x 2.9	= 2.6

RESULTADOS	
EFEITO VÁCUO	= -4.3 ± 2.9
EFEITO TS	= -3.4 ± 2.9
EF. INTERAÇÃO	= 0.1 ± 2.9
EF. DA MÉDIA	= -3.9 ± 2.6

FATORES			
n	K	L	M
2	0.34	1.41	1.22
3	0.40	1.15	1.00
4	0.42	1.00	0.87
5	0.43	0.89	0.77
6	0.44	0.82	0.71
7	0.45	0.76	0.65
8	0.45	0.71	0.61
9	0.46	0.67	0.58
10	0.46	0.63	0.55
11	0.46	0.60	0.52
12	0.47	0.58	0.50
13	0.47	0.55	0.48
14	0.47	0.53	0.46

PROGRAMA EVOP	
Otimização da produção de leite em pó	
Data:	28/03/02
RESPOSTA:	PRODB (%)
ELABORADO POR:	Paulo Sobrinho
FASE:	1
CICLO:	4

OBS:

PRODB é a percentagem de leite em pó com sedimento B produzido em um dia de produção

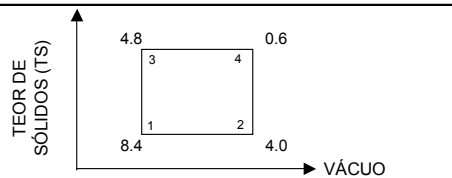
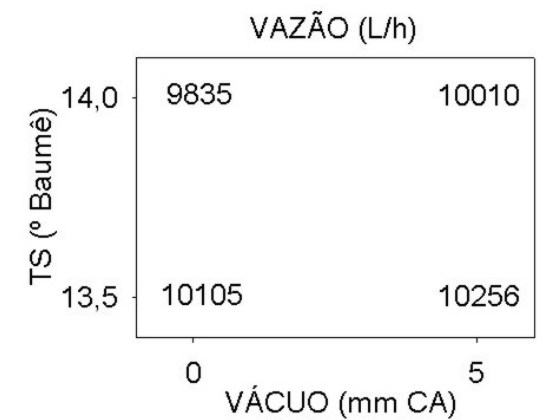
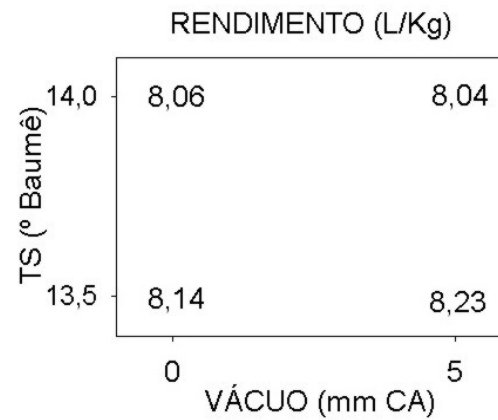
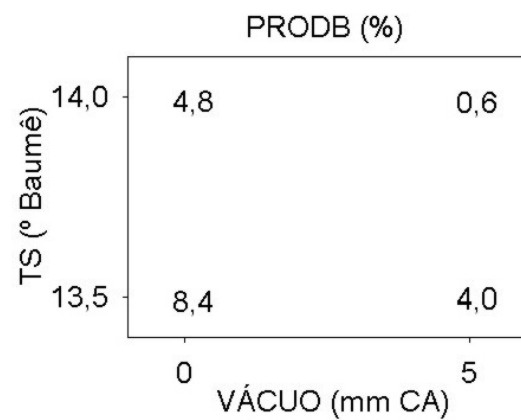


Figura 20: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 1.



Efeitos e seus limites de erro (2EP)	
Efeito TS	-3,4 ± 2,9
Efeito VÁCUO	-4,3 ± 2,9
Efeito TS x VÁCUO	0,1 ± 2,9
Efeito mudança na média	-3,9 ± 2,6

Efeitos e seus limites de erro (2EP)	
Efeito TS	-0,14 ± 0,08
Efeito VÁCUO	0,03 ± 0,08
Efeito TS x VÁCUO	-0,06 ± 0,08
Efeito mudança na média	-0,03 ± 0,07

Efeitos e seus limites de erro (2EP)	
Efeito TS	-259 ± 244
Efeito VÁCUO	163 ± 244
Efeito TS x VÁCUO	12 ± 244
Efeito mudança na média	-54 ± 213

Figura 21: Resultados da Fase I do programa EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó, após 4 ciclos.

Variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB)

Pela Figura 21, nota-se que os efeitos dos dois fatores, teor de sólidos do concentrado (TS) e vácuo produzido no secador (VÁCUO), são significativos em relação aos limites de erro, por exemplo, para o fator VÁCUO, o resultado do efeito é $-4,3 \pm 2,9$, o valor de erro está abaixo do valor do efeito obtido, isto significa que as variações do processo são menores que o efeito da variação do vácuo produzido na câmara (efeito VÁCUO). A mesma interpretação ocorre com os efeitos TS e mudança na média. Já o efeito da interação TS x VÁCUO é não significativo em relação aos limites de erro, visto que o valor de erro (2,9) está acima do valor obtido para o efeito (0,1); este resultado indica que os efeitos dos fatores são independentes. Desta forma, o aumento do fator vácuo produzido na câmara de secagem (VÁCUO) e o aumento do fator teor de sólidos do concentrado (TS) causam a diminuição da quantidade produzida de leite em pó classificado como sedimento B por dia de produção (PRODB), que é um objetivo do programa EVOP.

O sinal negativo para o valor dos efeitos dos fatores indica que o aumento da variável resposta é oposto ao aumento da variável correspondente ao efeito. Portanto, a condição de operação VÁCUO igual a 5 mmCA e TS igual a 14° Baumé, é a melhor condição de operação para a variável resposta quantidade de leite em pó produzido classificado como sedimento B (PRODB).

Variável rendimento do processo em litros por quilo (RENDIMENTO)

Pela Figura 21, nota-se que somente o efeito do fator teor de sólidos do concentrado (TS) é significativo em relação aos limites de erro, o resultado do efeito é $-0,14 \pm 0,08$, o valor de erro está abaixo do valor do efeito obtido, isto significa que as variações do processo são menores que o efeito da variação do teor de sólidos do concentrado de leite (efeito TS). Assim, somente o aumento do fator TS causa a diminuição da variável RENDIMENTO, que é desejado pelo estudo. Portanto, a condição de operação TS igual a 14° Baumé é a melhor condição de operação. Os outros efeitos não exercem nenhuma influência, estatisticamente falando, sobre a quantidade de litros de leite fluido que produz um quilograma de leite em pó (RENDIMENTO).

Variável vazão de leite fluido processado (VAZÃO)

Os resultados dos efeitos dos fatores em relação a variável resposta VAZÃO, são idênticos aos resultados obtidos para a variável RENDIMENTO, ou seja, somente o efeito do fator teor de sólidos do concentrado (TS) é significativo em relação aos limites de erro, o resultado do efeito é -259 ± 244 , o valor de erro está abaixo do valor do efeito obtido, isto significa que as variações do processo são menores que o efeito da variação do teor de sólidos do concentrado de leite (efeito TS). Assim, somente o aumento do fator TS causa a diminuição da variável resposta VAZÃO, que não é desejado pelo estudo. Portanto, a condição de operação TS igual a 13,5° Baumé é a melhor condição de operação para a vazão de leite fluido que entra no sistema de secagem, em litros por hora (VAZÃO). Os outros efeitos não exercem nenhuma influência, estatisticamente falando.

Em uma análise conjunta, após a discussão dos resultados da primeira fase para cada variável resposta em estudo no programa EVOP, conclui-se que as variações dos fatores são significativas para a melhoria do processo, principalmente para a variável PRODB; e que a melhor condição de operação indicada pela Fase I é aquela cujo teor de sólidos do concentrado (TS) é igual a 14° Baumé e o vácuo produzido na câmara igual a 5 mmCA; apesar de não ser uma condição favorável para a variável resposta VAZÃO, como discutido acima. O efeito dos fatores sobre a variável VAZÃO foi considerado secundário comparado aos resultados obtidos para as outras variáveis respostas (PRODB e RENDIMENTO).

Baseado nos resultados obtidos, concluiu-se pela realização de uma nova fase tendo a condição TS igual a 14° Baumé e VÁCUO igual a 5 mmCA como a condição de referência.

3.4.4 Resultados da Fase II do programa EVOP

A partir dos resultados da Fase I, planejou-se a Fase II. O Quadro 7 mostra as condições de operação planejadas para a segunda fase do programa EVOP. Nesta segunda fase, também foram realizados 4 ciclos, com 4 repetições, no total de 16 ensaios, com duração de 16 dias de produção. Os

níveis do fator TS foram 14 e 14,5° Baumé, para o fator VÁCUO os níveis foram 5 e 10 mmCA.

Quadro 7: Dados obtidos na Fase II do programa EVOP, para a melhoria do processo de produção de leite em pó.

Ensaio	Ciclo	TS (° Baumé)	VÁCUO (mm CA)	PRODB (%)	RENDIMENTO (L/Kg)	VAZÃO (L/h)
1	1	14,0	5	0,0	8,00	9749
2	1	14,5	5	0,3	8,19	10236
3	1	14,0	10	0,3	8,25	9232
4	1	14,5	10	0,5	8,20	10255
5	2	14,5	10	0,0	8,10	10150
6	2	14,0	10	1,4	8,09	9720
7	2	14,5	5	0,2	8,12	9960
8	2	14,0	5	3,8	7,90	9866
9	3	14,0	5	0,1	8,26	10172
10	3	14,5	5	0,0	8,26	10231
11	3	14,0	10	0,1	7,98	9485
12	3	14,5	10	0,0	8,20	10056
13	4	14,5	10	0,3	8,10	10094
14	4	14,0	10	0,0	8,38	9824
15	4	14,5	5	1,4	7,99	9974
16	4	14,0	5	2,4	7,90	9858

A Figura 22 mostra uma representação gráfica comparando as condições experimentais para as duas fases do programa EVOP.

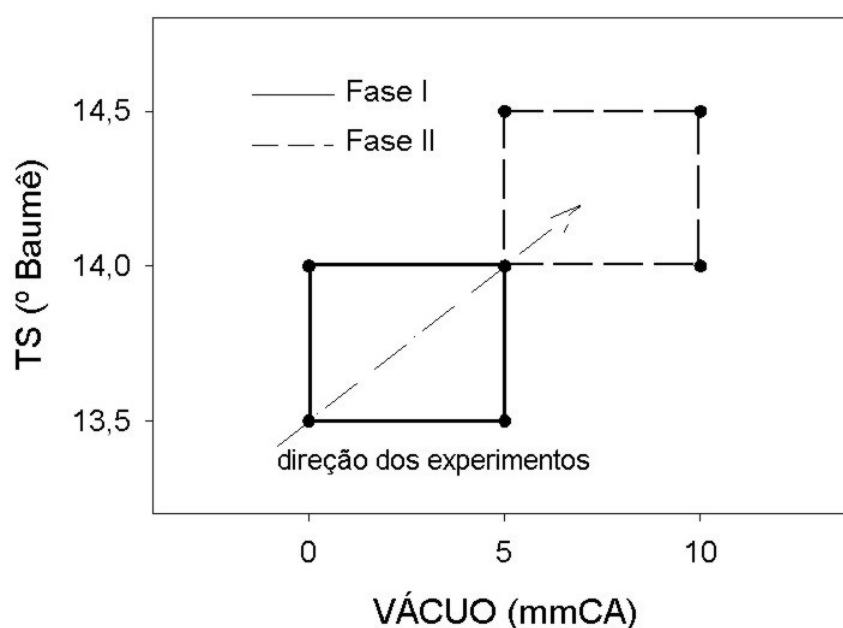


Figura 22: Representação esquemática das duas primeiras fases do programa EVOP para o processo de produção de leite em pó. Os vértices dos quadrados são as condições experimentais do planejamento EVOP.

O vértice comum às duas fases representa a melhor condição de operação da Fase I e a condição de referência para a Fase II. Na Figura 22 está indicada a direção que os experimentos devem ser conduzidos, esta direção foi tomada no sentido de procurar um valor mínimo para as variáveis PRODB e RENDIMENTO.

Para a Fase II foi utilizada a mesma metodologia de cálculo da Fase I. Deve-se ressaltar que os desvios da Fase II foram calculados utilizando a estimativa da fase anterior do erro padrão, por considerar que a operação está sob as mesmas variações (ruídos) da primeira fase.

Discussão da Fase II

Os resultados da Fase II, apresentados na Figura 27, foram extraídos das folhas de trabalho dos 4 ciclos da fase, mostrados pelas Figuras 23 a 26, para a variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB). Para as variáveis RENDIMENTO e VAZÃO, o procedimento é similar.

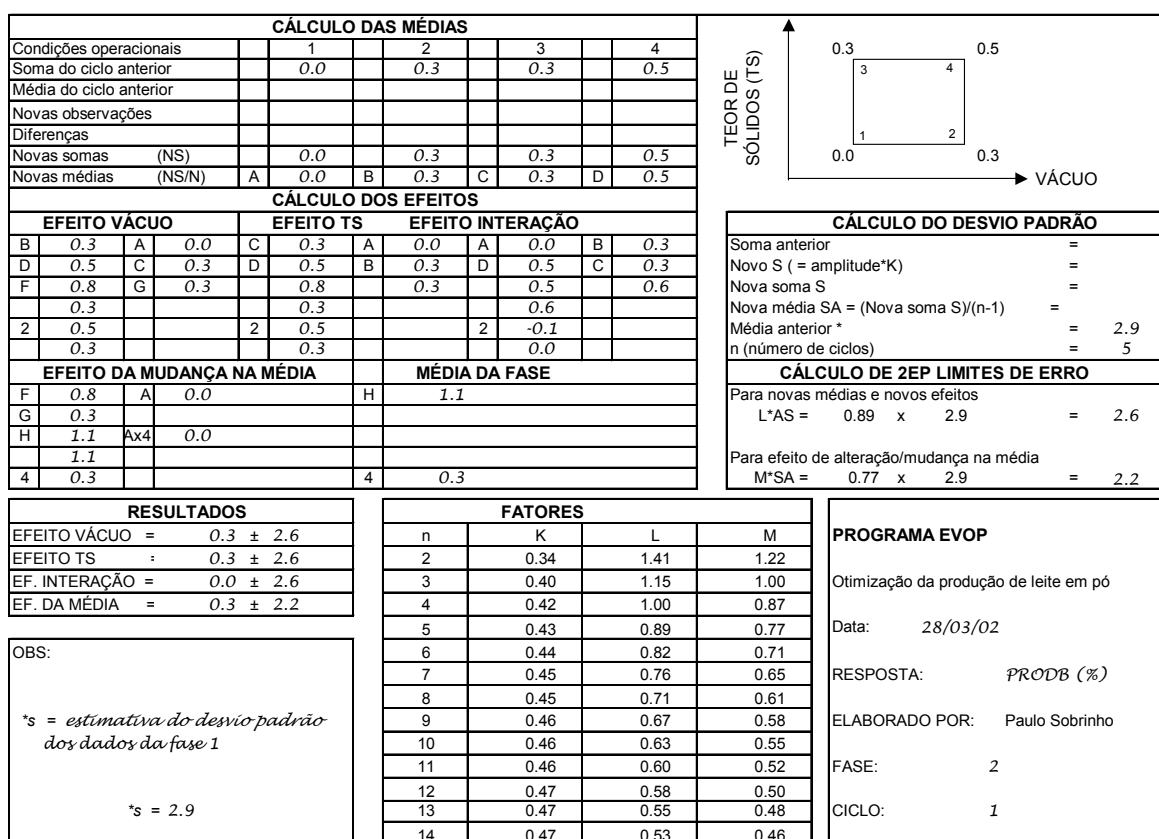


Figura 23: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 2.

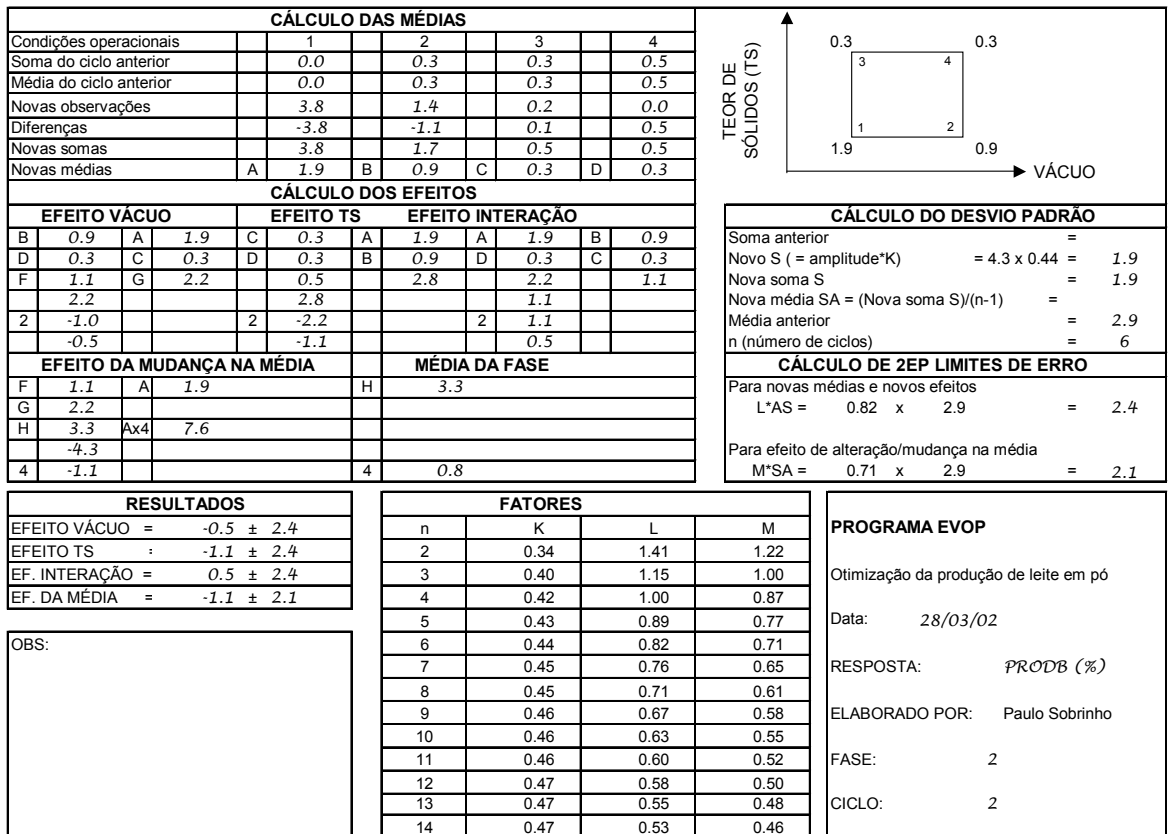


Figura 24: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 2.

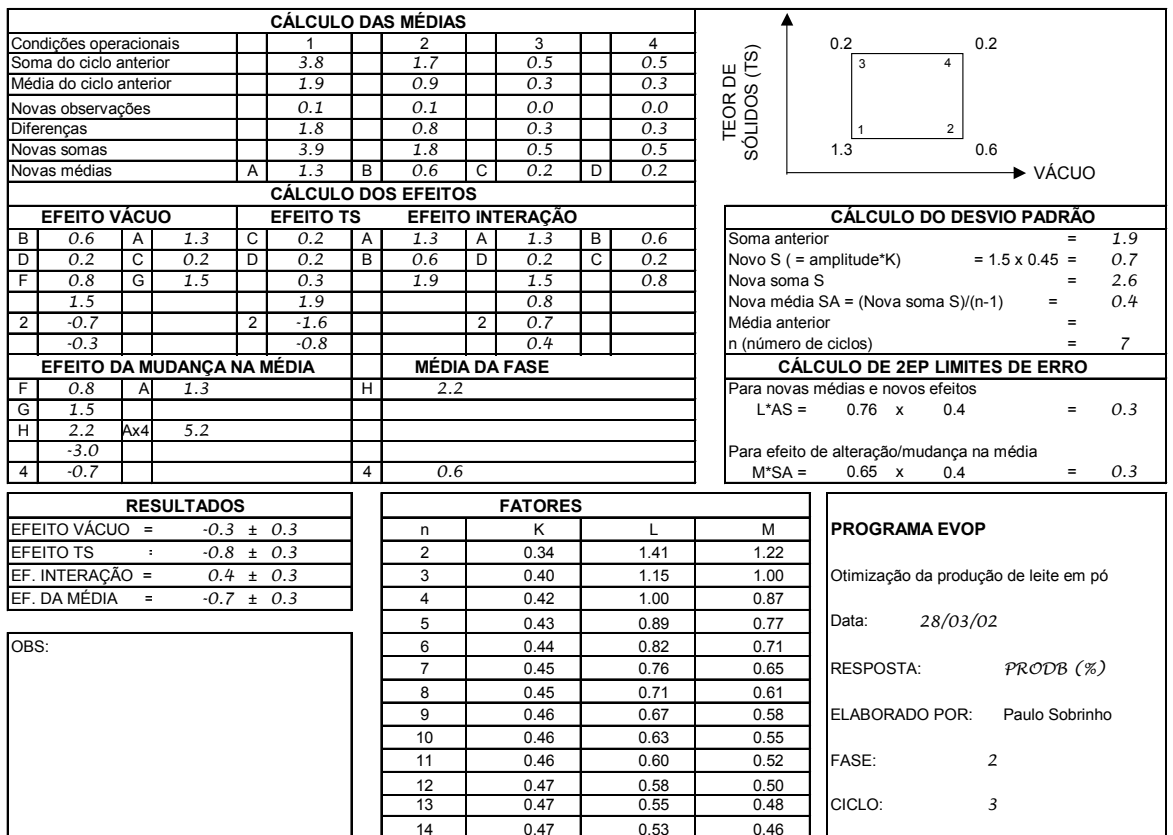


Figura 25: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 2.

CÁLCULO DAS MÉDIAS									
Condições operacionais			1		2		3		4
Soma do ciclo anterior			3.9		1.8		0.5		0.5
Média do ciclo anterior			1.3		0.6		0.2		0.2
Novas observações			2.4		0.0		1.4		0.3
Diferenças			-1.1		0.6		-1.2		-0.1
Novas somas			6.3		1.8		1.9		0.8
Novas médias	A		1.6	B	0.5	C	0.5	D	0.2

CÁLCULO DOS EFEITOS											
EFEITO VÁCUO		EFEITO TS		EFEITO INTERAÇÃO							
B	0.5	A	1.6	C	0.5	A	1.6	A	1.6	B	0.5
D	0.2	C	0.5	D	0.2	B	0.5	D	0.2	C	0.5
F	0.7	G	2.1		0.7		2.0		1.8		0.9
	2.1				2.0				0.9		
2	-1.4			2	-1.3			2	0.9		
	-0.7				-0.7				0.4		

EFEITO DA MUDANÇA NA MÉDIA				MÉDIA DA FASE				
F	0.7	A	1.6	H	2.7			
G	2.1							
H	2.7	Ax4	6.3					
	-3.6							
4	-0.9			4	0.7			

RESULTADOS			
EFEITO VÁCUO	=	-0.7	± 0.3
EFEITO TS	:	-0.7	± 0.3
EF. INTERAÇÃO	=	0.4	± 0.3
EF. DA MÉDIA	=	-0.9	± 0.3

FATORES			
n	K	L	M
2	0.34	1.41	1.22
3	0.40	1.15	1.00
4	0.42	1.00	0.87
5	0.43	0.89	0.77
6	0.44	0.82	0.71
7	0.45	0.76	0.65
8	0.45	0.71	0.61
9	0.46	0.67	0.58
10	0.46	0.63	0.55
11	0.46	0.60	0.52
12	0.47	0.58	0.50
13	0.47	0.55	0.48
14	0.47	0.53	0.46

CÁLCULO DO DESVIO PADRÃO	
Soma anterior	= 2.6
Novo S (= amplitude*K)	= 1.8 x 0.45 = 0.8
Nova soma S	= 3.4
Nova média SA = (Nova soma S)/(n-1)	= 0.5
Média anterior	=
n (número de ciclos)	= 8

CÁLCULO DE 2EP LIMITES DE ERRO	
Para novas médias e novos efeitos	
L*AS = 0.71 x 0.5	= 0.3
Para efeito de alteração/mudança na média	
M*SA = 0.61 x 0.5	= 0.3

PROGRAMA EVOP	
Otimização da produção de leite em pó	
Data:	28/03/02
RESPOSTA:	PRODB (%)
ELABORADO POR:	Paulo Sobrinho
FASE:	2
CICLO:	4

OBS:	

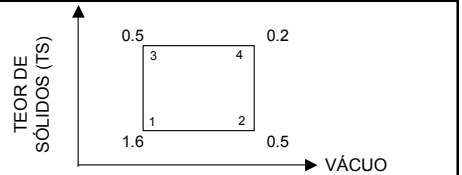
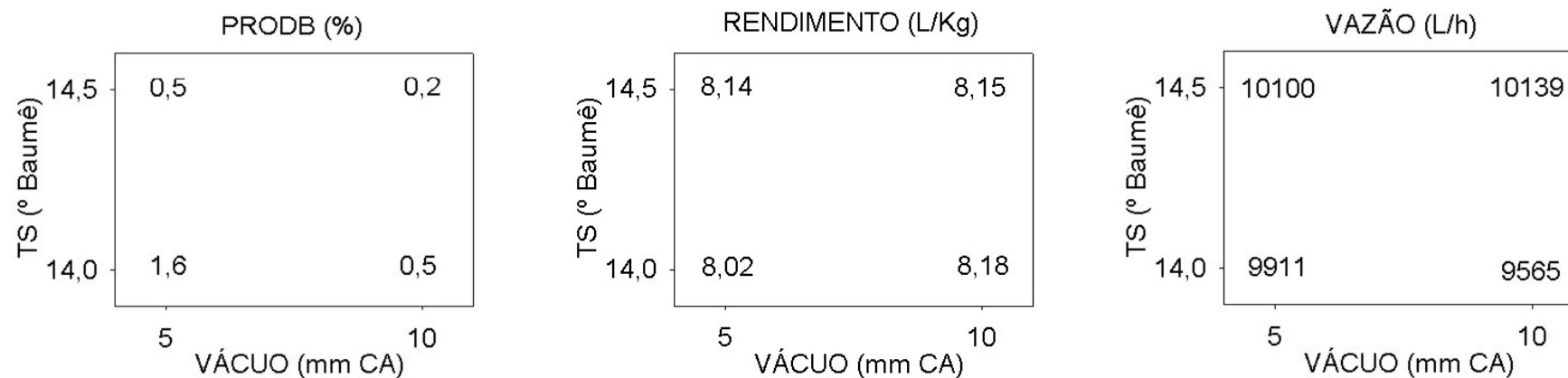


Figura 26: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 2.



Efeitos e seus limites de erro (2EP)		Efeitos e seus limites de erro (2EP)		Efeitos e seus limites de erro (2EP)	
Efeito TS	-0,7 ± 0,3	Efeito TS	0,05 ± 0,05	Efeito TS	381 ± 81
Efeito VÁCUO	-0,7 ± 0,3	Efeito VÁCUO	0,08 ± 0,05	Efeito VÁCUO	-154 ± 81
Efeito TS x VÁCUO	0,4 ± 0,3	Efeito TS x VÁCUO	-0,08 ± 0,05	Efeito TS x VÁCUO	192 ± 81
Efeito mudança na média	-0,9 ± 0,3	Efeito mudança na média	0,11 ± 0,04	Efeito mudança na média	18 ± 69

Figura 27: Resultados da Fase II do programa EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó, após 4 ciclos.

Variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB)

Pela Figura 27, nota-se que todos os efeitos foram significativos. Como a interação foi significativa, implica que os fatores não são independentes, com isso, não é possível avaliar o efeito de cada fator individualmente, sobre a variável resposta PRODB. Desta forma, é necessário avaliar a variável resposta dentro de cada um dos quatro tratamentos da fase. Os valores negativos para os efeitos dos fatores TS e VÁCUO, indicam que um aumento nos níveis dessas variáveis reduzirá a quantidade produzida de leite em pó com sedimento B. A Figura 27 mostra que a melhor condição de operação para se obter a menor quantidade de leite em pó com sedimento B é o nível de 14,5°Baumé para o fator TS e o nível de 10 mmCA para o fator VÁCUO.

O efeito mudança na média negativo indica que a quantidade de leite em pó com sedimento B produzida na condição de referência da Fase II (TS igual a 14° Baumé e VÁCUO igual a 5 mmCA) é maior que a média das quantidades obtidas nos quatro pontos da fase, isto é, existe possibilidade de redução do tempo na superfície de resposta delimitada nesta segunda fase.

Variável rendimento do processo em litros por quilo (RENDIMENTO)

Na Fase II, as variações significativas foram o efeito do VÁCUO ($0,08 \pm 0,05$), da interação ($-0,08 \pm 0,05$) e da mudança na média ($0,11 \pm 0,04$). Já o efeito do teor de sólidos do concentrado (TS) foi não significativo ($0,05 \pm 0,05$), pois os limites de erro foram maiores ou iguais ao valor do efeito. Devido ao sinal positivo do efeito da variável VÁCUO, conclui-se que um aumento nos níveis desta variável, promoverá o aumento do RENDIMENTO do processo, sendo portanto, indesejado para o estudo, visto que o aumento da variável resposta RENDIMENTO é uma condição de restrição do estudo.

Comparando o efeito da mudança média da Fase I ($-0,03 \pm 0,07$) com o valor da Fase II ($0,11 \pm 0,04$), verifica-se que ocorre uma inversão de sinal, indicando a possibilidade de se ter um ponto mínimo na superfície de resposta. Com este tipo de variação, conclui-se que ainda não é possível definir uma tendência em relação a efeito mudança na média. Esta tendência poderá ser verificada com a continuidade do experimento em uma nova fase.

Portanto, a melhor condição de operação para a variável resposta RENDIMENTO, é a condição de referência, fator TS no nível 14°Baumé e o fator VÁCUO no nível 5 mmCA.

Variável vazão de leite fluido processado (VAZÃO)

Os efeitos do fator TS, VÁCUO e da interação foram significativos para a vazão de leite fluido que entra no sistema de secagem, pois os limites de erro foram maiores que as variações devido ao efeito dos fatores. O efeito mudança na média não foi significativo. Sendo a interação dos fatores significativa, estes não são independentes. Sendo assim, analisando um fator nos níveis do outro fator, ou seja, analisando individualmente os tratamentos do planejamento fatorial 2², empregado na fase do programa EVOP, cujo os resultados são mostrados na Figura 27 conclui-se que a melhor condição de operação para a variável VAZÃO na Fase II é dada por TS igual a 14,5°Baumé e VÁCUO igual a 10 mmCA.

Na análise final dos resultados da Fase II, após discussão dos resultados, observa-se que as variáveis respostas PRODB e VAZÃO tiveram a melhor condição de operação como os mesmos níveis dos fatores, isto é, 14,5° Baumé e 10 mmCA são os níveis dos fatores que minimiza a produção de leite em pó com sedimento B (PRODB) e maximiza a vazão de leite fluido que entra no sistema de secagem (VAZÃO), condições que são desejadas para o processo. Já a variável RENDIMENTO, apresenta sua condição ótima na Fase II, com os níveis 14° Baumé para TS e 5 mmCA para o VÁCUO. Portanto, a variável RENDIMENTO é otimizada em condição oposta a condição de otimização das outras duas variáveis resposta.

Após avaliação, decidiu-se explorar o efeito dos fatores sobre as variáveis respostas por meio da realização de uma nova fase no programa EVOP.

3.4.5 Resultados da Fase III do programa EVOP

O Quadro 8 mostra as condições de operação para a terceira fase do programa EVOP, planejadas a partir dos resultados da Fase II. Nesta terceira fase, também foram realizados 4 ciclos, com 4 repetições, no total de 16

ensaios, com duração de 16 dias de produção. Os níveis do fator TS foram 14,5 e 15° Baumé, para o fator VÁCUO os níveis foram 10 e 15 mmCA.

Quadro 8: Dados obtidos na Fase III do programa EVOP, para a melhoria do processo de produção de leite em pó.

Ensaio	Ciclo	TS (° Baumé)	VÁCUO (mm CA)	PRODB (%)	RENDIMENT O (L/Kg)	VAZÃO (L/h)
1	1	14,5	10	1,2	8,16	10259
2	1	15,0	10	1,6	8,07	10167
3	1	14,5	15	0,0	8,44	9506
4	1	15,0	15	0,2	8,05	10125
5	2	15,0	15	0,1	8,37	9409
6	2	14,5	15	0,1	8,48	9783
7	2	15,0	10	1,6	7,99	9864
8	2	14,5	10	0,2	8,07	10022
9	3	14,5	10	0,5	8,30	10175
10	3	15,0	10	2,1	8,21	10093
11	3	14,5	15	0,3	8,18	9973
12	3	15,0	15	0,3	8,13	9950
13	4	15,0	15	0,0	8,25	9950
14	4	14,5	15	0,1	8,20	10399
15	4	15,0	10	0,5	8,28	9898
16	4	14,5	10	0,6	8,15	9951

A Figura 28 mostra uma representação gráfica comparando as condições experimentais das três fases do programa EVOP.

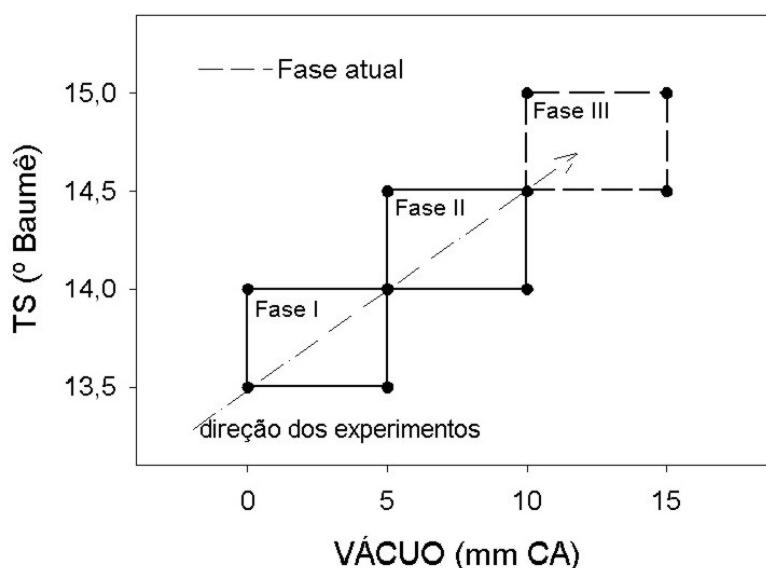


Figura 28: Representação esquemática das três fases do programa EVOP para o processo de produção de leite em pó. Os vértices dos quadrados são as condições experimentais do planejamento EVOP.

O vértice comum as Fases II e III representa a melhor condição de operação da Fase II e a condição de referência para a Fase III. Na Figura 28 está indicada a direção que os experimentos devem ser conduzidos, esta direção foi tomada no sentido de procurar um valor mínimo para as variáveis PRODB e RENDIMENTO e um máximo para a variável VAZÃO.

A metodologia de cálculo da Fase III foi a mesma utilizada na Fase II. Sendo que os desvios da Fase III foram calculados utilizando a estimativa da fase anterior do erro padrão, por considerar que a operação está sob as mesmas variações (ruídos) das duas primeiras fases.

Discussão da Fase III

Na Figura 33 são apresentados os resultados da Fase III, que foram extraídos das folhas de trabalho dos 4 ciclos da fase, mostrados nas Figuras 29 a 32, para a variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB). Para as variáveis RENDIMENTO e VAZÃO, o procedimento é similar.

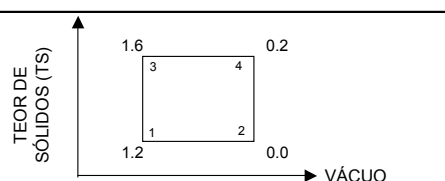
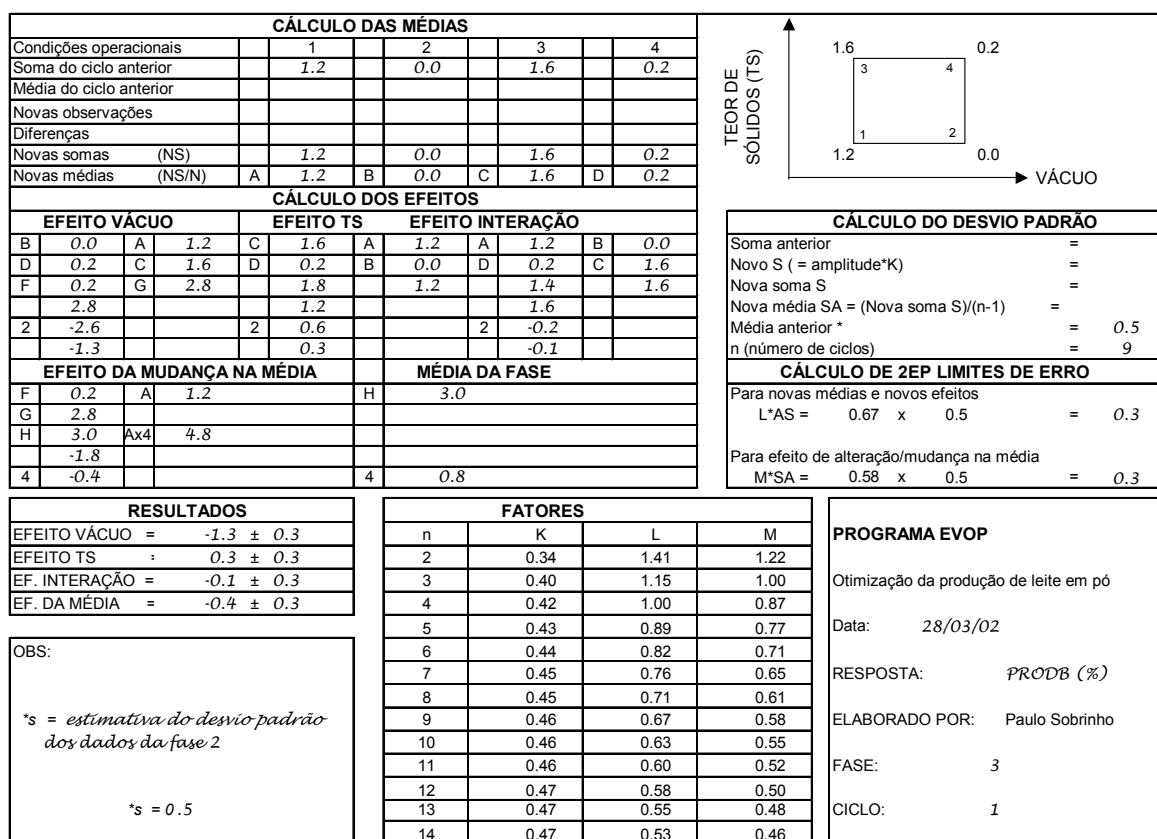


Figura 29: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 3.

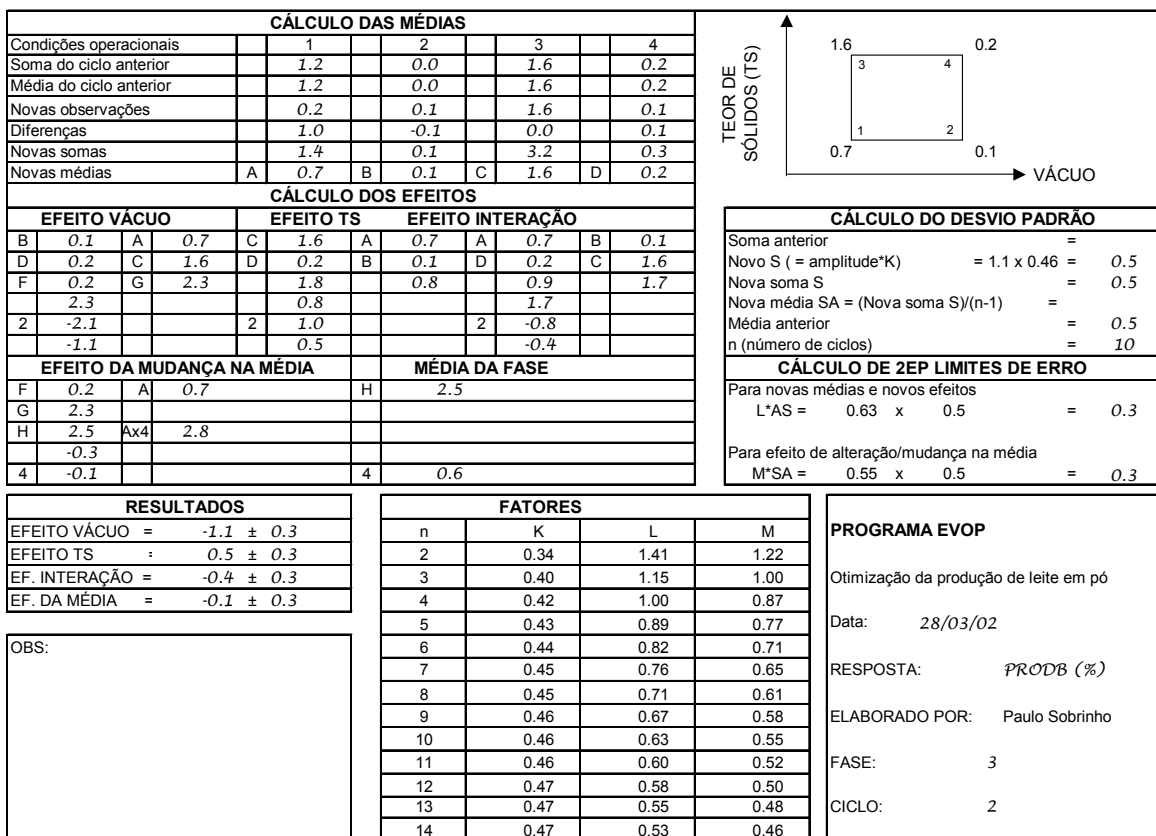


Figura 30: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 3.

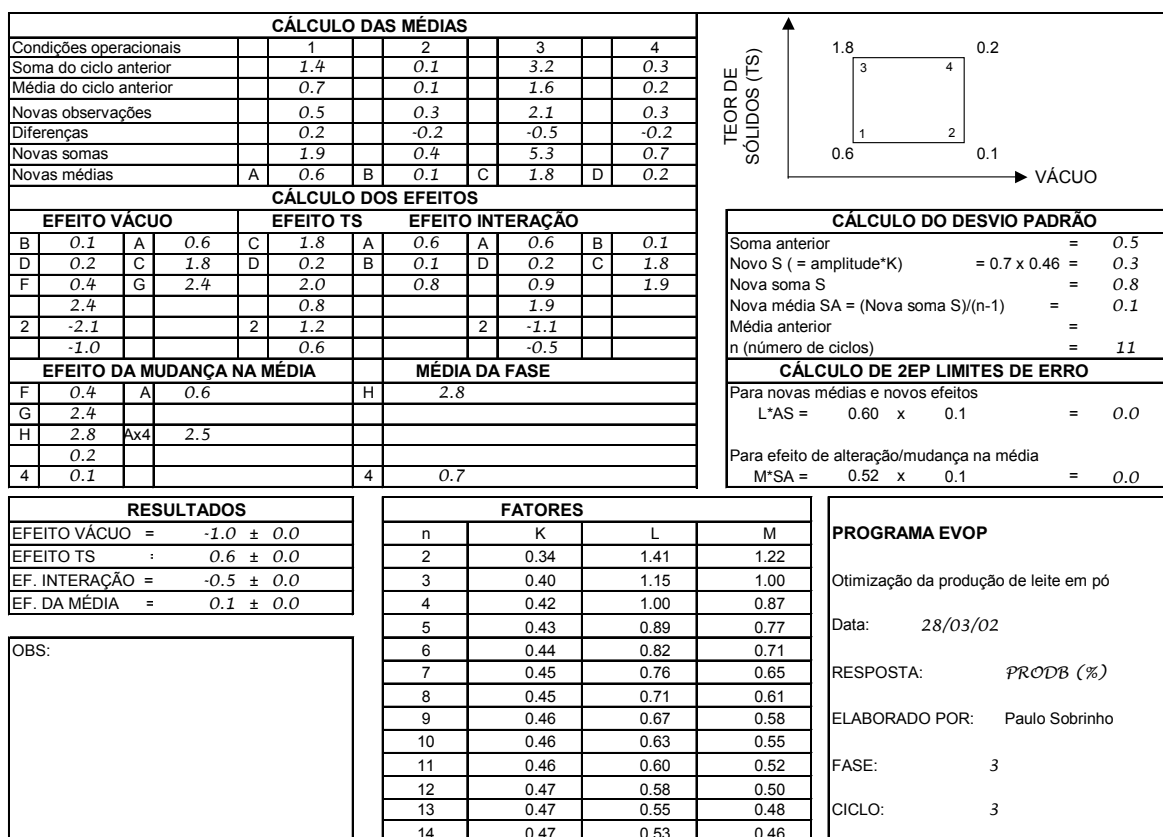


Figura 31: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 3.

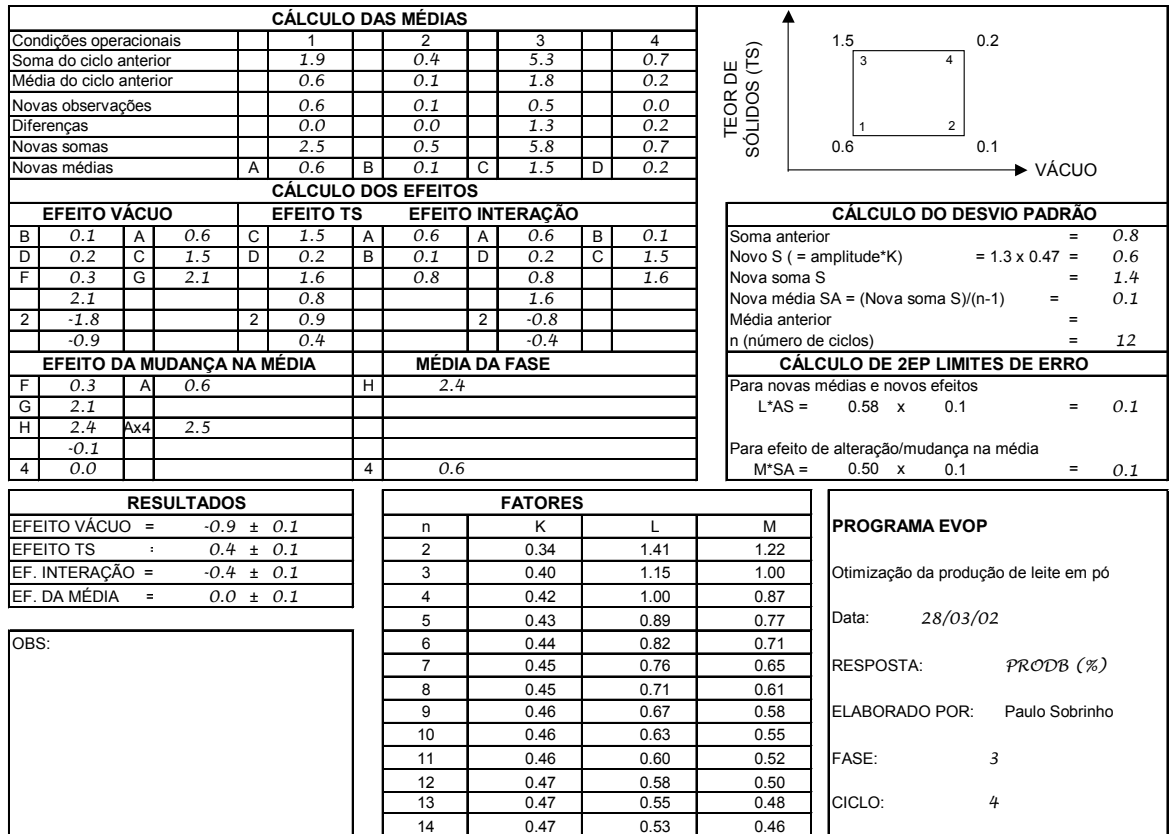
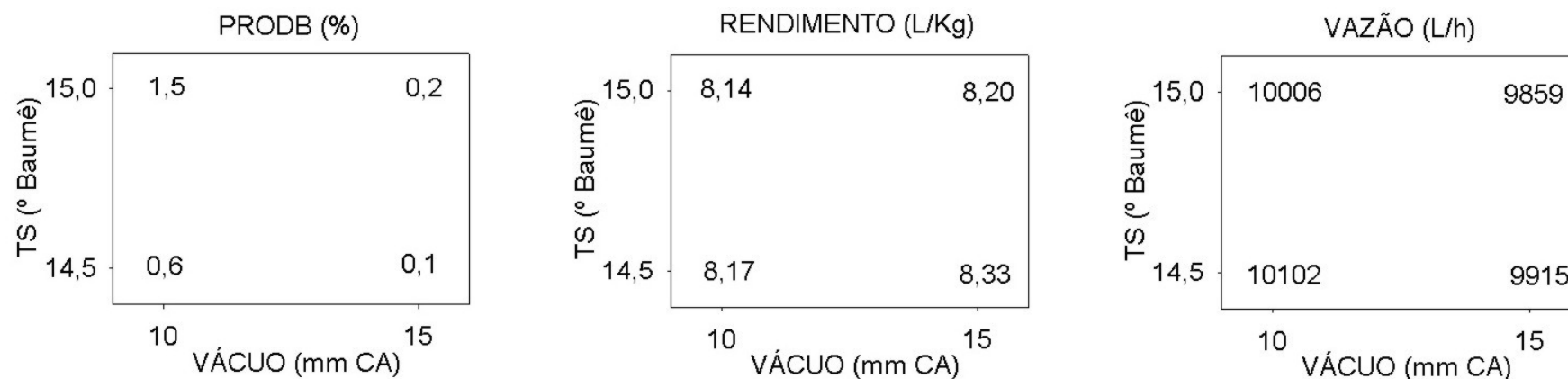


Figura 32: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 3.



Efeitos e seus limites de erro (2EP)		Efeitos e seus limites de erro (2EP)		Efeitos e seus limites de erro (2EP)	
Efeito TS	0,4 ± 0,1	Efeito TS	-0,08 ± 0,03	Efeito TS	-77 ± 49
Efeito VÁCUO	-0,9 ± 0,1	Efeito VÁCUO	0,11 ± 0,03	Efeito VÁCUO	-167 ± 49
Efeito TS x VÁCUO	-0,4 ± 0,1	Efeito TS x VÁCUO	-0,05 ± 0,03	Efeito TS x VÁCUO	20 ± 49
Efeito mudança na média	0,0 ± 0,1	Efeito mudança na média	0,04 ± 0,03	Efeito mudança na média	-132 ± 42

Figura 33: Resultados da Fase III do programa EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó, após 4 ciclos.

Variável produção de leite em pó com sedimento B (PRODB)

Pela Figura 33, nota-se que todos os efeitos, exceto mudança na média foram significativos. Como a interação foi significativa, implica que os fatores não são independentes, com isso, não é possível avaliar o efeito de cada fator individualmente, sobre a variável resposta PRODB. O valor positivo para o efeito do fator TS indica que um aumento deste fator aumentará o valor da variável PRODB, o que é indesejado. Já um aumento do fator VÁCUO, diminuirá a quantidade de leite em pó com sedimento B. A melhor condição de operação para se obter a menor quantidade de leite em pó com sedimento B é o nível de 14,5°Baumé para o fator TS e o nível de 15 mmCA para o fator VÁCUO.

Variável rendimento do processo em litros por quilo (RENDIMENTO)

Pela Figura 33, as variações de todos os efeitos foram significativas. O aumento do teor de sólidos (TS) promove uma diminuição no valor da variável resposta RENDIMENTO, enquanto que um aumento do vácuo promove um aumento do rendimento do processo.

Portanto, a melhor condição de operação para a variável resposta RENDIMENTO, é a condição de referência, fator TS no nível 15°Baumé e o fator VÁCUO no nível 10 mmCA.

Variável vazão de leite fluido processado (VAZÃO)

Pelos resultados apresentados na Figura 33, os efeitos dos fatores TS e VÁCUO foram significativos para a vazão de leite fluido que entra no sistema de secagem. O efeito da interação dos fatores não foi significativo, portanto, estes são independentes.

Fazendo uma comparação do efeito mudança média nas três fases, cujo valores são -54, 18 e -132, respectivamente; verifica-se que ocorre uma inversão de sinal, indicando a possibilidade de se ter um ponto mínimo ou máximo na superfície de resposta, no caso da variável VAZÃO, o ponto é de máximo na Fase II, visto que na Fase III o efeito mudança na média foi

significativo e negativo, indicando que o valor médio da vazão na Fase III é menor que o valor na condição de referência, que foi a condição ótima da Fase II.

Portanto, a melhor condição de operação para a variável resposta vazão, é a condição de referência, isto é, o fator TS no nível 14,5°Baumé e o fator VÁCUO no nível 10 mmCA.

3.4.6 Resultados obtidos ao final das três fases do programa EVOP

Na análise final dos resultados da Fase III, optou-se pela condição descrita pelo teor de sólidos igual a 14,5° Baumé e pelo vácuo produzido na câmara de secagem igual a 10 mmCA. Devido as seguintes considerações:

- A condição ótima para a variável resposta PRODB, TS igual a 14,5° Baumé e VÁCUO igual a 15 mmCA, esta foi uma condição experimental que se teve muita dificuldade no controle do teor de umidade do produto final (máximo de 3,5%), visto que a umidade é controlada, fundamentalmente, pela temperatura de saída de ar da câmara de secagem, que por sua vez é controlada indiretamente pela temperatura de entrada de ar na câmara. Como a temperatura de entrada de ar já trabalha na sua condição máxima, fica muito difícil controlar a temperatura de saída. Para se obter os resultados dos 4 ciclos do programa EVOP nesta condição, foram necessários vários dias de tentativas. Fato semelhante ocorreu para a condição TS igual a 15° Baumé e VÁCUO igual a 15 mmCA. Desta forma, conclui-se que houve dificuldades operacionais para manter as especificações do produto final quando se trabalha com o fator VÁCUO no nível 15 mmCA.
- A condição ótima de operação para a variável VAZÃO é dada por TS igual a 13,5° Baumé e VÁCUO igual a 5 mmCA. No entanto, para esta condição, a quantidade de leite em pó com sedimento B produzida é, em média, 4% da produção diária, o que não é de interesse do estudo.

- A condição ótima para a variável resposta RENDIMENTO na Fase III, TS igual a 15° Baumé e VÁCUO igual a 10 mmCA, apresenta uma média para o rendimento do processo muito próxima da média do processo na condição de referência para os ensaios realizados nas Fases II e III (8,16 L/Kg). No entanto, esta tendência poderá ser verificada na realização de um maior número de ciclos para a Fase III.

Os resultados obtidos nas três fases do programa EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó por meio do sistema de secagem por atomização, são resumidos pela Figura 34, que mostra a melhor condição para cada variável resposta nas três fases do planejamento EVOP.

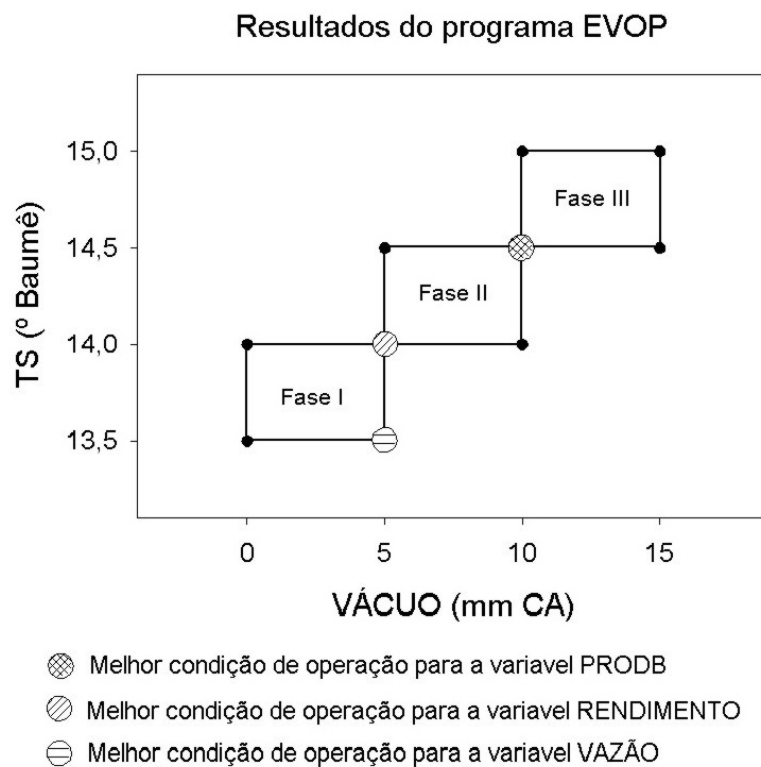


Figura 34: Resultados do programa EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó.

Após discussão dos resultados do programa EVOP, conclui-se que a condição ótima de operação após as três fases é aquela cujo teor de sólidos do concentrado de leite (TS) é igual a 14,5° Baumé e o vácuo produzido na câmara de secagem (VÁCUO) é igual a 10 mmCA, visto que tomou-se como

prioridade a variável resposta PRODB, ou seja, a quantidade de leite em pó com sedimento B produzida diariamente.

A fim de se ter uma comparação do processo antes do EVOP e com o programa EVOP, foram construídos gráficos das medidas individuais das variáveis respostas em questão. A Figura 35 mostra estes gráficos.

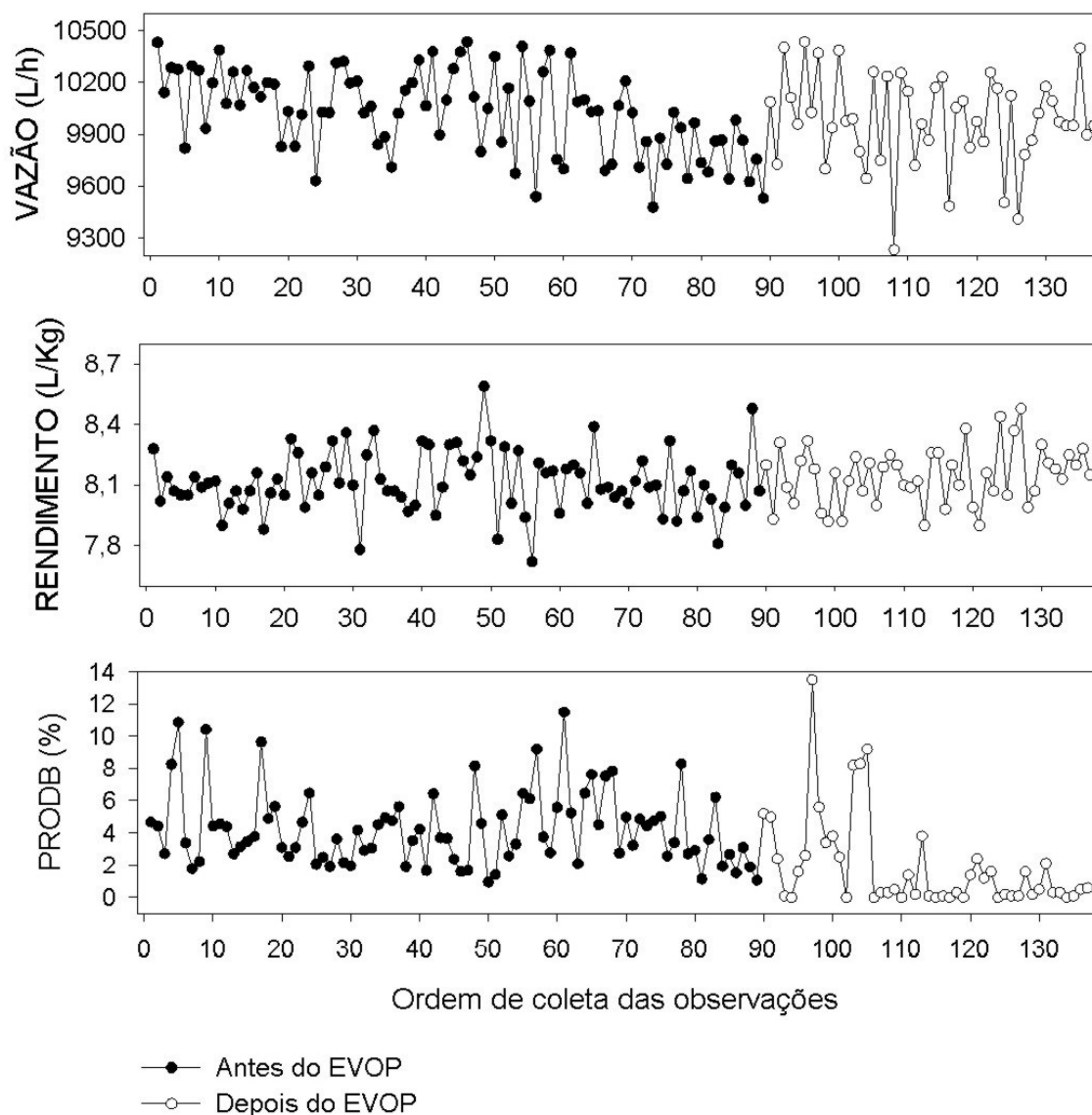


Figura 35: Gráficos das medidas individuais das variáveis em estudo, com dados anteriores e durante a aplicação do programa EVOP, para melhoria do processo de produção de leite em pó.

Para obter uma avaliação mais precisa da utilização do método EVOP na melhoria do processo de produção de leite em pó, verificou-se a significância estatística para cada variável resposta estudada antes e após a utilização do programa EVOP, por meio do teste t ao nível de 5% de probabilidade. Após a Fase III do programa EVOP, o processo passou a operar

na condição ótima indicada pelo EVOP. Os dados coletados durante a utilização do programa EVOP são formados pelas 48 observações das três fases do programa e os dados após o EVOP são formados por 10 observações depois de concluída a Fase III do programa, com o processo operando na condição ótima estimada pelo EVOP.

Os resultados dos testes t para as variáveis respostas são apresentados no Quadro 9.

Quadro 9: Teste t para as variáveis respostas (PRODB, RENDIMENTO e VAZÃO) antes e após o programa EVOP.

VARIÁVEIS		Antes do EVOP	Após o EVOP
VAZÃO	Observações	89	10
	Média	10024	10074
	Variância	59667	25240
	Teste F para igualdade de variâncias		
	Prob > F	0,136	
	Hipótese da diferença de média	0	
	Teste t	0,517	
RENDIMENTO	Observações	89	10
	Média	8,11	8,10
	Variância	0,02	0,02
	Teste F para igualdade de variâncias		
	Prob > F	0,847	
	Hipótese da diferença de média	0	
	Teste t	0,735	
PRODB	Observações	89	10
	Média	4,23	0,25
	Variância	5,36	0,01
	Teste F para igualdade de variâncias		
	Prob > F	0,00	
	Hipótese da diferença de média	0	
	Teste t	0,00	

Para a variável VAZÃO, a hipótese de nulidade foi testada e a probabilidade de que não houve alteração na média da vazão de leite fluido que entra no sistema de secagem antes e após o programa EVOP é de 51,7%, ou seja, estatisticamente o programa EVOP não trouxe melhoria para a variável VAZÃO, pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

De forma semelhante à variável VAZÃO, não houve alteração na média do rendimento do processo (RENDIMENTO) antes e após o programa EVOP, com uma probabilidade para igualdade de médias de 73,5%, ou seja, estatisticamente o programa EVOP não trouxe melhoria para a variável RENDIMENTO, pelo teste t ao nível de 5% de probabilidade.

No teste t para a variável PRODB, a hipótese de nulidade foi testada e a probabilidade de que não houve alteração nas médias da quantidade de leite em pó com sedimento B produzida antes e após o programa EVOP é menor que 1% ($P < 0.01$), ou seja, estatisticamente o programa EVOP trouxe melhoria para a variável PRODB, pelo teste t ao nível de 1% de probabilidade.

Apesar do método EVOP não promover a melhoria da vazão de leite fluido e do rendimento do processo, sua utilização foi muito bem sucedida, visto que o objetivo principal era minimizar a quantidade de leite em pó com sedimento B produzida. Para otimizar as variáveis resposta RENDIMENTO e VAZÃO, sugere-se explorar novas variáveis de processo por meio da realização de um novo programa EVOP; visto que as variáveis independentes estudadas, vácuo produzido na câmara de secagem e teor de sólidos do concentrado, podem não ter influência sobre a vazão e o rendimento do processo.

3.5 Conclusões

3.5.1 Quanto a Melhoria do Processo

Com utilização do método EVOP verificou-se a redução da quantidade de leite em pó classificada como sedimento B de 4,23% para 0,25% da produção diária, por meio do estudo do efeito das variáveis: teor de sólidos do concentrado (TS) e vácuo produzido na câmara de secagem (VÁCUO). Já para as variáveis respostas, vazão de leite fluido processado (VAZÃO) e rendimento do processo de secagem (RENDIMENTO), não foram verificadas melhorias, ou seja, os efeitos do teor de sólidos do concentrado e do vácuo na câmara de secagem não foram significativos para estas variáveis.

A vazão de leite fluido processado é uma variável muito dependente da qualidade da matéria-prima, apresentando com isso, uma grande variabilidade. Já o rendimento do processo de secagem está diretamente relacionado a composição da matéria-prima.

A aplicação do método EVOP na produção de leite em pó mostrou ser uma ferramenta eficaz para alcançar a condição ótima de operação, visto que reduziu a nível satisfatório a quantidade de leite em pó classificada como sedimento B; não produziu leite em pó fora dos padrões de especificação, não houve interrupções da produção e foi operacionalizada como um mínimo de custo.

3.5.2 Quanto ao uso do método EVOP

O método Operação Evolutiva (EVOP) mostrou ser uma ferramenta operacional de fácil tratamento e que pode ser utilizada para qualquer tipo de processo que seja possível impor pequenas variações nas variáveis de controle. Mesmo que inicialmente sejam identificadas variações que aparentemente estão encobertas pelas variáveis ruído do processo, os efeitos das variáveis de controle se sobressaem devido ao efeito de repetição dos ciclos, diminuindo o erro padrão e, conseqüentemente, os limites de erro ou intervalo de confiança.

Com relação a estatística empregada no método, a maioria das pessoas envolvidas no programa, não tinham nenhum conhecimento estatístico, o que dificultou a difusão do método, apesar da relativa simplicidade dos cálculos,

que foram todos feitos por meio da planilha eletrônica Excel (Microsoft® Excel versão 2000).

No entanto, com relação a estrutura de organização do método, não foi observado um empenho da alta administração da empresa em motivar e acompanhar o processo de implantação do EVOP; não houve cobrança nem estímulo por parte dos supervisores de produção, os quais não mostraram interesse pelo trabalho. Os operadores, sem conhecimento técnico do processo, não foram estimulados a sugerir mudanças. Diante disto, o trabalho foi desenvolvido, basicamente, por um grupo formado pelo pesquisador, pela engenheira responsável, pelo chefe de controle de qualidade e por um supervisor de produção, com a colaboração de alguns operadores. Portanto, do ponto de vista da gestão do método EVOP, este trabalho não foi completamente aplicado.

As principais razões para que a metodologia não tenha sido completamente aplicada, do ponto de vista da gestão do método, são:

- Resistência em perturbar as variáveis do processo;
- Falta de pessoal adequado, das pessoas ligadas diretamente ao processo de produção, somente a gerente e um supervisor de produção tem formação técnica na área; enquanto que os operadores possuem baixa escolaridade;
- Falta de conhecimento do processo;
- Mudanças na estrutura administrativa, impossibilitando o suporte da administração no processo de melhoria.

Desta forma, devido as razões citadas anteriormente, a difusão da metodologia EVOP pode não se tornar o método de operação do processo de produção de leite em pó na empresa, mas mostrou ser uma ferramenta de melhoria bastante eficiente para otimização de processos diretamente na linha de produção.

Além da melhoria da quantidade de leite em pó com sedimento B produzida, outros fatores de melhoria foram obtidos com a utilização do método EVOP, como por exemplo: melhor conhecimento do processo de produção de leite, obtendo-se com isso um melhor controle de processo, abertura para outras oportunidade de melhoria, principalmente de outros processos da indústria.

4. CONCLUSÕES GERAIS

Na década de 90, devido a queda das barreiras a importação; busca de mercados internacionais; competitividade globalizada, queda da inflação e integração internacional fizeram com que qualidade e produtividade passassem a estar entre os principais objetivos da indústria de alimentos.

A melhoria contínua de processos como todo enfoque da qualidade, é gerido por um modelo de gestão que visa estruturar o modo de trabalho utilizados na implantação de ferramentas de controle de qualidade. Os modelos atuais de gestão, com foco na qualidade total, buscam a qualidade sistêmica em todas as etapas de produção. Para isto, há a necessidade de algumas características como motivação das chefias e funcionários, treinamento e envolvimento dos funcionários, equipes multifuncionais.

As principais dificuldades da indústria de alimentos na adoção de sistemas de qualidade estão focadas em seu processo de gestão, principalmente devido a dificuldade das empresas alimentícias em contratar pessoal especializado e também devido ao baixo nível de escolaridade das pessoas envolvidas com o produção de alimentos. Este trabalho é um exemplo disto, as dificuldades na aplicação do método EVOP para melhoria da produção de leite em pó ficaram restritas à parte de organização do método, dificultando a adoção de EVOP como método de operação normal, tornando-o somente uma ferramenta eficaz para atingir a condição ótima de operação e também para solução de problemas. Apesar disto, o método EVOP pode se torna um equalizador entre pequenas e grandes indústrias de alimentos na competição em prol da melhoria de processos.

O maior mérito do método EVOP é ser executado diretamente na linha de produção, constituindo desta forma uma função de controle de qualidade e não somente de pesquisa e desenvolvimento. O método EVOP é uma ferramenta de melhoria simples, que tem um alto índice de retorno de investimento, considerando que os benefícios são obtidos com um mínimo ou, às vezes, sem nenhum investimento.

EVOP não responde todos os problemas na otimização de um processo ou produto, mas é uma ferramenta poderosa para ser usada pelo pessoal de controle de qualidade para promover a melhoria contínua e buscar a condição ótima do processo.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- APV. **APV Dryer Handbook.pdf**. [2000a]. 1 arquivo (589.9 KB). Disquete 3 ½. Acrobat® Reader 4.0. 80p.
- APV. **APV Evaporator Handbook.pdf**. 4ª edição. [2000b]. 1 arquivo (656 KB). Disquete 3 ½. Acrobat® Reader 4.0. 68p.
- ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Projeto NBR ISO/FDIS 9001**. Rio de Janeiro, Brasil. Setembro, 2000 . 27p.
- BANERJEE, R; BHATTACHARYYA, B. C. Evolutionary operation (EVOP) to optimize three-dimensional biological experiments. **Biotechnology and Bioengineering**, Vol. 41, p. 67-71. 1993.
- BANERJEE, R.; BHATTACHARYYA, B.C.; TUNGA, R. Optimization of n variable biological experiments by evolutionary operation-factorial design technique. **Journal of Bioscience and Bioengineering**, 87 (2) : 224-230. 1999.
- BARKER, T.B. The evolution of a system for teaching EVOP. In: ANNUAL QUALITY CONGRESS, 46, 1992. Nashville, TN, USA. **Proceedings...** Annual Quality Congress Transactions, American Society Quality Control, Milwaukee, WI, USA. v. 46, p 302-310. 1992.
- BARROS, G.S.C.; BACCHI, M.R.P.; GALAN, V.B. Influência das importações nos preços do leite no mercado brasileiro. **Boletim do Leite – CEPEA/FEALQ/USP**. Ano 8, n 84, março de 2001.
- BISGAARD, S. Continuous improvement of quality improvement tools: building on Taguchi's ideas and going beyond. **Total Quality Management**; Vol. 4, n 2, 183-194, 1993.
- BOX, G. E. P. Evolutionary operation: a method for increasing industrial productivity. **Applied Statistics**, 6, 81-101. 1957.
- _____, Evolutionary Operation of a Food Plant. **Food Manufacture**; 50 (4): 61, 1975.
- BOX, G.E.P; BISGAARD, S. The scientific context of quality improvement. **Quality Progress**; 20, 54-61, 1987.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical model-building and responses surfaces**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons. 1987. 669p.
- _____, **Evolutionary operation – a statistical method for process improvement**. Wiley Classics Library Edition. New York, Wiley Interscience. 1998. 237p.

- BOX, G.E.P.; HUNTER, W.G.; HUNTER, J.S. **Statistics for experimenters – An Introduction to Design, Data Analysis and Model Building**. John Wiley & Sons, Inc. New York. 1978. 653p.
- BRASIL. Ministério de Estado da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Aprova os Regulamentos Técnicos de Identidade e Qualidade dos Produtos Lácteos. Portaria Nº 146, de 07 de março de 1996. Publicado no **Diário Oficial da União** (DOU), de 11 de março de 1996. Disponível em: < <http://www.agricultura.gov.br/sda/dipoa/portaria146.htm>>. Acesso em: março de 2002.
- BUYSKE, S. **Stat 591: Advanced Design of Experiments**. © Steven Buyske and Richard Trout, 1999. Disponível em: <<http://www.stat.rutgers.edu/~buyske/591/lect08.pdf>>. Acesso em: junho 2001.
- CAMPOS, V.F. **Gerenciamento da rotina do trabalho do dia-a-dia**. 6. ed. Belo Horizonte: Editora de Desenvolvimento Gerencial. 1998. 276p.
- DEMING, S.N.; ÖBERG, T.G. Find optimum operating conditions fast. **Chemical Engineering Progress**. 96:(4) p 53-59, Abril de 2000.
- DRAPER, N.R. **EVOP**. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <ms35019@correio.ufv.br> em 01 de Novembro de 2001.
- DRUMOND, F. B.; DELLARETTI FILHO, O.; CHENG, L. C. Integração do desdobramento da função qualidade (QFD) e métodos estatísticos ao desenvolvimento de produtos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO DE DESENVOLVIMENTO DE PRODUTOS E INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON QUALITY FUNCTION DEPLOYMENT, 1, 1999, Belo Horizonte. **Anais ...** Belo Horizonte: IQFD & GDP, 1999.
- FOUST, A. S.; WENZEL, L. A.; CLUMP, C. W.; MAUS, L.; ANDERSEN, L. B. **Princípios da operações unitárias**. 2ª edição. Rio de Janeiro, Editora Guanabara Dois, 1982. 670p.
- FOX, M.M. EVOP: Tool for in-plant research. **Food Technology**, Vol. 22, p 293-300. 1968.
- GOH, T. N. Operating frameworks for statistical quality engineering. **International Journal of Quality & Reliability Management**, Vol. 17 (2): p180-188. 2000.
- GREKEL, H.; CHILDERS, L.E. Starting a 48-plant EVOP program. **Chemical Engineering Progress**, Vol. 69, n 8. 1973.
- HAHN, G.J.; DERSHOWITZ, A.F. Evolutionary operation today – some survey results and observations. **Journal of the Royal Statistical Society Series C – Applied Statistics**, 23 (2) : 214 - 226. 1974.
- HOLMES, D. Tracking the elusive process using EVOP. **Control Solutions** 74: (1) 67-68, JAN 2001.

- HUNTER, W.G.; KITTRELL, J.R. Evolutionary Operation: a review. **Technometrics**, 8, 389 - 397. 1966.
- JENKINS, G.M., A systems study of a petrochemical plant. **Journal of Systems Engineering**, 1, 90-101, 1969.
- JONES, E. Evolutionary operation (EVOP): upgrading process and product by means of EVOP. **Food Technology in Australia**, Vol. 34(4):162-163, 1982.
- JURAN, J.M.; GRZYNA, F.M. **Juran's Quality Control Handbook**. 4th ed. New York. Mc Graw-Hill Book Company. 1988.
- KNIPSCHILD, M. E.; ANDERSEN, G. G. Drying of Milk and Milk Products. In: ROBINSON, R. K. **Modern Dairy Technology**. 2^a edição. London, UK. Chapman & Hall, 1994. v. 1, p. 159-254.
- KOCK, J. L. F. Improving the colour and taste of green pineapple rings. South African Food Review; 9 (5): 59, 61, 78. 1982. In: **Food Science & Technology Abstracts**. Abstracts.
- KRAMER, A. The effective use of operations research and EVOP in quality control. **Food Technology**, 19 (1): 37-39. 1965.
- MATHUR, A.; PATTIPATI, K.R.; SONG, A. Robust local experiments in sequential process improvement. **Proceedings of the IEEE International Conference on Systems, Man and Cybernetics**. v 3, 2566-2571, 1994.
- MYERS, R.H.; MONTGOMERY, D.C. **Response Surface Methodology – process and product optimization using designed experiments**. New York, Wiley Interscience. 1995. 700 p.
- MOGENSEN, G. Use of simple statistical methods for evaluation of results, optimization of processes and improvement of quality. *Mælkeritidende*, 96 (8) 189-191; (12) 292-296. 1983. In: **Food Science & Technology Abstracts**. Abstracts.
- MOHANTY, R.P.; DAHANAYKA, N. Process improvement: Evaluation of methods. **Quality Progress**, v 22 n 9, p 45-48, 1989.
- MUNETTA, P.; SHEN, W. W.; JENNINGS, S.; EVERSON, D.; EDWARDS, L. Potassium hydroxide for peeling potatoes. *American Potato Journal*; 54 (3): 83-90, 1977. In: **Food Science & Technology Abstracts**. Abstracts.
- NAKAI, S. Comparison of optimization techniques for application to food product and process development. **Journal of Food Science**, 47 (1), 144-152. 1981.
- PAIVA, C.L. **A implantação do processo de desenvolvimento de novos produtos em uma pequena empresa de massas alimentícias, utilizando o método de desdobramento da função qualidade (QFD)**. 1999. 170f.. Dissertação (mestrado em Engenharia de Produção) – Escola de Engenharia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

- PINHEIRO, A. J. R. Produtos lácteos concentrados e desidratados. Viçosa, Minas Gerais. [199?]. Notas de aula.
- PORTER, M. **A vantagem competitiva das nações**. Rio de Janeiro. Editora Campus, 1993. 897p.
- REMMERS, E. G.; DUNN, C. G. Process improvement of a fermentation product. **Industrial and Engineering Chemistry**, 53 (9): 743-745. 1961.
- SAAD, E.E. An EVOP design for process optimization. **Ceramic Engineering and Science Proceedings** 15-3. May-June 1994, p 17-23.
- SAMUEL, O. C. Experimenting on the plant process without interfering with production. **Food Processing**, 23 (2): 31-33, 49. 1962.
- SCARRAH, W.P. Improve production efficiency via evolutionary operation. **Chemical Engineering**. 94:(18) 131-133. December 7, 1987.
- _____, **Combining Process Improvement And Manufacturing**. Disponível em: <<http://www.siu.edu/~coalctr/paper32.htm>>.1997. Acesso em: maio 2001.
- SILVA, E.L.; MENEZES, E.M. **Metodologia de pesquisa e elaboração de dissertação**. Disponível em: <<http://www.ufsc.br>>. Acesso em: junho 2001.
- SPENDLEY, W.; HEXT, G.R.; HIMSWORTH, F.R. Sequential application of simplex designs in optimization and EVOP. **Technometrics**, 4, 441-461, 1962.
- TERRA VIVA – Empresa de Consultoria Empresarial. Exportação II. SELECTUS 1.396. Mensagem disponível em <webmaster@terraviva.com.br>. em: 17 Janeiro 2002.
- THIOLLENT, M. **Metodologia da pesquisa-ação**. 7ª edição. São Paulo. Cortez Editora. 1996. 107p.
- VILELA, D.; GOMES, S. T.; CALEGAR, G. M. Agronegócio leite e derivados: um programa nacional em C&T. *In.*: CALDAS, *et al.* (editores). **Agronegócio brasileiro; ciência, tecnologia e competitividade**. Brasília: CNPq, 1998. p. 257-275.
- WERKEMA, M.C.C.; AGUIAR, S. **Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria**. Fundação Christiano Ottoni. Belo Horizonte, Brasil. 1996.
- WILKINSON, J. Competitividade da indústria de laticínios. *In.*: COUTINHO et al. (Coordenadores). **Estudo da Competitividade da indústria Brasileira**. Campinas: MCT; FINEP; PADCT, 1993. Disponível em: <<http://www.mct.gov.br/publi/compet/default.htm>>. Acesso em: janeiro de 2001.

APÊNDICE

APÊNDICE A - Folha de trabalho de cada ciclo do programa EVOP.

As Figuras 36 a 47 mostram os cálculos para cada ciclo do programa EVOP para a variável vazão de leite fluido processado (VAZÃO).

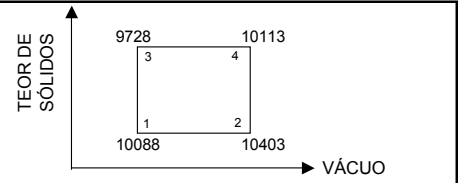
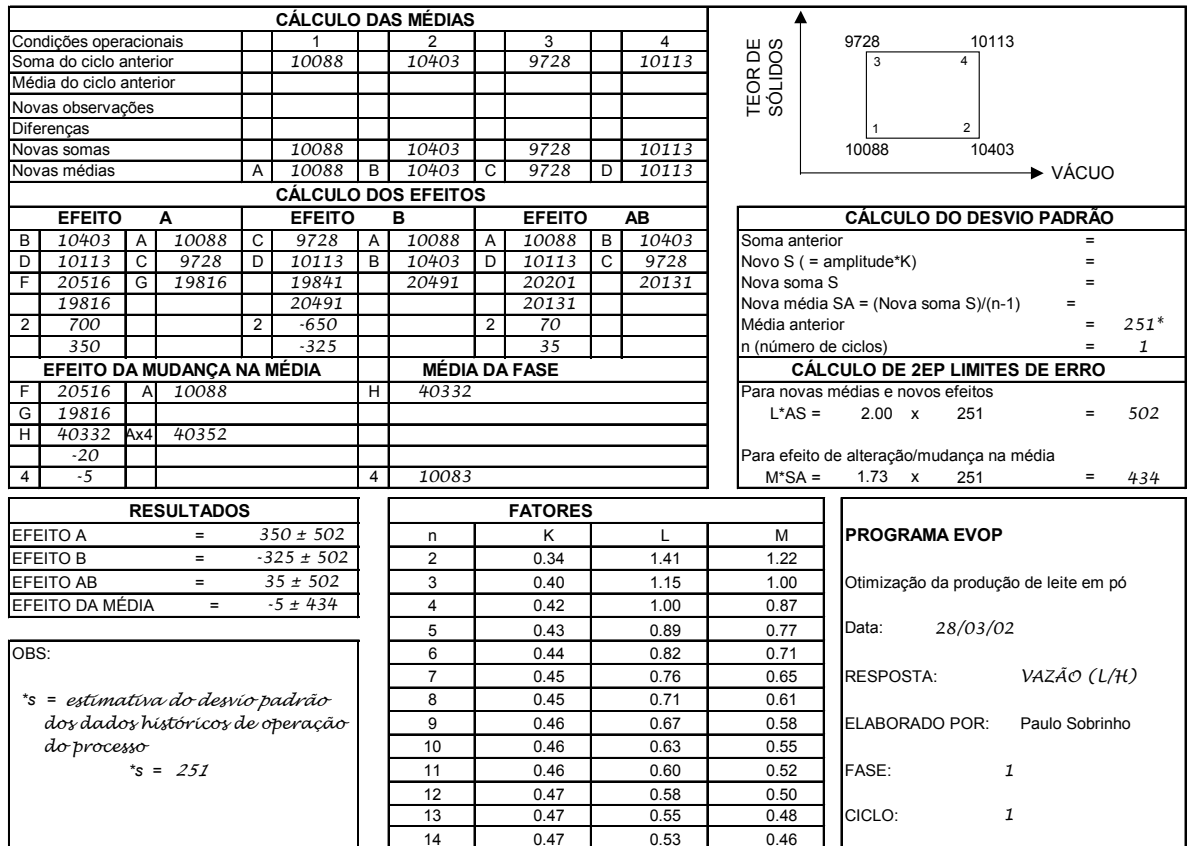


Figura 36: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 1.

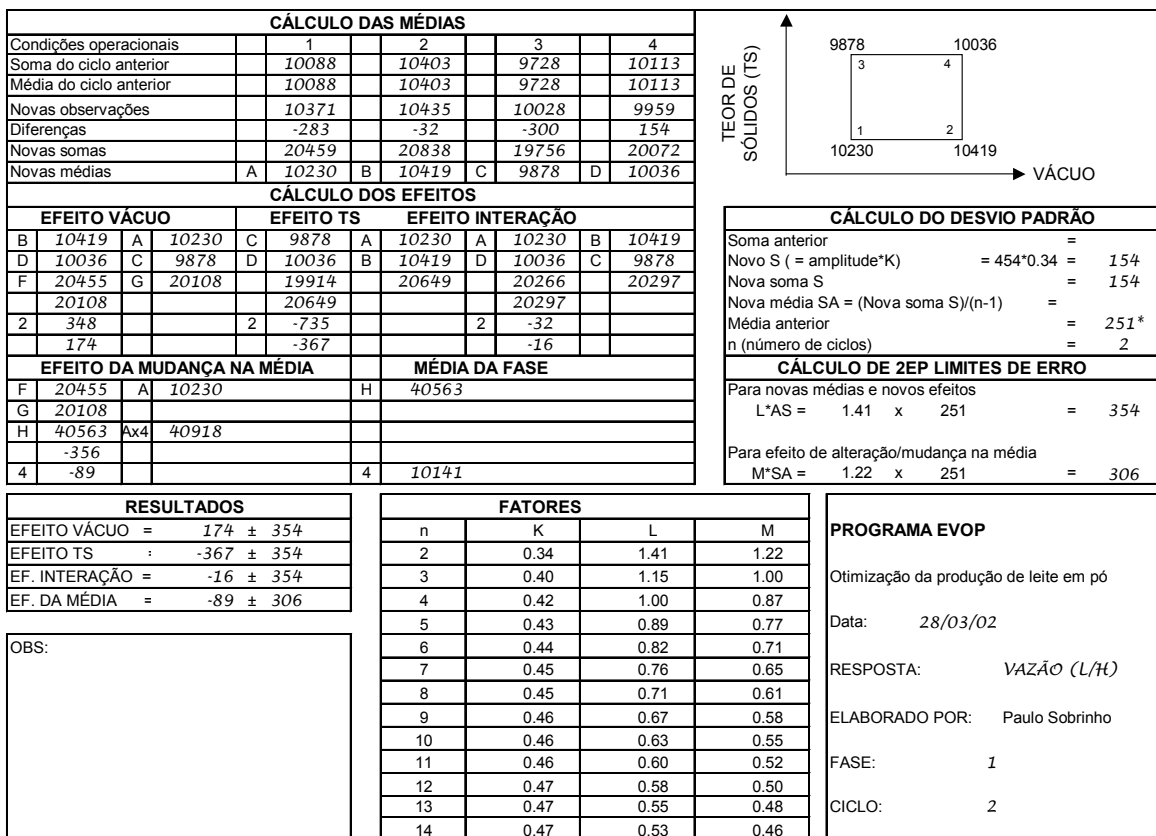


Figura 37: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 1.

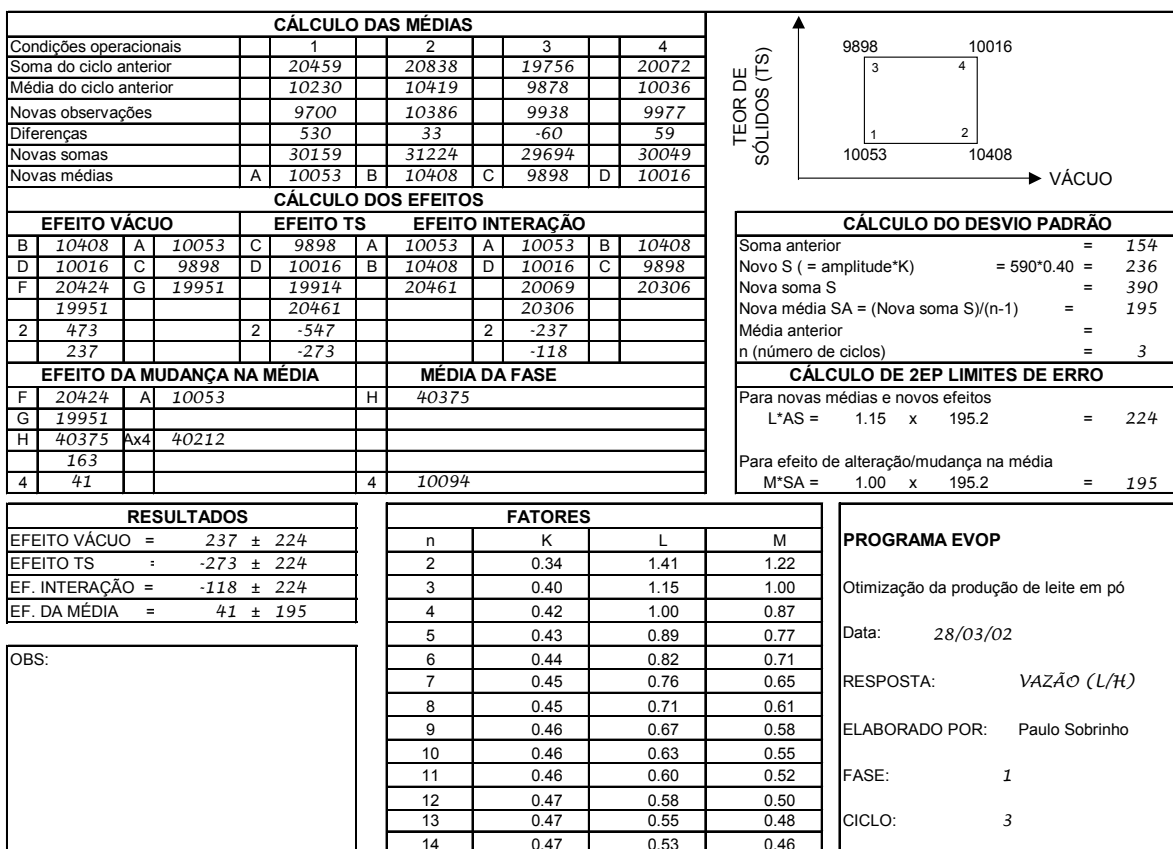


Figura 38: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 1.

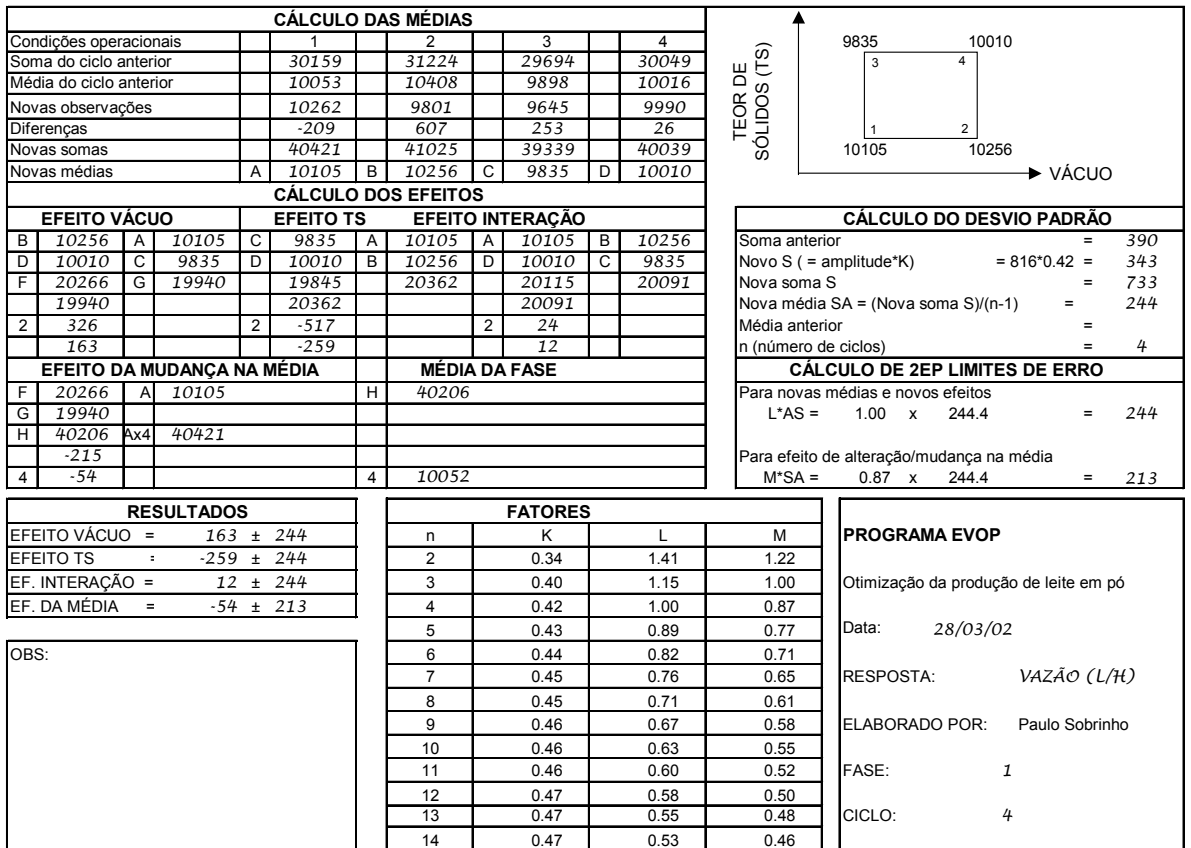


Figura 39: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 1.

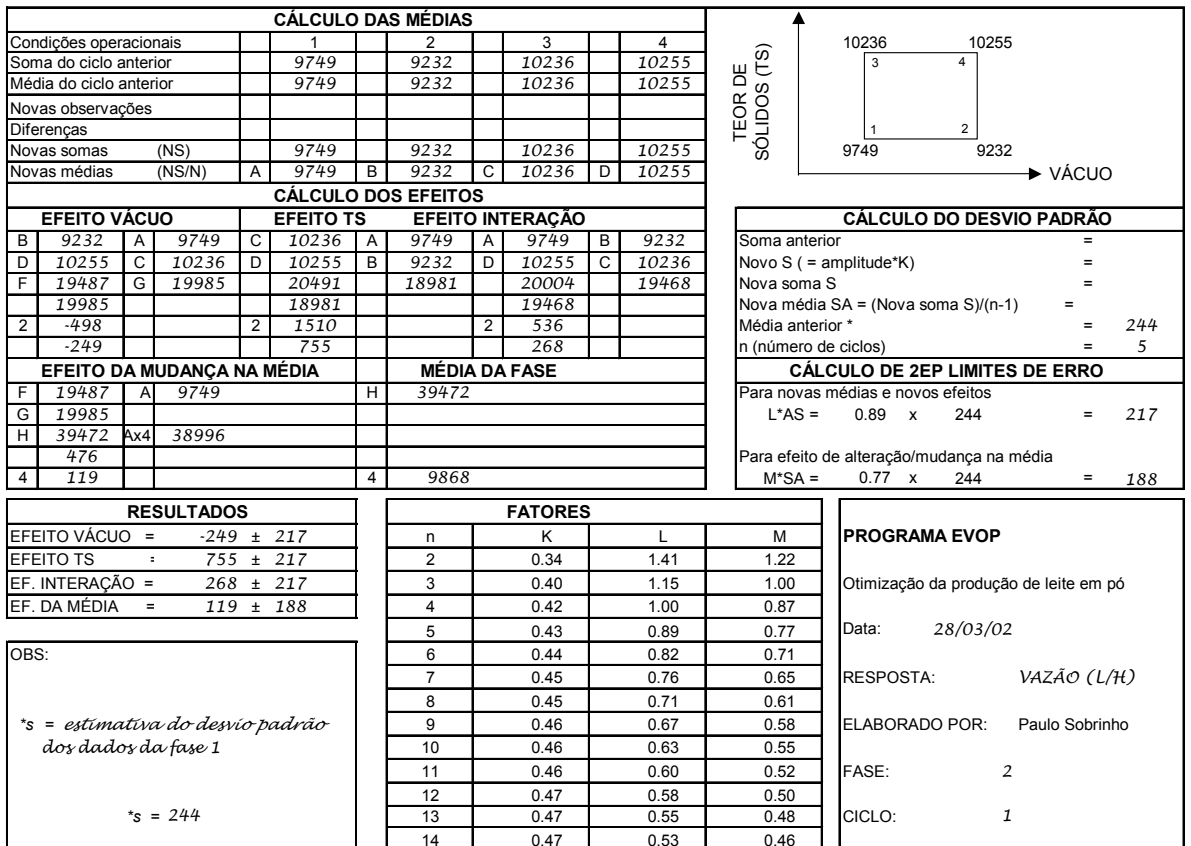


Figura 40: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 2.

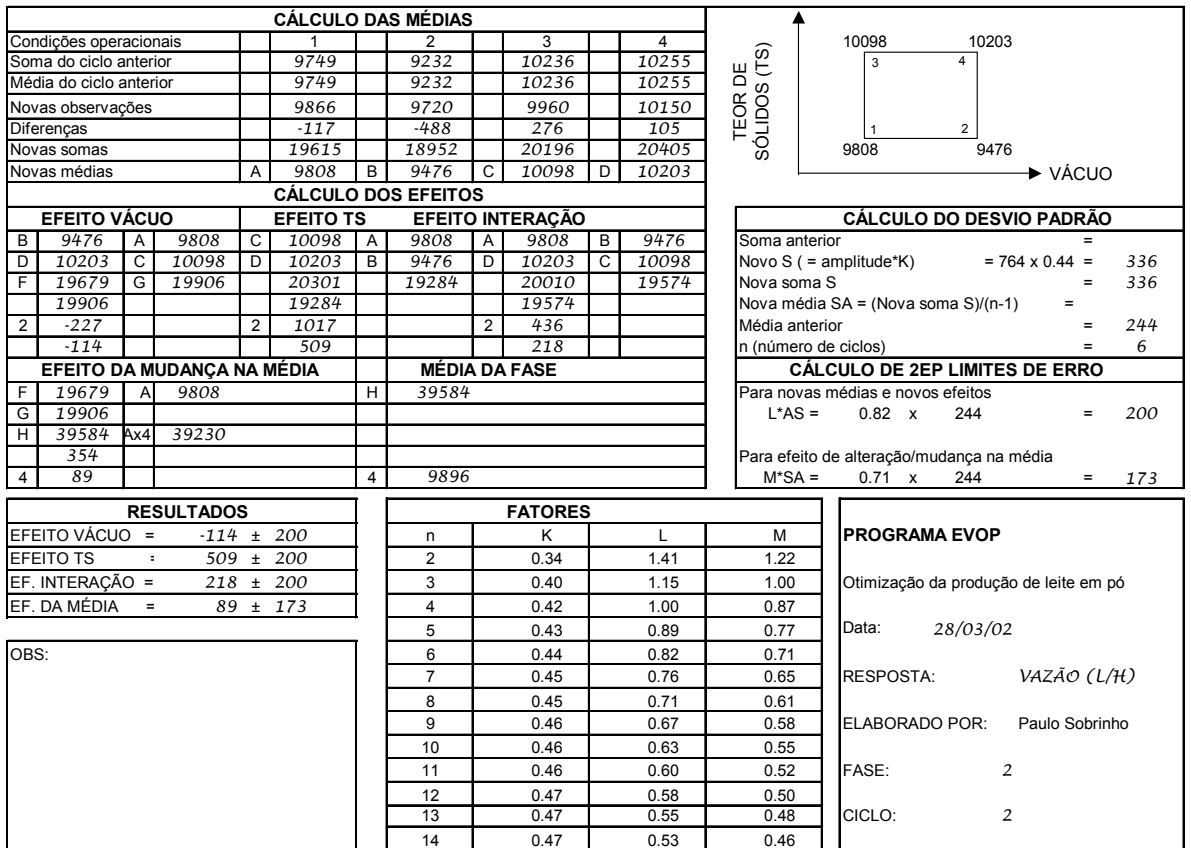


Figura 41: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 2.

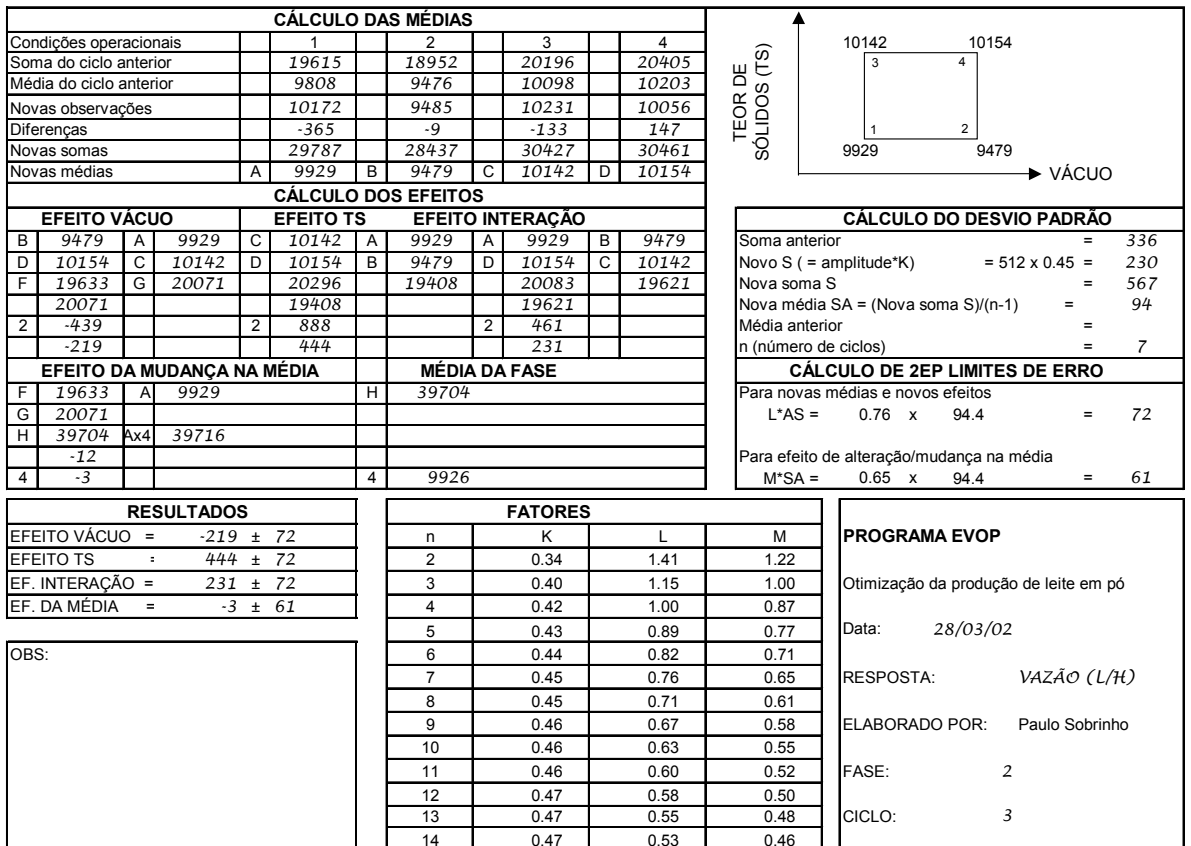


Figura 42: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 2.

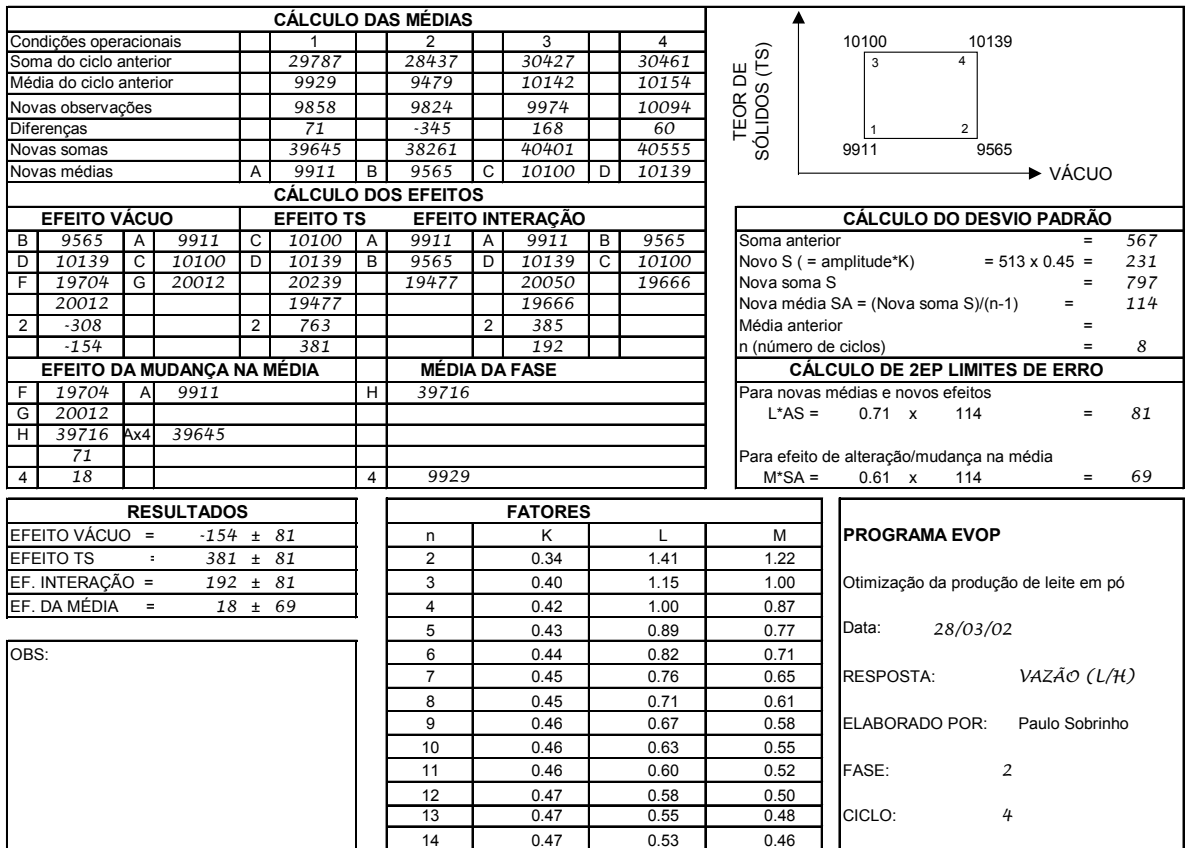


Figura 43: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 2.

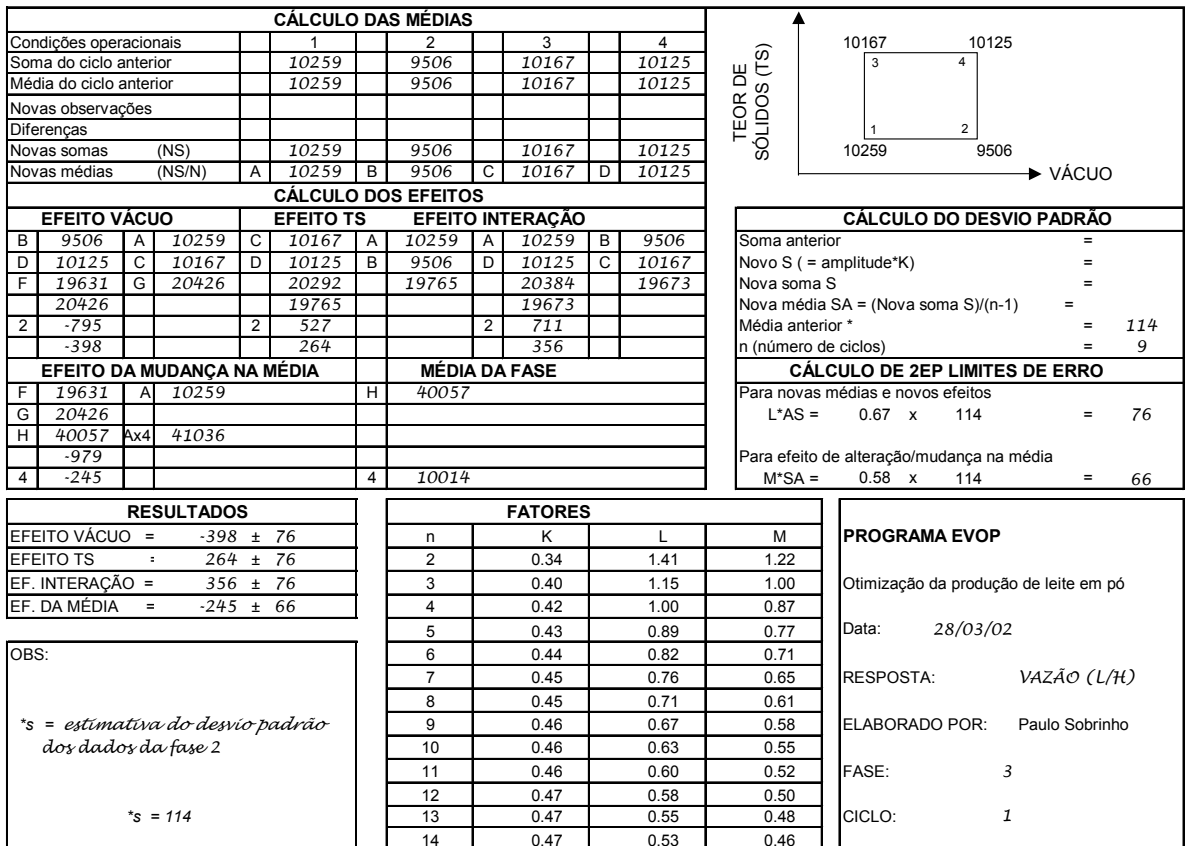


Figura 44: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 3.

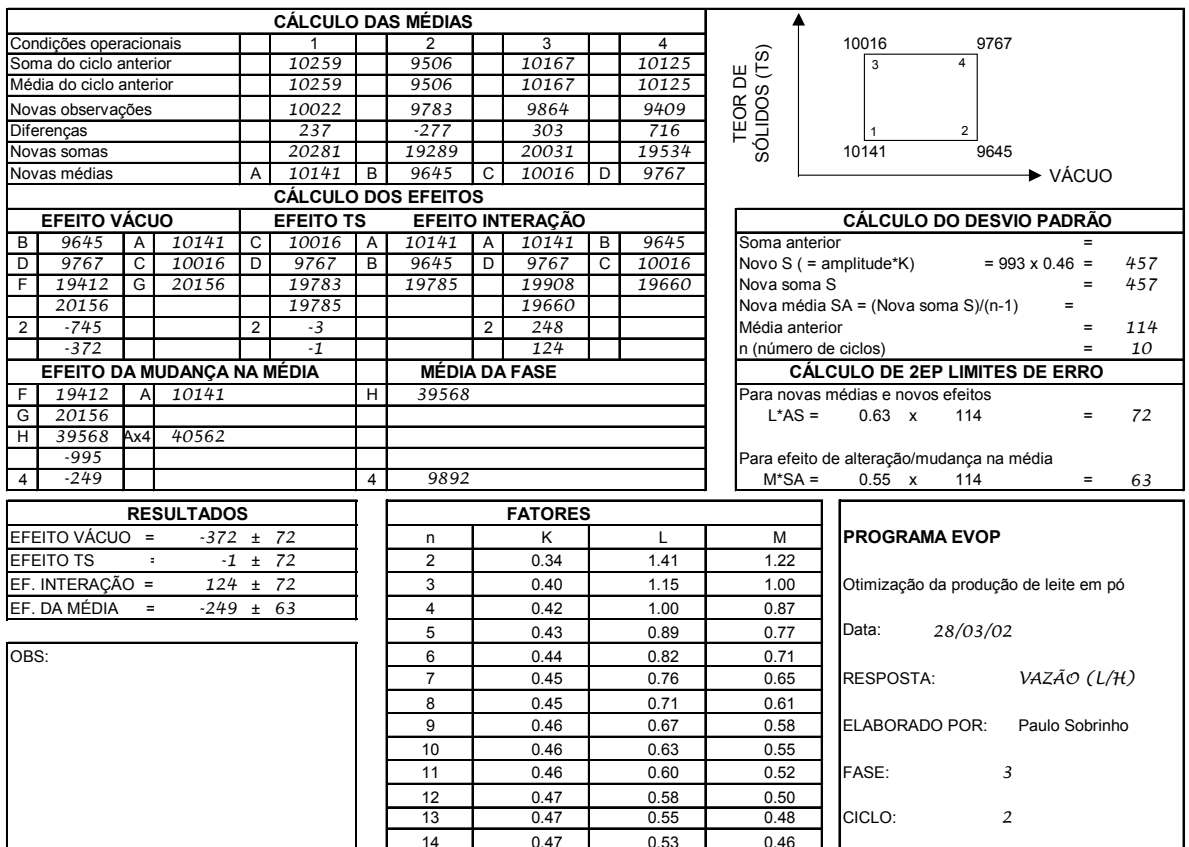


Figura 45: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 3.

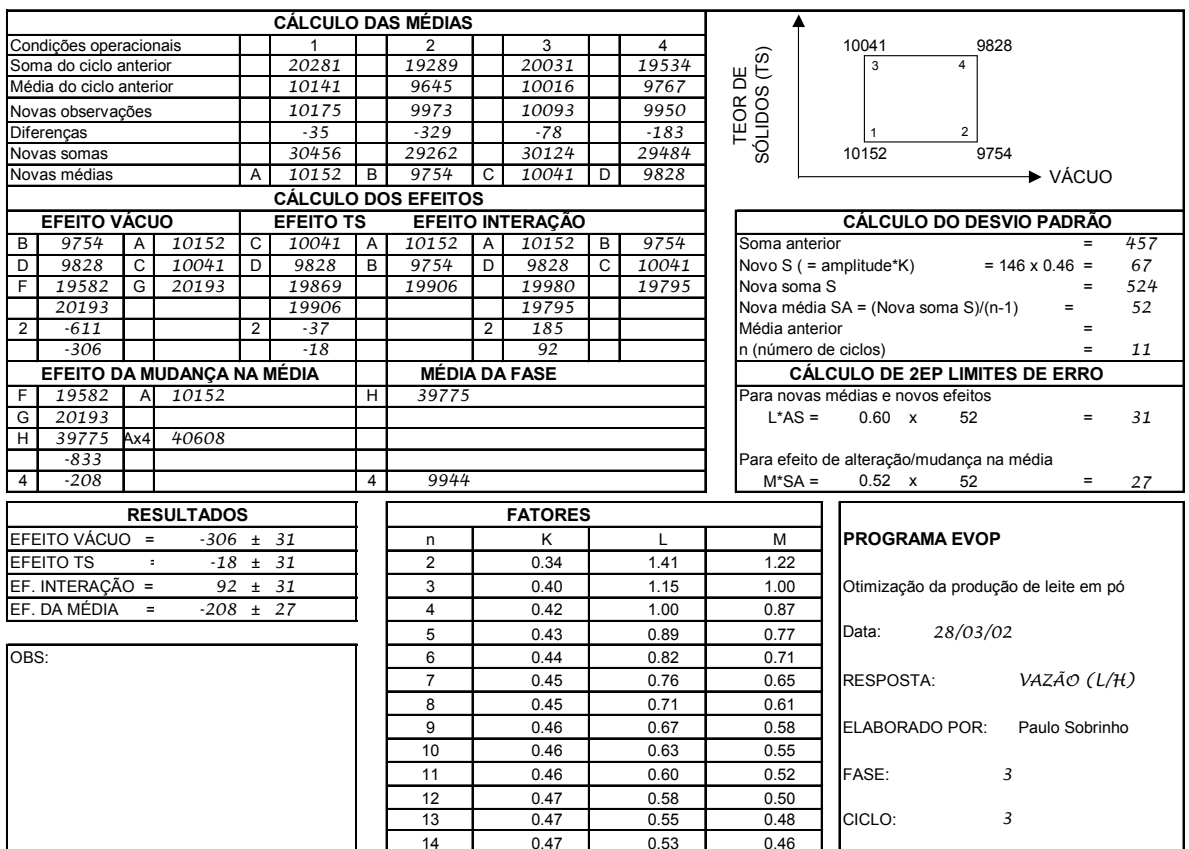


Figura 46: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 3.

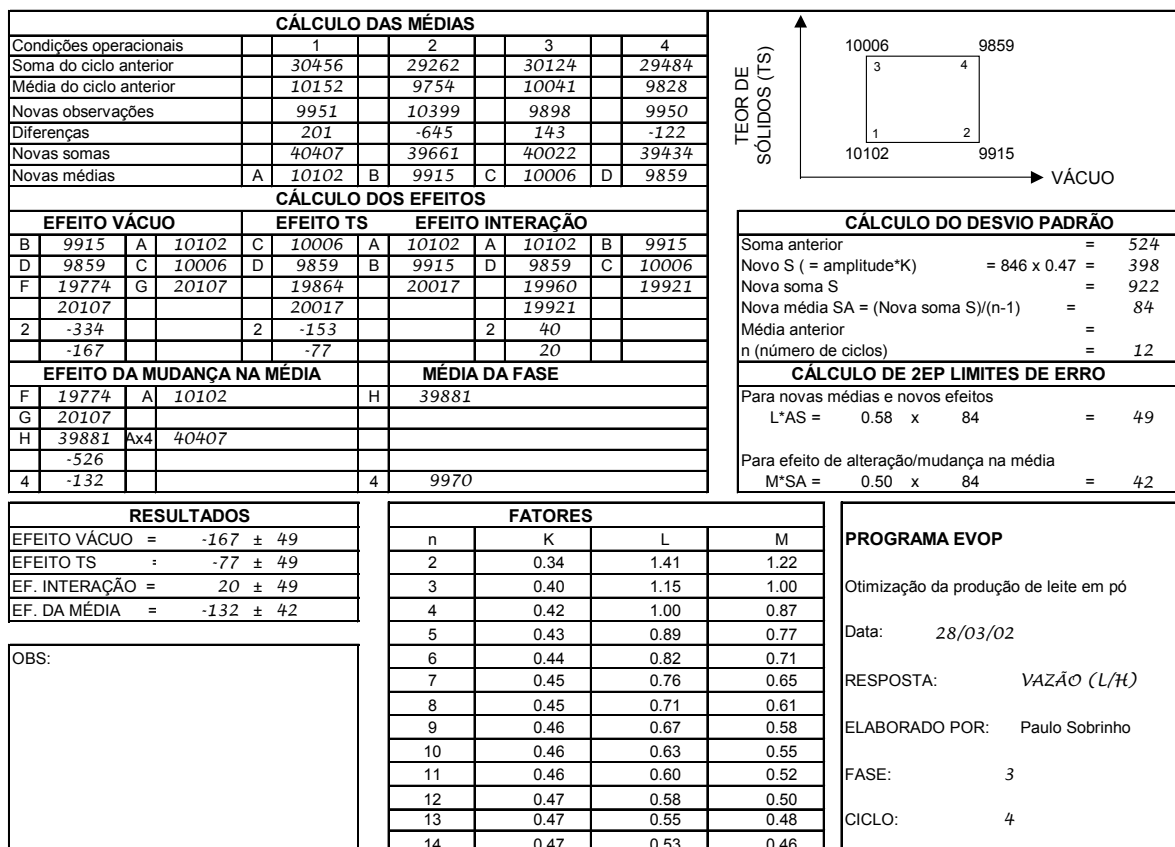


Figura 47: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 3.

As Figuras 48 a 59 mostram os cálculos para cada ciclo do programa EVOP para a variável rendimento do processo de secagem em L/kg (RENDIMENTO).

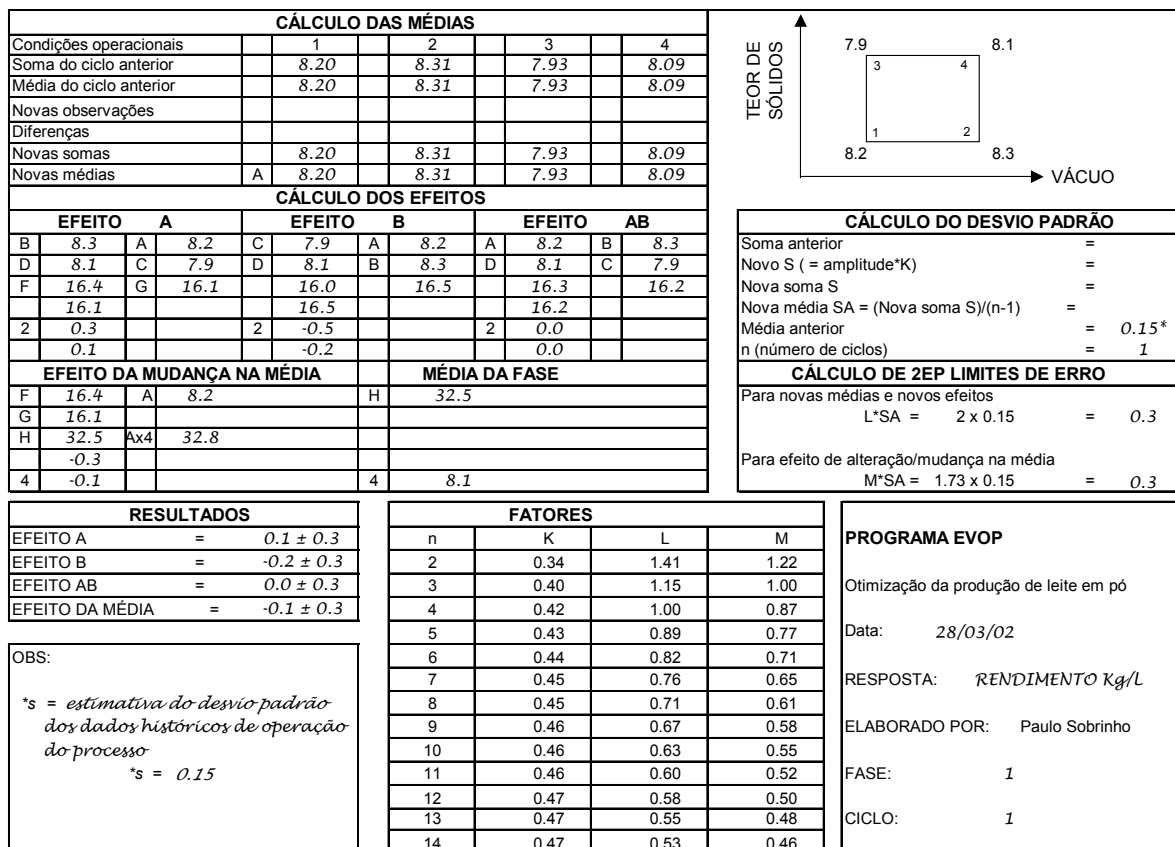


Figura 48: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 1.

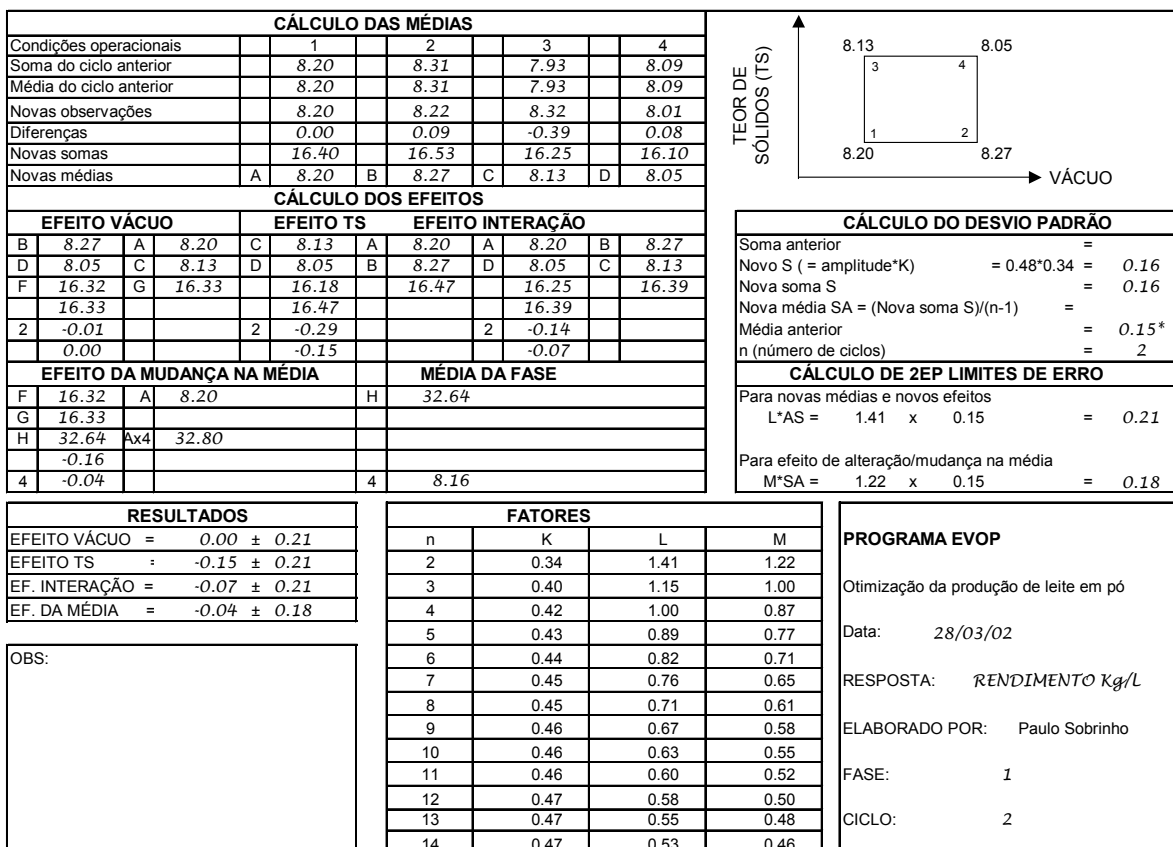


Figura 49: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 1.

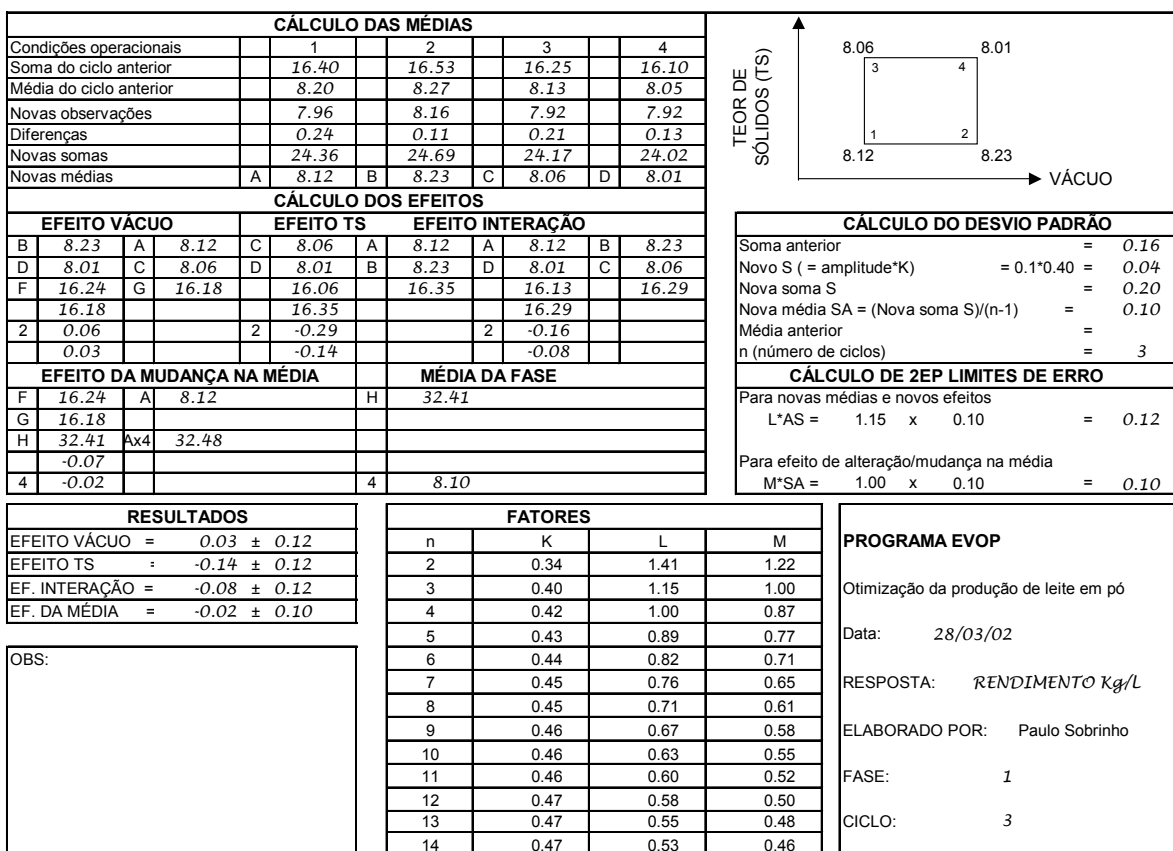


Figura 50: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 1.

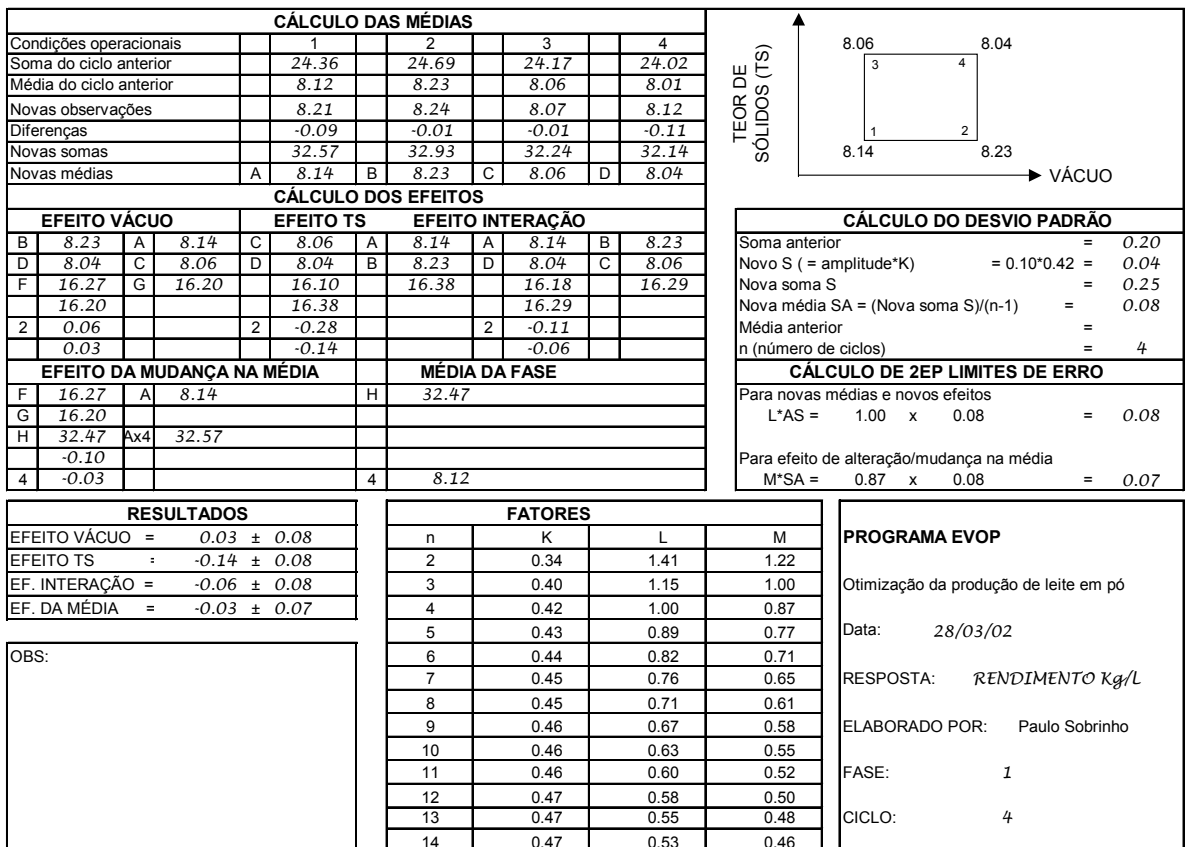


Figura 51: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 1.

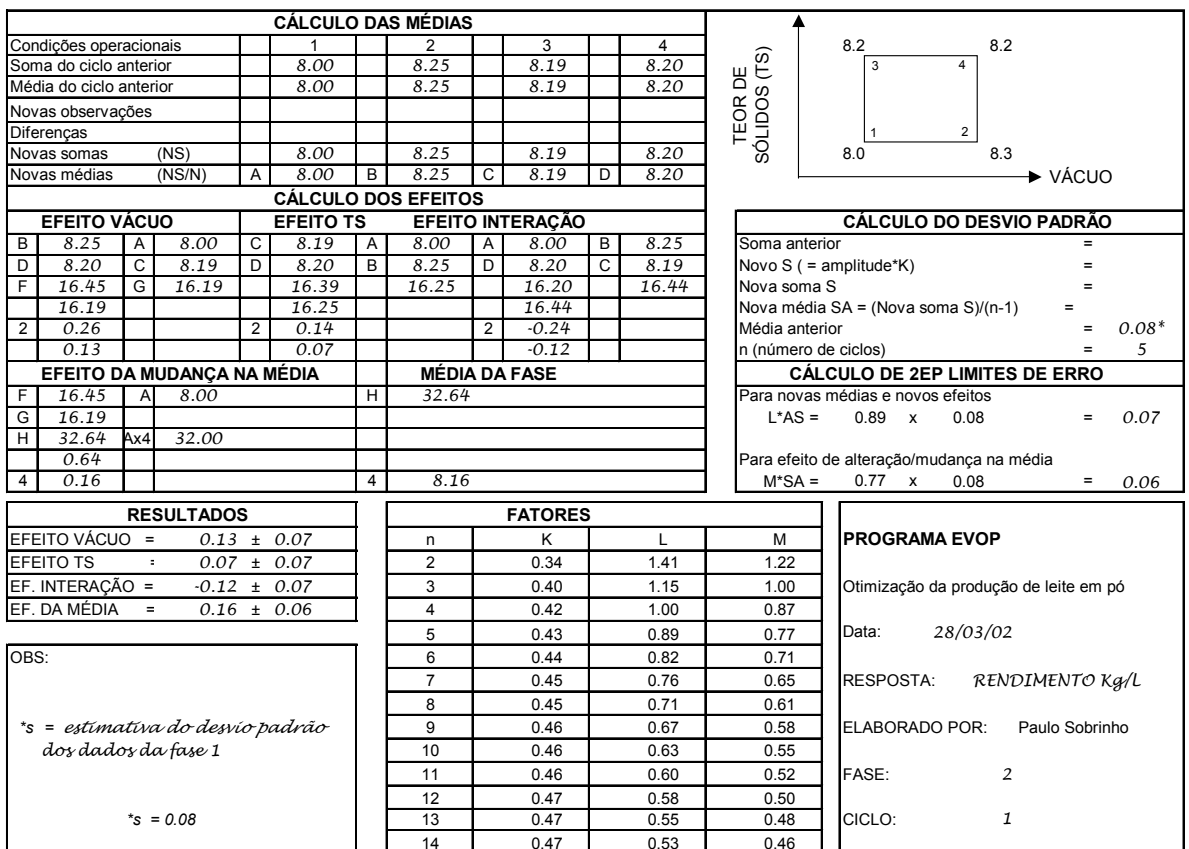


Figura 52: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 2.

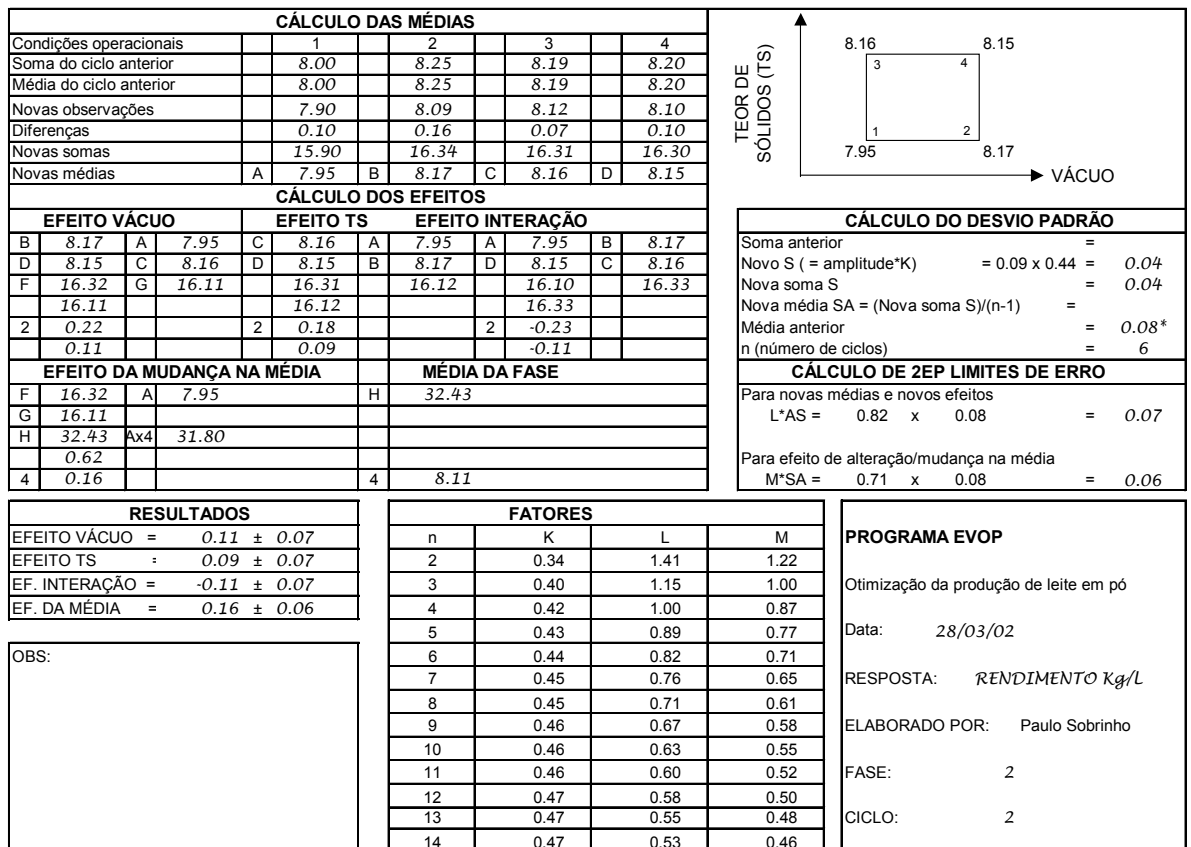


Figura 53: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 2.

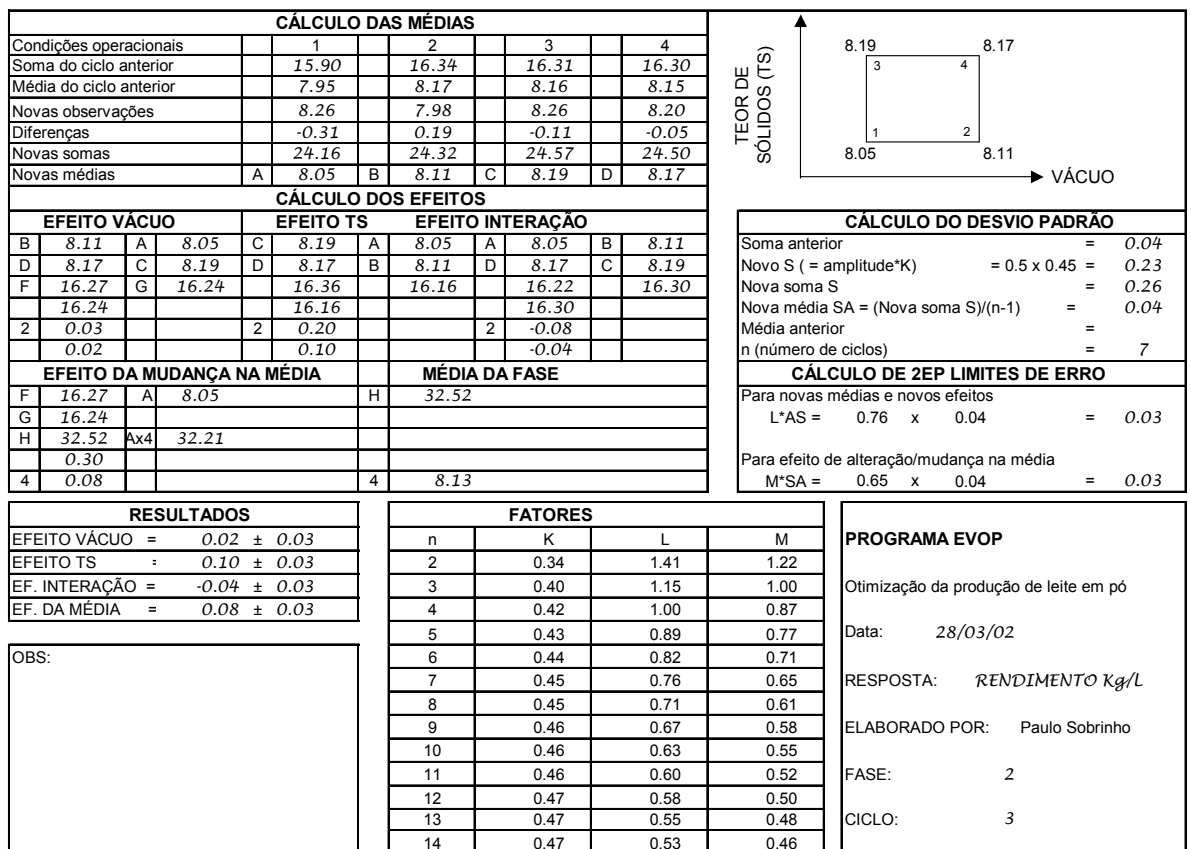


Figura 54: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 2.

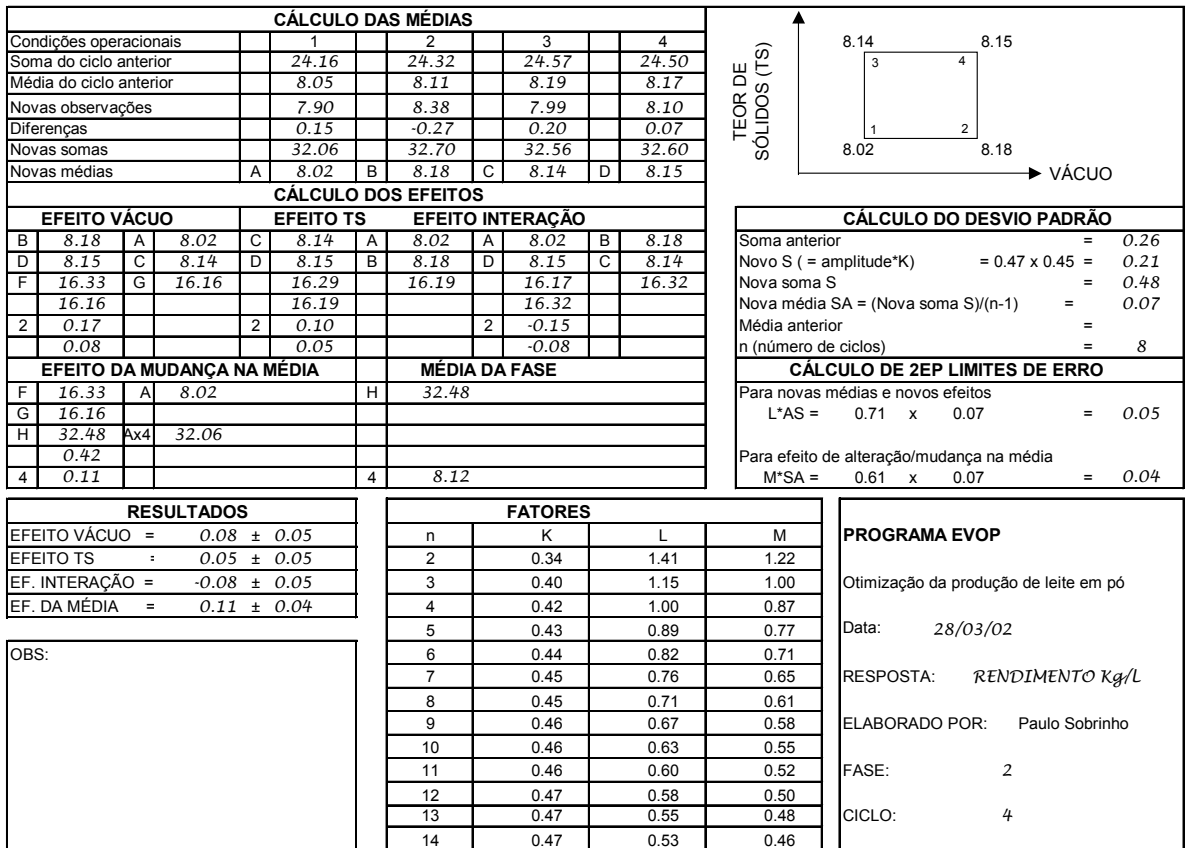


Figura 55: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 2.

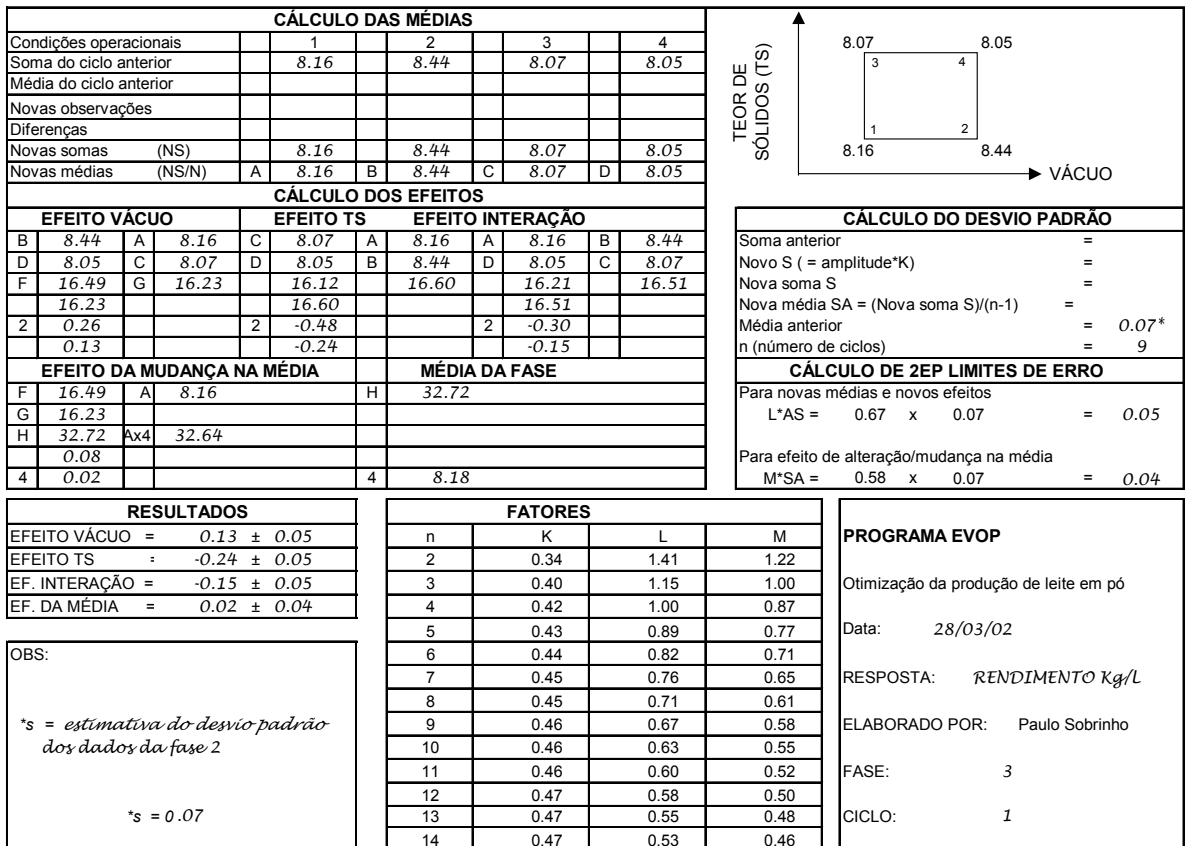


Figura 56: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 1 da Fase 3.

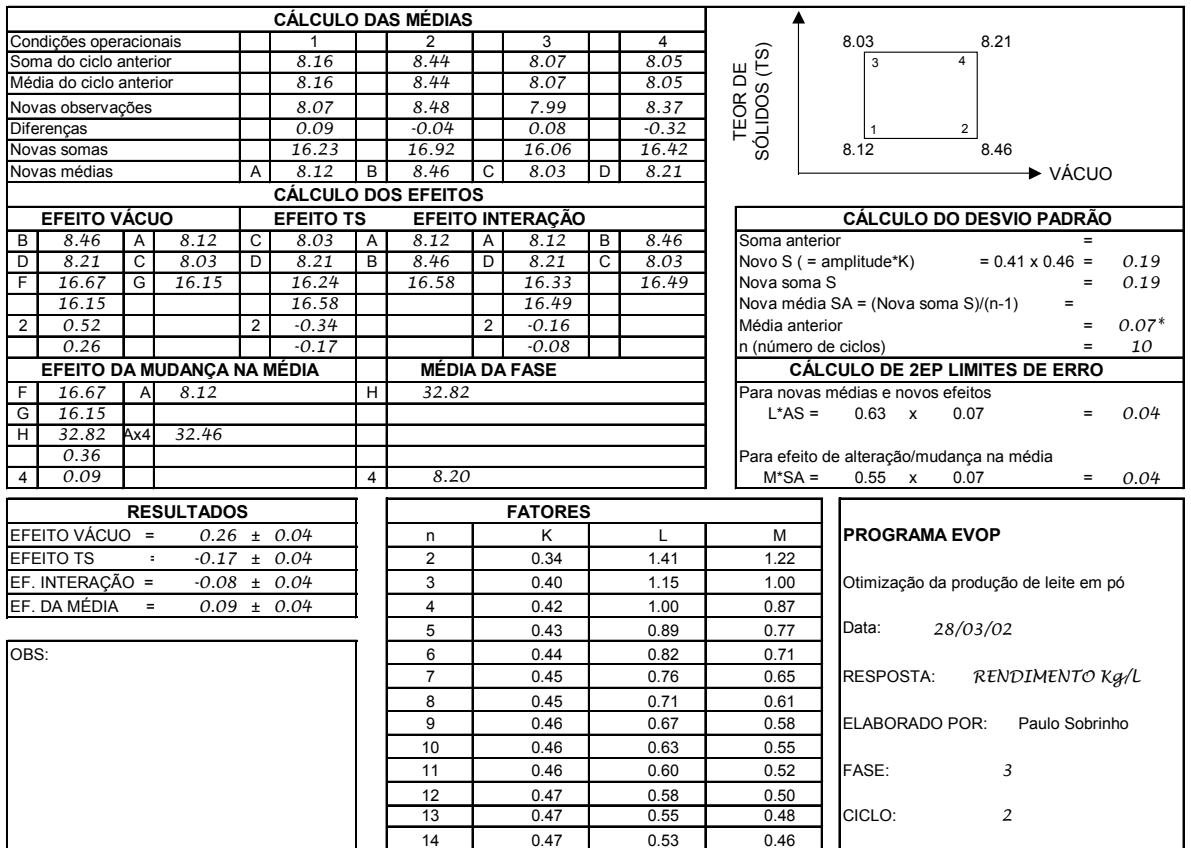


Figura 57: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 2 da Fase 3.

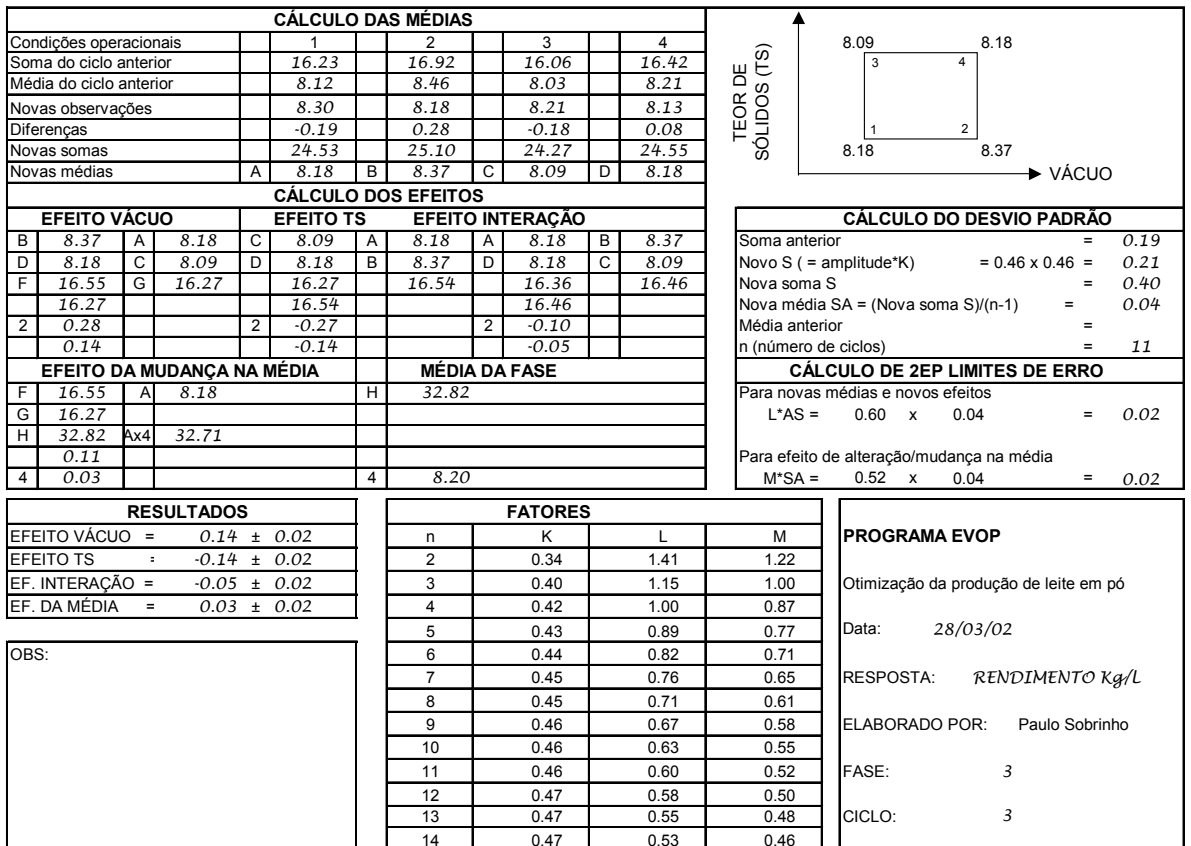


Figura 58: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 3 da Fase 3.

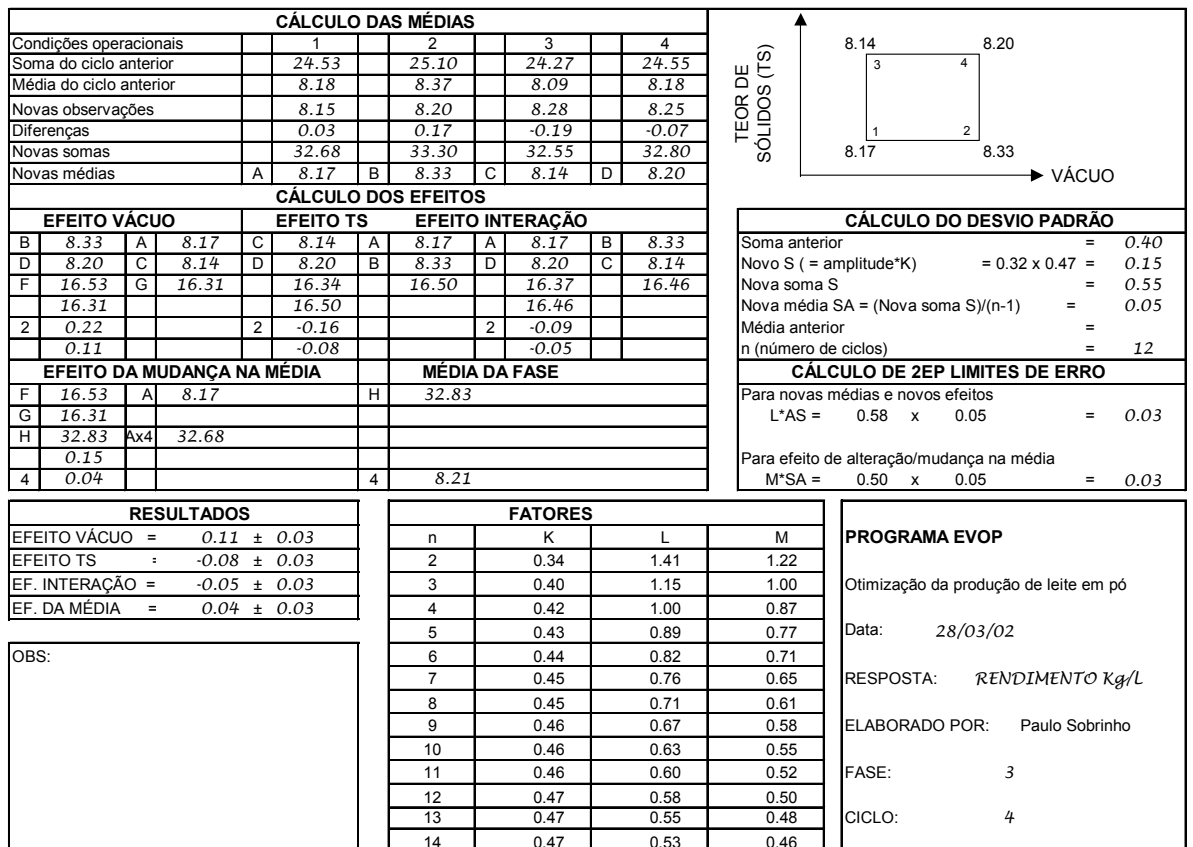


Figura 59: Folha de trabalho com os dados dos ensaios do Ciclo 4 da Fase 3.

APÊNDICE B - Dados operacionais do processo de produção de leite em pó

Quadro 12: Dados operacionais anteriores a utilização do método EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó.

N	VAZÃO (L/h)	RENDIMENTO (L/Kg)	PRODB (%)	N	VAZÃO (L/h)	RENDIMENTO (L/Kg)	PRODB (%)
1	10432	8.28	4.67	46	10435	8.22	1.61
2	10143	8.02	4.43	47	10117	8.15	1.69
3	10286	8.14	2.72	48	9801	8.24	8.16
4	10277	8.07	8.26	49	10050	8.59	4.58
5	9821	8.05	10.86	50	10351	8.32	0.96
6	10297	8.05	3.37	51	9855	7.83	1.43
7	10271	8.14	1.78	52	10167	8.29	5.12
8	9935	8.09	2.22	53	9675	8.01	2.57
9	10198	8.11	10.42	54	10409	8.27	3.3
10	10388	8.12	4.43	55	10092	7.94	6.46
11	10079	7.9	4.57	56	9541	7.72	6.12
12	10261	8.01	4.4	57	10262	8.21	9.2
13	10070	8.07	2.7	58	10386	8.16	3.75
14	10269	7.98	3.15	59	9754	8.17	2.77
15	10172	8.07	3.47	60	9700	7.96	5.58
16	10116	8.16	3.78	61	10371	8.18	11.49
17	10199	7.88	9.64	62	10088	8.2	5.24
18	10190	8.06	4.9	63	10101	8.16	2.09
19	9829	8.13	5.64	64	10030	8.01	6.47
20	10033	8.05	3.1	65	10035	8.39	7.62
21	9831	8.33	2.54	66	9690	8.08	4.52
22	10015	8.26	3.09	67	9727	8.09	7.53
23	10295	7.99	4.66	68	10066	8.04	7.84
24	9632	8.16	6.47	69	10209	8.07	2.75
25	10029	8.05	2.06	70	10026	8.01	4.99
26	10026	8.19	2.49	71	9710	8.12	3.23
27	10314	8.32	1.93	72	9858	8.22	4.87
28	10322	8.11	3.63	73	9479	8.09	4.45
29	10197	8.36	2.16	74	9878	8.1	4.76
30	10207	8.1	1.97	75	9728	7.93	5.02
31	10024	7.78	4.17	76	10028	8.32	2.56
32	10061	8.25	2.91	77	9938	7.92	3.4
33	9841	8.37	3.05	78	9645	8.07	8.29
34	9885	8.13	4.52	79	9967	8.17	2.71
35	9711	8.07	4.94	80	9736	7.94	2.92
36	10022	8.07	4.76	81	9682	8.1	1.15
37	10155	8.04	5.63	82	9861	8.03	3.59
38	10199	7.97	1.92	83	9867	7.81	6.22
39	10330	8	3.53	84	9642	7.99	1.94
40	10065	8.32	4.23	85	9983	8.2	2.67
41	10380	8.3	1.67	86	9864	8.16	1.53
42	9896	7.95	6.43	87	9626	8	3.1
43	10099	8.09	3.7	88	9755	8.48	1.9
44	10279	8.3	3.67	89	9531	8.07	1.08
45	10376	8.31	2.37				

Quadro 13: Dados operacionais durante e depois da utilização do método EVOP para melhoria do processo de produção de leite em pó.

N	VAZÃO (L/h)	RENDIMENTO (L/Kg)	PRODB (%)	N	VAZÃO (L/h)	RENDIMENTO (L/Kg)	PRODB (%)
1	10088	8.2	5.2	46	10399	8.2	0.1
2	9728	7.93	5	47	9898	8.28	0.5
3	10403	8.31	2.4	48	9951	8.15	0.6
4	10113	8.09	0.1	49	10195	7.97	0.35
5	9959	8.01	0	50	9998	7.98	0.20
6	10435	8.22	1.6	51	10230	8.09	0.40
7	10028	8.32	2.6	52	10288	8.05	0.20
8	10371	8.18	13.5	53	10122	8.09	0.30
9	9700	7.96	5.6	54	10029	7.99	0.31
10	9938	7.92	3.4	55	10175	8.45	0.34
11	10386	8.16	3.8	56	10063	8.16	0.31
12	9977	7.92	2.5	57	9965	8.01	0.00
13	9990	8.12	0	58	10037	8.22	0.21
14	9801	8.24	8.2	59	9708	8.08	0.10
15	9645	8.07	8.3				
16	10262	8.21	9.2				
17	9749	8	0				
18	10236	8.19	0.3				
19	9232	8.25	0.3				
20	10255	8.2	0.5				
21	10150	8.1	0				
22	9720	8.09	1.4				
23	9960	8.12	0.2				
24	9866	7.9	3.8				
25	10172	8.26	0.1				
26	10231	8.26	0				
27	9485	7.98	0.1				
28	10056	8.2	0				
29	10094	8.1	0.3				
30	9824	8.38	0				
31	9974	7.99	1.4				
32	9858	7.9	2.4				
33	10259	8.16	1.2				
34	10167	8.07	1.6				
35	9506	8.44	0				
36	10125	8.05	0.2				
37	9409	8.37	0.1				
38	9783	8.48	0.1				
39	9864	7.99	1.6				
40	10022	8.07	0.2				
41	10175	8.3	0.5				
42	10093	8.21	2.1				
43	9973	8.18	0.3				
44	9950	8.13	0.3				
45	9950	8.25	0				