

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
INSTITUTO DE MATEMÁTICA  
DEPARTAMENTO DE ESTATÍSTICA

*Utilização de Estudos de Repetibilidade & Reprodutibilidade e  
Planejamento de Experimentos na Indústria:  
Um Estudo de Caso em Medidores Monofásicos*

**Autora: Luciane Hilgert Weber**

Orientadora: Márcia Elisa Echeveste

Monografia apresentada para obtenção  
do grau de Bacharel em Estatística

Porto Alegre, dezembro de 1999.

*“O estudo baseado unicamente na tecnologia intrínseca e na experiência é como viajar de Tóquio a Quioto em um palanquim. A utilização de ferramentas estatísticas juntamente com estes conhecimentos é como fazer a mesma viagem de trem-bala.”*

*Dr. Kaoru Ishikawa*

## ***AGRADECIMENTOS***

Ao cumprir mais uma etapa nesta longa caminhada, agradeço imensamente a todos que colaboraram para a concretização deste sonho. Um sonho que jamais teria se tornado realidade se no caminho não encontrasse pessoas dispostas a fazer sempre o que pudessem para ajudar no que fosse preciso.

Aos professores do Instituto de Matemática e, em especial, do Departamento de Estatística, pelo inestimável valor agregado à minha formação, não apenas em conhecimento técnico mas também pela amizade que conquistamos e por tantas experiências pelas quais passamos.

À Jandyra, por todos estes anos de convívio, sempre atenciosa, compreensiva e extremamente dedicada a compartilhar seu conhecimento.

À Marilene, pelo carinho dispensado em momentos difíceis, tanto profissionais quanto pessoais.

Ao Riboldi, pela atenção e por tudo que ensinou.

À Márcia, que acompanhou os momentos de maior angústia durante a orientação deste trabalho e indicou os caminhos a seguir.

Ao Tadeu, pela compreensão, ajuda e confiança.

Aos colegas, por tantas horas de estudo e *stress*, pelas risadas que demos juntos e por tudo que conquistamos com a nossa união. Que isso tudo tenha reflexos positivos em nossas vidas e que possamos conquistar muito mais juntos.

Ao Sérgio, que esteve sempre ao meu lado, em cada queda, em cada conquista, por toda dedicação e amor.

À minha família, que da sua maneira contribuiu para tornar esta vitória ainda mais saborosa.

À Deus, por permitir que eu chegasse até aqui.

***Muito obrigada!***

## *SUMÁRIO*

<b>CAPÍTULO 1</b> .....	<b>10</b>
<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>10</b>
1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS .....	10
1.2 TEMA .....	12
1.3 JUSTIFICATIVA .....	13
1.4 OBJETIVOS .....	14
1.5 METODOLOGIA .....	14
1.6 ESTRUTURA .....	15
1.7 LIMITAÇÕES.....	15
<b>CAPÍTULO 2</b> .....	<b>16</b>
<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>16</b>
2.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	16
2.1.1 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO POR VARIÁVEIS .....	17
2.1.2 DISPOSITIVO DE MEDIÇÃO POR ATRIBUTOS .....	18
2.2 PROJETOS EXPERIMENTAIS .....	18
2.2.1 IDENTIFICAÇÃO DOS FATORES .....	22
2.2.2 DETERMINAÇÃO DAS RESTRIÇÕES EXPERIMENTAIS .....	23
2.2.3 ESCOLHA DO PROJETO EXPERIMENTAL .....	23
2.2.4 ALGUNS TIPOS DE PROJETOS EXPERIMENTAIS .....	24
2.3 OTIMIZAÇÃO .....	30
<b>CAPÍTULO 3</b> .....	<b>33</b>
<b>ESTUDO DE CASO</b> .....	<b>33</b>
3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA .....	33
3.2 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE MELHORIA .....	34
3.3 ENSAIOS DE CORRENTE DE PARTIDA E MARCHA À VAZIO .....	37
3.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E PROJETO EXPERIMENTAL .....	38
3.4.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO .....	38
3.4.2 PROJETO EXPERIMENTAL .....	40

3.4.3 MODELAGEM INDIVIDUAL DAS VARIÁVEIS E OTIMIZAÇÃO .....	65
<b>CAPÍTULO 4.....</b>	<b>69</b>
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>69</b>
4.1 CONCLUSÕES.....	69
4.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS.....	71
<b>ANEXOS .....</b>	<b>72</b>
<b>GLOSSÁRIO .....</b>	<b>83</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>84</b>

## **LISTA DE FIGURAS**

<i>Figura 3.1 – Desdobramento da etapas do processo de produção de medidores.</i> .....	34
<i>Figura 3.2 – Medidor monofásico modelo ME21.</i> .....	35
<i>Figura 3.3 – Banca VP, suas 20 borneiras (posições) e o painel de controle.</i> .....	36
<i>Figura 3.4 – Disco: componente do conjunto rotor.</i> .....	42
<i>Figura 3.5 – Estatísticas descritivas da variável resposta tempo em teste de corrente de partida, por tratamento.</i> .....	47
<i>Figura 3.6 – Estatísticas descritivas da variável resposta tempo em teste de marcha em vazio, por tratamento.</i> .....	47
<i>Figura 3.7 – Boxplot dos resíduos.</i> .....	51
<i>Figura 3.8 –Gráfico de probabilidade normal.</i> .....	51
<i>Figura 3.9 – Análise de resíduos x valores estimados da variável tempo em teste de partida.</i> .....	52
<i>Figura 3.10 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de partida x <math>X_1</math>.</i> .....	53
<i>Figura 3.11 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de partida x <math>X_2</math>.</i> .....	53
<i>Figura 3.12 – Boxplot dos resíduos.</i> .....	56
<i>Figura 3.13 - Gráfico de probabilidade normal.</i> .....	57
<i>Figura 3.14 - Análise de resíduos x valores estimados da variável tempo em teste de vazio.</i> 57	57
<i>Figura 3.15 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de marcha em vazio x <math>X_1</math>.</i> .....	58
<i>Figura 3.16 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de marcha em vazio x <math>X_2</math>.</i> .....	59
<i>Figura 3.17 - Algumas das transformações mais utilizadas.</i> .....	60
<i>Figura 3.18 – Dados necessários para a obtenção da transformação.</i> .....	60
<i>Figura 3.19 – Gráfico de probabilidade normal.</i> .....	62
<i>Figura 3.20 – Boxplot dos resíduos da variável transformada log (tempo em teste de vazio + 0.5).</i> .....	63
<i>Figura 3.21 - Análise de resíduos x valores estimados da variável transformada.</i> .....	63
<i>Figura 3.22 – Análise de resíduos da variável transformada x <math>X_1</math>.</i> .....	64

*Figura 3.23 – Análise de resíduos da variável transformada  $x X_2$  ..... 65*

## **LISTA DE TABELAS**

<b>Tabela 3.1</b> – <i>Descrição das variáveis resposta (características de qualidade)</i> .....	41
<b>Tabela 3.2</b> – <i>Arranjo do fatorial com dois fatores e cinco repetições.</i> .....	42
<b>Tabela 3.3</b> – <i>Níveis reais e codificados dos fatores controláveis</i> .....	45
<b>Tabela 3.4</b> – <i>Matriz experimental do fatorial 3X2.</i> .....	46
<b>Tabela 3.5</b> – <i>Análise de Variância para a variável tempo em teste de corrente de partida.</i> ..	49
<b>Tabela 3.6</b> – <i>Média e desvio-padrão do fator tensão.</i> .....	49
<b>Tabela 3.7</b> – <i>Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de partida.</i> .....	50
<b>Tabela 3.8</b> – <i>Análise de Variância para a variável tempo em teste de marcha em vazio.</i> .....	54
<b>Tabela 3.9</b> – <i>Teste de comparações múltiplas.</i> .....	55
<b>Tabela 3.10</b> – <i>Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de vazio.</i> .....	55
<b>Tabela 3.11</b> – <i>Análise de Variância para a variável transformada.</i> .....	61
<b>Tabela 3.12</b> – <i>Teste de comparações múltiplas.</i> .....	61
<b>Tabela 3.13</b> – <i>Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de vazio transformada.</i> .....	62
<b>Tabela 3.14</b> – <i>Modelagem individual das variáveis resposta.</i> .....	66
<b>Tabela 3.15</b> – <i>Ajustes ótimos dos fatores controláveis, valores alvo e respectivos valores estimados para as variáveis resposta.</i> .....	68

## ***RESUMO***

Esta monografia foi desenvolvida a partir da necessidade apontada por determinada empresa, de avaliar o desempenho de um dos seus produtos.

Após o conhecimento da problemática, identificou-se a oportunidade de aplicação de técnicas de avaliação de sistemas de medição e delineamento de experimentos.

Estas técnicas foram utilizadas com o objetivo de viabilizar a quantificação do efeito dos principais parâmetros do processo sobre as características de qualidade de interesse do cliente, ou seja, a quantificação do efeito dos fatores controláveis sobre as variáveis resposta.

O método sugerido pode ser aplicado a qualquer estudo tipicamente industrial que envolve muitas variáveis, onde se deseja entender como essas variáveis se relacionam, melhorando assim o desempenho do processo e a qualidade do produto.

No final da monografia, foi incluído um glossário no qual constam alguns termos técnicos mencionados ao longo do texto.

## *CAPÍTULO 1*

### *INTRODUÇÃO*

#### *1.1 COMENTÁRIOS INICIAIS*

Atualmente, cada vez mais as empresas vêm se preocupando com a qualidade, não apenas de seus produtos e processos, mas também com a qualidade de vida de seus funcionários, com o impacto ambiental que suas instalações acarretam e com sua inserção na sociedade como um todo. Estes aspectos revelam que, atualmente, o significado de qualidade é muito mais abrangente que a abordagem inicialmente dada ao termo por volta da década de 30. Nesta década, a visão de qualidade estava fortemente vinculada à idéia de atender às especificações. Frente a esta evolução, para que uma empresa mantenha-se competitiva no mercado em que atua, é fundamental que ela acompanhe estas mudanças.

Mizuno e Akao (1994) introduziram o termo “A nova era da qualidade”, que caracteriza-se por uma mudança do foco no consumidor para o foco na sociedade, isto é, a preocupação em manufaturar produtos que não prejudiquem terceiros ou esgotem fontes naturais de recursos. Nesta “nova era da qualidade”, há também a preocupação com a globalização da qualidade, no sentido de atender a um mercado diversificado e complexo que envolve mudanças radicais na qualidade demandada pelo cliente.

A indústria vem utilizando atualmente, muitas ferramentas estatísticas em programas de melhoria que visam, em geral, fatores relacionados a eliminar desperdícios, reduzir índices de defeitos, eliminar a necessidade da realização de inspeção e aumentar a satisfação dos clientes (internos e externos), pois, esses fatores, implicam em um aumento da produtividade, da competitividade das empresas e, por consequência, da qualidade.

Considerando as necessidades atuais, equipes de trabalho formadas por estatísticos, engenheiros e pessoas envolvidas diretamente nos processos que compõem uma empresa, são extremamente valiosas para a detecção, análise e solução de problemas.

Uma vez que as empresas têm tido cada vez mais interesse em conhecer e utilizar técnicas estatísticas, é notável a necessidade de possuir dados de medição confiáveis para efetivamente realizar estudos analíticos.

O termo “medição” pode ser definido como “a atribuição de números para coisas materiais, para representar as relações entre elas no que se refere a propriedades particulares”. A qualidade dos dados de medição está relacionada com as propriedades estatísticas de medições múltiplas obtidas com um sistema de medição operando sob condições estáveis. Desta forma, pode-se ver o sistema de medição como um processo de produção de números (dados) como seu produto (Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Company, 1995). Como estes dados serão amplamente utilizados para a análise dos processos, é de salutar importância que se realize a avaliação do sistema de medição a ser usado.

Existem várias formas possíveis de avaliação de sistemas de medição. Segundo Deming, W.E. (1986), “Qualquer técnica pode ser útil se as suas limitações são compreendidas e levadas em conta”. Toda a medição tem algum erro. O objetivo é entender a magnitude desse erro e verificar se ele está dentro de limites aceitáveis.

Uma vez cumprida esta etapa do estudo, ou seja, quando já se pode confiar nos dados obtidos através do sistema de medição utilizado, é necessário que se dê a devida importância ao planejamento dos experimentos a serem realizados. As atividades de planejamento que antecedem a experimentação são críticas para o sucesso do programa experimental. Montgomery (1991) ressalta que o método de coleta de dados pode afetar as conclusões de um experimento. Um procedimento de coleta mal realizado pode levar a um desperdício financeiro e a resultados distorcidos da realidade.

O planejamento experimental é um método cada vez mais utilizado na indústria para fornecer informações sobre o funcionamento dos processos e é uma ferramenta muito importante na engenharia, no desenvolvimento de novos produtos, nos processos de manufatura e de melhorias. Quando conduzido corretamente, o experimento fornece uma riqueza de informações que auxiliam na solução de problemas e aceleram o ciclo dos projetos. A opinião prévia dos engenheiros e outros técnicos envolvidos no processo estudado, contribuem de forma efetiva no projeto do experimento.

Em muitos casos, pode-se ter como objetivo, construir um processo robusto, ou seja, que minimize os efeitos das variações externas. Pode-se também realizar a experimentação com o intuito de conhecer os efeitos dos parâmetros do processo sobre determinada característica de qualidade para, então, definir o melhor ajuste destes parâmetros, ou seja, aquele que proporciona o melhor desempenho do produto no que tange à característica em análise.

Montgomery (1991) relata que, para o uso da abordagem estatística, ao projetar e analisar um experimento, é necessário previamente possuir uma idéia do que será estudado, como os dados serão coletados e um mínimo entendimento qualitativo de como serão analisados.

A proposta desta monografia é utilizar a análise de sistemas de medição e a metodologia de projetos experimentais em um estudo de caso que tem como objetivo avaliar o desempenho dos medidores monofásicos produzidos na indústria na qual o trabalho será realizado.

## ***1.2 TEMA***

Diante da crescente importância dada atualmente à utilização de ferramentas estatísticas no ramo industrial, o estatístico passa a ser um componente importante das equipes formadas por engenheiros e pessoas envolvidas nos processos, que reúnem-se com o objetivo de obter melhorias.

Seu conhecimento de metodologias de planejamento, experimentação e análise é agregado ao conhecimento técnico em busca do melhor desempenho das características de qualidade que compõem os processos. Sendo assim, a estatística que era utilizada na análise e solução de problemas, apenas através de medidas descritivas ou gráficos de controle, hoje está inserida num enfoque mais amplo, que envolve, dentre outras técnicas, metodologia de coleta de dados, validação de sistemas de medição, planejamento e execução de experimentos, otimização e análise.

A experimentação é parte de um processo científico e um meio de aprender a respeito de como se comportam sistemas e processos. Com este fim, a abordagem de projetos de experimentos é cada vez mais utilizada no meio industrial e vem despertando crescente interesse na manufatura e engenharia.

### 1.3 JUSTIFICATIVA

Este trabalho ilustra como a utilização de técnicas estatísticas pode auxiliar na melhoria da qualidade de produtos e processos, e na produtividade; destaca a utilização da metodologia de projeto de experimentos na indústria e salienta seu potencial.

Segundo Hahn (1977), a escolha de um projeto experimental apropriado é mais importante que uma análise estatística sofisticada, pois os seus resultados freqüentemente serão evidentes numa simples análise gráfica; enquanto que, nem mesmo a melhor análise estatística poderá salvar um experimento mal planejado.

Muitas informações importantes podem ser obtidas ainda na fase de projeto do experimento quando, por exemplo, forem construídos diagramas lógicos através de *brainstormings* para a identificação dos componentes do experimento e possíveis inconsistências lógicas relacionadas ao objetivo do estudo. Em muitos casos, estas análises preliminares podem representar uma grande economia e balizar a alocação de recursos nas áreas que oferecem maiores oportunidades de melhoria dentro da organização.

A abordagem de projetos de experimentos enfocada na indústria, auxilia vastamente no estudo dos efeitos de determinados fatores nos processos e é particularmente recomendada quando possuímos numerosos fatores controláveis. As ferramentas estatísticas, em geral, têm grande aplicabilidade nos processos industriais e a importância da utilização da metodologia de projetos de experimentos vêm sendo reconhecida.

O conhecimento técnico dos engenheiros pode indicar uma ou várias características de qualidade que estejam prejudicando o desempenho de determinado processo bem como algumas suposições que ajudarão na fase de desenvolvimento do projeto. Porém, necessitamos saber quais os fatores que atuam sobre essa característica, que efeito eles têm, que níveis apresentam, para que possamos efetivamente agir sobre o processo realizando os ajustes necessários.

Dessa forma, torna-se evidente o auxílio que a metodologia de planejamento de experimentos pode nos proporcionar numa situação como esta, uma vez que o objetivo final da otimização experimental de um processo é identificar o ajuste dos parâmetros (fatores controláveis) que garante maior qualidade, maior produtividade e menor custo do processo.

## ***1.4 OBJETIVOS***

O objetivo principal desta monografia é avaliar o desempenho de determinado produto submetido a dois diferentes testes, através da utilização de estudos de Repetibilidade e Reprodutibilidade e da metodologia de projetos de experimentos na indústria, para determinar o ajuste ideal dos parâmetros do processo (fatores controláveis) que interferem nas características de qualidade (variáveis resposta) relevantes para a aprovação do produto.

Além disso, o método proposto pretende ser de fácil entendimento para profissionais que não sejam estatísticos envolvidos no processo, proporcionando assim, sua utilização em situações similares.

## ***1.5 METODOLOGIA***

Ao conversar com a equipe técnica envolvida, definiu-se o escopo da pesquisa e a metodologia a ser seguida para o desenvolvimento do estudo.

- foi realizada uma revisão bibliográfica sobre R&R (Repetibilidade e Reprodutibilidade) e a aplicação da metodologia de projetos de experimentos na indústria;
- a análise do sistema de medição foi realizada com o objetivo de verificar-se a consistência dos resultados gerados pelo dispositivo utilizado;
- o experimento foi devidamente planejado e executado através da realização de um estudo de caso;
- uma vez coletados, os dados foram analisados;
- os comentários finais e os resultados foram apresentados.

## ***1.6 ESTRUTURA***

A apresentação deste trabalho será subdividida em quatro capítulos, conforme a seguinte discriminação:

O **Capítulo 1** apresenta os comentários iniciais, o tema, a justificativa, os objetivos, a metodologia utilizada, a estrutura da pesquisa e suas limitações.

O **Capítulo 2** é constituído de uma revisão bibliográfica sobre análise e avaliação de sistemas de medição e metodologia de planejamento de experimentos (ou projeto de experimentos, ou delineamento de experimentos) e otimização.

O **Capítulo 3** descreve o estudo de caso. A empresa onde foi realizado, a caracterização do produto analisado, o desenvolvimento e análise do projeto são apresentados neste capítulo.

No **Capítulo 4** são feitas as considerações finais e sugestões para pesquisas futuras.

## ***1.7 LIMITAÇÕES***

Neste trabalho de conclusão, o experimento foi realizado utilizando-se apenas um determinado tipo de produto. O modelo escolhido apresenta grandes oportunidades de melhoria, mas seria interessante que fosse verificado também o desempenho dos outros modelos fabricados, o que proporcionaria uma comparação entre diferentes modelos em relação às mesmas características.

O sistema de medição utilizado para fornecer os dados dos testes que avaliam o desempenho do produto, é composto por três bancas independentes, porém, apenas uma delas foi utilizada neste estudo devido a restrições práticas de execução do experimento.

Além disso, devido ao interesse da empresa em avaliar-se a qualidade do produto em uma etapa específica do processo, pode-se ter desprezado informações relevantes ao estudo.

## ***CAPÍTULO 2***

### ***REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

#### ***2.1 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO***

O benefício de se usar um procedimento baseado em dados é amplamente determinado pela qualidade dos dados de medição utilizados. Se a qualidade é baixa, o benefício do procedimento também o será. Similarmente, se a qualidade é alta, o benefício provavelmente será alto também. Para assegurar que os benefícios derivados do uso de dados de medição sejam suficientemente grandes para compensar o custo de obtê-los, deve-se focalizar atenção especial sobre a sua qualidade.

Uma das razões mais comuns que levam a resultados de má qualidade é a variação. Grande parte da variação presente em um conjunto de medições é devida à interação entre o sistema de medição e seu meio ambiente e, quando assume grandes proporções, a variação pode inutilizar os dados.

Uma vez que a validade das análises relativas ao desempenho do processo depende da validade dos dados, é essencial que o sistema de medição seja adequado.

Existem muitos procedimentos disponíveis para avaliar os sistemas de medição, e, a escolha entre eles depende de uma variedade de fatores. Às vezes é necessário determinar o método em uma base de caso a caso para cada sistema de medição a ser avaliado, sendo que, em alguns casos, pode haver a necessidade de realização de testes preliminares para determinar se um procedimento é apropriado ou não para um sistema de medição.

Algumas questões devem ser consideradas para a seleção do procedimento de avaliação: o custo do teste; o tempo necessário; consideração de medições cegas, ou seja, aquelas obtidas no ambiente real de medição sem o conhecimento do operador; comparação

com medições feitas por outro sistema de medição considerado padrão; frequência do teste, além de questões específicas que poderão surgir.

A análise dos sistemas de medição pode fornecer um critério para aceitar novos equipamentos; uma comparação entre um sistema de medição e outro; uma base para avaliar um dispositivo suspeito de ser deficiente; uma comparação para um equipamento de medição antes e depois de ser reparado; um componente necessário para o cálculo da variação do processo, e o nível de aceitação para o processo produtivo; informações necessárias para estabelecer uma Curva de Desempenho do Dispositivo de Medição (CDD), a qual indica a probabilidade de aceitar uma peça para cada valor real.

Geralmente, os dados provenientes de sistemas de medição são quantitativos, porém, em muitas operações industriais o controle é feito pela monitorização de atributos, onde é feito um julgamento do tipo bom/ruim para cada unidade inspecionada. Dessa forma, são caracterizados dois diferentes tipos de dispositivos de medição: por variáveis e por atributos.

### ***2.1.1 Dispositivo de Medição por Variáveis***

O objetivo de qualquer análise de um sistema de medição deveria ser entender melhor as fontes de variação que podem influenciar nos resultados gerados pelo sistema. Este entendimento permite quantificar as limitações de sistemas específicos de medição.

O Dispositivo de Medição por Variáveis deve ter a capacidade de detectar e indicar confiavelmente quaisquer mudanças na característica medida. Este tipo de dispositivo pode ser analisado segundo os seguintes aspectos: estabilidade (desempenho do sistema ao longo do tempo), tendência (diferença entre a média observada e o valor de referência), linearidade (desempenho do dispositivo ao longo de toda a sua faixa de uso), repetitividade (variação do sistema de medição quando um mesmo operador mede a mesma peça mais de uma vez) e reprodutibilidade (variabilidade entre operadores, ou seja, variação na média das medidas feitas por diferentes operadores utilizando o mesmo dispositivo de medição e medindo características idênticas na mesma peça); além disso, também é possível quantificar a variação peça-a-peça.

### ***2.1.2 Dispositivo de Medição por Atributos***

Um dispositivo de medição por atributo é aquele que compara cada peça com um conjunto específico de limites e aceita a peça se os limites são satisfeitos, caso contrário, rejeita. Muitos destes dispositivos são ajustados para aceitar e rejeitar um conjunto de peças padrão. Diferente de um dispositivo de medição por variável, um atributo não pode indicar quanto a peça é boa ou ruim, somente se é ou não aceita.

Para avaliar a consistência e uniformidade dos critérios de julgamento, pode-se efetuar um estudo deste tipo de sistema de medição. Como em qualquer dispositivo, quando temos medição por atributo a estabilidade do processo também deveria ser verificada e, se necessário, monitorada. Uma maneira usual de realizar esta análise é trabalhar com cartas de controle por atributos, de amostra constante ao longo do tempo.

O conceito da Curva de Desempenho do Dispositivo para medição por atributos é usado para avaliar a repetitividade e a tendência.

É possível quantificar também a reprodutibilidade e a repetitividade através da contagem das observações classificadas em ao menos uma oportunidade como defeituosas.

Em geral, se os erros nestes aspectos não ultrapassarem 20%, o sistema será aceito. Se a repetibilidade for ruim, talvez seja necessário um treinamento geral dos operadores ou a aquisição de instrumentos mais precisos, de leitura mais fácil. Por outro lado, se a reprodutibilidade for ruim, talvez seja necessário padronizar os procedimentos de medição ou fornecer treinamento específico a alguns dos operadores.

## ***2.2 PROJETOS EXPERIMENTAIS***

Segundo Hicks (1964), o objetivo do planejamento de experimentos é obter mais informações por um custo menor que a experimentação tradicional. Hahn (1977) acrescenta ainda, outras razões para a utilização de planejamentos experimentais, como a necessidade de entender possíveis interações entre as variáveis e quantificar o erro experimental.

Usando planejamentos experimentais baseados em princípios estatísticos, os pesquisadores podem extrair do sistema em estudo o máximo de informação útil, fazendo um número mínimo de experimentos. Além disso, segundo Neto (1996), os métodos estatísticos

são ferramentas poderosas com as quais vários objetivos específicos podem ser alcançados. Pode-se fabricar produtos com melhores características, diminuir o tempo de seu desenvolvimento, aumentar a produtividade dos processos, minimizar a sensibilidade de produtos às variações nas condições ambientais, e assim por diante.

Um experimento é geralmente um veículo para conduzir inferências sobre o mundo real, por isso é importante definir o escopo da pesquisa, uma vez que fazer inferências fora da área abrangida pelo estudo seria muito arriscado.

Freqüentemente o pesquisador está ansioso em coletar dados e realizar testes estatísticos para tirar conclusões, sem dar atenção à forma de coleta dos dados. Porém, o planejamento de experimentos antes da realização da coleta de dados pode conduzir a conclusões mais precisas.

Ao iniciar o planejamento de um experimento, o pesquisador deve formular uma série de quesitos e buscar respondê-los. Veja abaixo, alguns deles:

- a) Quais as características que serão analisadas?

Num mesmo experimento, várias características podem ser estudadas, portanto, é necessário definir adequadamente quais são importantes, para que as mesmas possam ser determinadas no decorrer do experimento.

- b) Quais os fatores que afetam essas características?

Deve-se relacionar todos os fatores que possuem efeito sobre as características que serão estudadas.

- c) Quais desses fatores serão estudados no experimento?

Nos experimentos simples, apenas um tipo de tratamento ou fator pode ser estudado de cada vez, sendo os demais fatores mantidos constantes. No caso de experimentos mais complexos, como os experimentos fatoriais e em parcelas subdivididas, é possível estudar simultaneamente os efeitos de dois ou mais tipos de tratamentos ou fatores.

d) Como será a unidade experimental?

A unidade experimental ou parcela poderá ser um único “item” ou um conjunto deles. Se for apenas um, no caso de haver algum problema no experimento, pode-se ter uma parcela perdida, o que às vezes dificulta a análise estatística.

e) Quantas repetições deverão ser utilizadas?

O número de repetições de um experimento depende do número de tratamentos a serem confrontados e do delineamento experimental escolhido. Quanto maior o número de repetições, maior será a precisão do experimento.

Hicks (1964) destaca três importantes fases no planejamento de um experimento: (i) o experimento, (ii) o projeto e (iii) a análise.

**(i) O experimento:** inclui uma declaração do problema a ser resolvido. É importante que venham à tona os objetivos do pesquisador. A definição cuidadosa do problema é um meio de chegar-se à solução. Coleman e Montgomery (1993) relatam que durante o reconhecimento e formulação do problema é importante o envolvimento da equipe, integrando conhecimentos teóricos e práticos.

Nesta etapa, determinam-se as variáveis resposta e suas características, tais como: são mensuráveis? Podem ser medidas com acurácia pelo instrumento? Se não são mensuráveis, que tipo de resposta esperamos? Que tipo de distribuição esperamos que os dados apresentem?

É necessária também, a identificação dos fatores que podem interferir nas variáveis resposta e a possibilidade de serem controlados ou deixados de fora através de um processo de aleatorização. Além disso, questões como: ‘os níveis dos fatores são fixos ou aleatórios?’, ‘os fatores são quantitativos ou qualitativos?’, são considerações que auxiliam na definição do experimento.

**(ii) O projeto:** esta fase é muito importante para a qualidade dos resultados do experimento.

Antes da coleta dos dados, deve-se ter conhecimento sobre questões como: qual o tamanho das diferenças que pode ser detectado, quanta variação está presente e qual o risco que se pode aceitar para que, então, o tamanho da amostra possa ser definido.

Quando estas informações não estão disponíveis, uma alternativa é tomar o maior número possível de observações. Na prática, porém, o tamanho da amostra normalmente é arbitrário e dependerá de restrições experimentais, do tipo de projeto escolhido e dos recursos disponíveis para o estudo.

A ordem dos ensaios na realização do experimento deve ser a mais aleatória possível pois, esse fato, tenderá a distribuir o efeito dos fatores não controláveis. Assim, é necessário definir a forma de aleatorização e a maneira como serão distribuídas as unidades experimentais.

Decididas as rodadas, escolhe-se o modelo matemático a ser utilizado para descrever o experimento. Este modelo apresentará as variáveis resposta como função de todos os fatores considerados relevantes no estudo bem como das restrições impostas ao experimento devido ao método de aleatorização.

*(iii) A análise:* o último passo inclui o procedimento de coleta, resumo e análise de dados. Pode-se realizar testes estatísticos para testar hipóteses sobre o modelo matemático e apresentar resultados preliminares utilizando-se métodos gráficos, de fácil entendimento, para auxiliarem na compreensão do sistema investigado.

Sendo assim, de forma esquemática, Hicks (1964) apresenta os seguintes tópicos a serem contemplados no projeto de um experimento:

***O experimento:***

- 1-definição do problema;
- 2-escolha das variáveis resposta;
- 3-seleção dos fatores controláveis a serem analisados;
- 4-escolha dos níveis dos fatores (fixos ou aleatórios, quantitativos ou qualitativos);

***O projeto:***

- 1-determinação do número de observações;
- 2-ordenação da experimentação;
- 3-método de aleatorização utilizado;
- 4-definição do modelo matemático que descreve o experimento;

### ***A análise:***

- 1-coleta e processamento de dados;
- 2-realização de testes estatísticos;
- 3-interpretação dos resultados.

#### ***2.2.1 Identificação dos Fatores***

A cuidadosa seleção dos tratamentos, ou seja, dos fatores e seus níveis de variação, é importante não apenas na obtenção dos objetivos do pesquisador mas também para aumentar a precisão do experimento.

Conforme Hahn (1977), uma parte importante do planejamento de um experimento é identificar os fatores que afetam a resposta e decidir o que fazer a respeito deles.

O pesquisador deve escolher os fatores para variar no experimento e seus respectivos intervalos de variação, respeitando os limites operacionais, além de especificar os níveis em que as rodadas serão realizadas. Deve também determinar quais os fatores serão controlados e como serão medidos.

Coleman e Montgomery (1993) salientam que o conhecimento empírico da equipe deve ser o ponto de partida para planejar o estudo experimental, pois, mesmo incertas, as tentativas de prever o resultado do experimento antes deste ser rodado podem favorecer a integração da equipe além de, freqüentemente, levar à revisão da escolha dos níveis dos fatores.

Após a realização do levantamento dos fatores que compõem o experimento, a equipe pode desejar manter fixos alguns deles. Estes fatores, denominados *fatores a serem mantidos constantes*, são os parâmetros do processo que podem ser controlados, mas que possivelmente não têm efeito significativo sobre a resposta ou cujos efeitos já sejam conhecidos (Caten, 1995).

Podemos ter presentes também, fatores que não podem ser controlados ou que a equipe não deseja controlar, como alterações no ambiente operacional, desgaste dos equipamentos, umidade, oxidação. Estes são chamados *fatores ruído* e diferem dos fatores mantidos constantes por não poderem ser fixados a determinados níveis para todas as unidades experimentais.

### ***2.2.2 Determinação das Restrições Experimentais***

As restrições práticas para realização de um experimento devem ser amplamente discutidas pela equipe envolvida, uma vez que uma simples restrição desconhecida pode invalidar todo o projeto experimental.

Do conhecimento destas restrições dependem o tipo de projeto a ser executado e o número possível de ensaios, por isso é importante que conhecimentos práticos sejam agregados aos conhecimentos teóricos.

### ***2.2.3 Escolha do Projeto Experimental***

A escolha do projeto experimental envolve a consideração do tamanho da amostra (número de repetições), a seleção adequada de fatores e a determinação das restrições presentes.

Existem três princípios básicos em um experimento: replicação (repetição), aleatorização (ou casualização) e bloqueamento (ou controle local).

A replicação permite a obtenção de uma estimativa do erro experimental, o qual é a base de medida para determinar se as diferenças observadas entre os tratamentos são estatisticamente significativas.

A aleatorização, segundo Hahn (1977), é a atribuição de forma aleatória das unidades experimentais aos tratamentos, da ordem das rodadas dos testes e da realização das medidas. Sua utilização é justificada pela eliminação de qualquer viés nas respostas além de validar a suposição de muitos métodos estatísticos acerca da independência do erro das observações.

Já o controle local, ou o bloqueamento, é utilizado para aumentar a precisão do experimento. O efeito da variável bloqueada é eliminado do erro experimental. Segundo Hahn (1977), a principal vantagem em rodar um experimento em blocos é assegurar que o efeito de um fator externo não contamine a avaliação dos fatores controláveis do experimento.

### **2.2.4 Alguns Tipos de Projetos Experimentais**

#### **a) Experimentos Inteiramente Casualizados (DIC, ou DCC)**

Os experimentos inteiramente casualizados são aqueles que levam em conta somente os princípios da repetição e da casualização, deixando de lado o princípio do controle local. Consequentemente, as parcelas ou unidades experimentais são distribuídas aleatoriamente.

Este delineamento é mais freqüentemente utilizado em experimentos de laboratório, onde as condições experimentais podem ser perfeitamente controladas.

Gomes (1976) cita duas vantagens importantíssimas desse delineamento em relação a outros mais complexos: (i) qualquer número de repetições ou de tratamentos pode ser usado e o número de repetições pode variar de um tratamento para outro, sem que isto dificulte a análise; (ii) o número de graus de liberdade para o resíduo é o maior possível proporcionando a alta sensibilidade dos testes.

Como desvantagem, o mesmo autor cita o fato de que, geralmente, este tipo de delineamento conduz a estimativas muito altas da variância do resíduo, uma vez que todas as variações, além das atribuídas aos tratamentos, são tomadas como variações do acaso.

#### **b) Experimentos em Blocos Casualizados (DBC)**

Esse delineamento leva em consideração os três princípios básicos da experimentação: repetição, casualização e controle local. É o mais empregado de todos os delineamentos experimentais e é adequado quando temos dúvidas sobre a homogeneidade ambiental, ou se temos certeza da sua heterogeneidade. Nesta situação, estabelecemos sub-ambientes (blocos) homogêneos e instalamos, em cada um deles, inteiramente ao acaso, todos os tratamentos, igualmente repetidos.

As principais vantagens desse delineamento são: (i) controla as diferenças que ocorrem nas condições ambientais, de um bloco para outro; (ii) permite, dentro de certos limites, utilizar qualquer número de tratamentos e de blocos; (iii) conduz a uma estimativa mais exata para a variância residual, uma vez que a variância entre blocos é isolada; (iv) a análise de variância é simples, havendo apenas mais uma causa de variação a ser isolada, em relação ao DIC.

Como desvantagens desse delineamento em relação aos demais, citamos: (i) a redução do número de graus de liberdade do resíduo, uma vez que isolamos o efeito dos blocos; (ii) a exigência de homogeneidade das parcelas dentro de cada bloco limita o número de tratamentos.

$$\text{Modelo linear: } y_{ij} = \mu + \tau_i + \beta_j + \varepsilon_{ij}, \text{ onde:} \quad (1)$$

$y_{ij}$  é a observação do tratamento  $i$  no bloco  $j$ ;

$\mu$  é o efeito da média geral;

$\tau_i$  é o efeito do tratamento  $i$ ;

$\beta_j$  é o efeito do bloco  $j$ ;

$\varepsilon_{ij}$  é o erro não observável associado à observação  $ij$ .

Suposição:  $\varepsilon_{ij} \overset{\text{iid}}{\sim} N(0; \sigma^2)$

#### *c) Blocos Incompletos*

Quando o material a investigar é muito grande ou o material em estudo é muito heterogêneo, ou ainda, quando certas limitações restringem excessivamente o tamanho do bloco, há, muitas vezes, interesse em organizar blocos incompletos, isto é, blocos que não incluem todos os tratamentos.

Neste delineamento, o tamanho dos blocos, o número de repetições por tratamento e o número de vezes que determinado tratamento ocorre em cada bloco podem ser quaisquer.

#### *d) Quadrados-latinos*

São projetos experimentais onde cada nível de um fator é combinado somente uma vez com cada nível de dois outros fatores. São considerados projetos econômicos, pois exigem poucas rodadas, no entanto, não permitem a análise de interações.

Segundo Montgomery (1991), o quadrado latino é utilizado para eliminar as diferenças de duas fontes de variabilidade, pois permitem a blocagem em duas direções. Assim sendo, as linhas e colunas representam duas restrições de aleatorização.

Quando tivermos muitos tratamentos e/ou exagerado número de repetições, este delineamento torna-se inexecutável. Os mais usados são os quadrados-latinos 5X5 a 8X8.

A análise dos dados para o projeto com quadrados-latinos é uma extensão dos delineamentos em blocos, onde os tratamentos de um bloco numa repetição se distribuem por todos os blocos de qualquer das outras repetições.

O modelo matemático deste projeto pode ser observado em (2):

$$y_{ij(k)} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \omega_{(k)} + \varepsilon_{ij(k)}, \quad (2)$$

onde:

$\alpha_i$ , linha;

$\beta_j$ , coluna;

$\omega_{(k)}$ , tratamento;

$\varepsilon_{ij(k)}$ , erro aleatório.

Os níveis  $\omega_{(k)}$  são fixos, isto é,  $\sum \omega_{(k)} = 0$ . O subíndice k vai entre parênteses porque na verdade não temos um novo fator, e sua variabilidade está inserida dentro dos outros dois fatores.

#### *e) Experimentos Fatoriais*

Os experimentos fatoriais são aqueles que envolvem combinações entre os níveis de dois ou mais fatores a serem estudados. Quando consideramos todas as combinações temos um fatorial completo; em caso contrário, um fatorial incompleto. Estes experimentos não constituem um delineamento experimental, e sim um esquema orientado de desdobramento de graus de liberdade de tratamentos e podem ser instalados em qualquer dos delineamentos experimentais.

Uma das grandes vantagens dos ensaios fatoriais é que eles nos permitem tirar conclusões mais amplas a respeito dos fatores (qualitativos ou quantitativos) que estão sendo

estudados, uma vez que são pesquisadas simultaneamente diferentes combinações de seus níveis. Pode-se citar ainda, outras vantagens no uso de fatoriais: (i) maior eficiência no uso de recursos experimentais disponíveis, (ii) informação sobre interação de fatores, (iii) maior precisão para estimativa de efeitos principais de fatores, dada a existência de repetições não-aparentes (do delineamento de tratamentos, ou intrínsecas). Como desvantagens, observa-se (i) a maior dificuldade na seleção de unidades experimentais homogêneas, devido à possibilidade do grande número de tratamentos, (ii) se houverem muitos fatores a serem estudados, ter-se-á dificuldades na escolha do delineamento experimental e na execução do experimento, (iii) certos tratamentos (combinações de níveis dos fatores) podem ser de pouco interesse e desta forma, alguns recursos experimentais estariam sendo desperdiçados.

Ao analisar-se experimentos fatoriais, pode-se concluir a respeito da existência de diferentes tipos de efeitos assim definidos:

**Efeito simples:** efeito de um fator dentro de cada nível do outro.

**Efeito principal:** média dos efeitos simples.

**Efeito da interação:** magnitude do efeito adicional observado no efeito de um dos fatores na presença dos níveis do outro fator, efeito adicional este que não é produzido por nenhum dos fatores isoladamente. Logo, se identificarmos interação significativa entre os fatores, estes não são independentes, ou seja, o efeito de um fator depende do nível do outro.

### ***e.1) Experimentos fatoriais com dois fatores cruzados fixos:***

Admitindo-se instalação em DCC, o modelo linear é dado por:

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \text{ onde:} \quad (3)$$

$\mu$  é a média geral;

$\alpha_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator A;

$\beta_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo nível do fator B;

$\alpha\beta_{ij}$ , é o efeito da interação entre o  $i$ -ésimo nível de A e o  $j$ -ésimo nível de B;

$\varepsilon_{ij}$  é um erro aleatório associado à observação  $y_{ijk}$

Restrições:

$$\left. \begin{array}{l} \sum_{i=1}^a \alpha_i = 0 \quad \sum_{j=1}^b \beta_j = 0 \\ \sum_{i=1}^a \alpha \beta_{ij} = 0, \quad \forall j \\ \sum_{j=1}^b \alpha \beta_{ij} = 0, \quad \forall i \end{array} \right\} \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^b \alpha \beta_{ij} = 0$$

Suposições:  $\varepsilon_{ijk} \stackrel{\text{iid}}{\sim} N(0; \sigma^2)$

$y_{ijk} \sim N(\mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha \beta_{ij}; \sigma^2)$  e independentes

Admitindo-se instalação em DBC, o modelo linear é dado por:

$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha \beta_{ij} + R_k + \varepsilon_{ijk}$ , onde  $R_k$  representa o efeito de bloco.

### e.2) Experimentos fatoriais com três fatores cruzados fixos:

$$\text{DCC: } y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + \varepsilon_{ijkl} \quad (4)$$

$$\text{DBC: } y_{ijk} = \mu + A_i + B_j + C_k + AB_{ij} + AC_{ik} + BC_{jk} + ABC_{ijk} + R_l + \varepsilon_{ijkl} \quad (5)$$

onde:

$i$  é o índice do fator A,  $i = 1, 2, \dots, a$

$j$  é o índice do fator B,  $j = 1, 2, \dots, b$

$k$  é o índice do fator C,  $k = 1, 2, \dots, c$

$l$  é o índice de repetição,  $l = 1, 2, \dots, r$

Além destes delineamentos fatoriais, existem ainda: fatoriais cruzados aleatórios, fatoriais cruzados mistos, fatoriais hierárquicos e fracionários os quais não serão detalhados neste trabalho.

*f) Delineamento em Parcelas Subdivididas (“Split Plot”)*

Nos experimentos fatoriais, todas as combinações de tratamentos são distribuídas nas unidades experimentais, seguindo a casualização característica de um delineamento inteiramente casualizado, em blocos ou em quadrado latino. Entretanto, outros tipos de casualização são possíveis e uma dessas alternativas nos leva ao delineamento em parcelas subdivididas, que é um tipo especial de delineamento em blocos incompletos.

Sua principal característica é que parcelas ou unidades inteiras, que recebem os níveis de um dos fatores, são divididas em subparcelas às quais os níveis de um fator adicional são aplicados.

Uma vantagem da utilização deste delineamento é que a precisão das comparações entre níveis do fator alocado na subparcela e na interação dos fatores aumenta, quando comparado ao esquema fatorial em DBC. Como desvantagens tem-se que: o fator alocado na parcela principal é medido com menor precisão do que seria num DBC e a análise estatística é mais complexa, principalmente quando ocorre perda de parcelas.

O Delineamento em Parcelas Subdivididas é aplicável quando: (i) os tratamentos associados aos níveis de um dos fatores exigem maior quantidade de material na unidade experimental do que os tratamentos do outro fator; (ii) um fator adicional é incorporado num experimento, para ampliar seu objetivo; (iii) através de informação prévia, sabe-se que maiores diferenças podem ser esperadas entre os níveis de um certo fator do que de outro.

Admitindo-se as parcelas principais dispostas em blocos, o modelo matemático é dado por:

$$y_{ijk} = \mu + \rho_i + \alpha_j + \delta_{ij} + \beta_k + \alpha\beta_{ik} + \varepsilon_{ijk} \quad (6)$$

onde:

$y_{ijk}$  : valor observado na subparcela k, da parcela j e repetição i

$\mu$ : média geral

$\rho_i$ : repetição

$\alpha_j$  : fator na parcela A

$\delta_{ij}$  : erro na parcela

$\beta_k$  : fator na subparcela B

$\alpha\beta_{ik}$  : interação dos dois fatores

$\varepsilon_{ijk}$  : erro da subparcela

i: índice de repetição,  $i = 1, 2, \dots, r$

j: índice do fator A,  $j = 1, 2, \dots, a$

k: índice do fator B,  $k = 1, 2, \dots, b$

Estes são alguns dos projetos experimentais mais utilizados, os quais não apresentam grande complexidade.

No capítulo 3 , a função perda quadrática multivariada é utilizada para a otimização global das variáveis resposta e é definida a seguir.

### **2.3 OTIMIZAÇÃO**

A otimização de produtos e processos é uma tarefa de extrema importância no meio industrial, pois pode implicar em redução de custos e/ou melhoria da qualidade e produtividade. Seu objetivo é identificar quais os ajustes dos fatores controláveis do processo que melhor atendem às variáveis resposta de interesse para o cliente.

Em geral, o processo de otimização envolve múltiplas variáveis resposta uma vez que geralmente muitos aspectos de um produto ou processo são importantes. Da mesma forma, é necessário satisfazer múltiplos objetivos para se atingir qualidade, sendo eles, minimizar os desvios do alvo, maximizar a robustez aos fatores de ruído e às oscilações dos fatores controláveis.

A otimização global consiste em identificar o ajuste dos fatores controláveis que otimiza simultaneamente todas as variáveis resposta de interesse do cliente. Essa otimização global implica em compromisso entre as variáveis resposta, ou seja, obtém-se uma solução conciliatória que pondera as importâncias relativas de cada variável resposta sobre o produto final.

Etapas para a obtenção da otimização global das variáveis resposta:

- a) a partir dos resultados do experimento, faz-se uma modelagem individual das variáveis resposta, de forma que os modelos estejam em função apenas dos fatores controláveis que apresentaram efeito significativo sobre a variável resposta modelada. Com a modelagem individual, pode-se quantificar o efeito dos fatores

controláveis ( parâmetros do processo) sobre cada variável resposta. Desta forma, pode-se identificar qual o ajuste ótimo dos fatores controláveis para cada variável resposta separadamente. No entanto, muitas vezes um certo ajuste dos fatores controláveis pode melhorar uma determinada variável resposta e piorar outras. Raramente o mesmo ajuste conduz ao valor ideal de todas as variáveis resposta simultaneamente.

- b) conhecendo-se os modelos individuais para as múltiplas variáveis resposta, eles são incorporados em uma função objetivo (geralmente uma função de perda), que pondera a importância relativa de cada uma dessas variáveis. Dessa forma, pode-se trabalhar um problema complexo, com múltiplas variáveis resposta, na forma de um problema simples, com uma única resposta a otimizar. Além disso, essa função objetivo incorpora também os diferentes objetivos para se atingir qualidade: (i) manufaturar produtos (ou obter processos) com variáveis resposta o mais próximo possível do seu valor ideal, ou seja, dos valores especificados no projeto; (ii) maximizar a robustez aos fatores de ruído, ou seja, escolher níveis dos fatores controláveis que minimizem a variabilidade devido ao efeito dos fatores de ruído de forma que o produto (ou processo) tenha um bom desempenho mesmo quando submetido a condições adversas do meio; (iii) tornar o processo robusto às oscilações nos próprios fatores controláveis, pois, muitas vezes, é difícil manter os fatores controláveis fixos em seus níveis pré-determinados na linha de produção. Logo, é necessário obter ajustes dos fatores controláveis que fornecerão valores adequados das variáveis resposta mesmo quando ocorrem oscilações em torno do ajuste definido.

Para a realização da otimização global, pode-se utilizar a Função de Perda Quadrática Multivariada (7), a qual avalia a perda incorrida ao consumidor devida aos três aspectos mencionados anteriormente. Esta perda aumenta quadraticamente à medida que a variável resposta afasta-se do seu valor nominal.

$$\hat{Z} = \sum_{j=1}^J w_j \left[ \left( \hat{Y}_j - T_j \right)^2 + \hat{\sigma}_{Y_j}^2 + \sum_{k=1}^K \hat{\sigma}_{X_k}^2 \left( \frac{\partial \hat{Y}_j}{\partial X_k} \right)^2 \right] \quad (7)$$

onde:

- $\hat{Z}$  é a função a ser minimizada; para cada ajuste dos fatores controláveis, pode-se obter um valor estimado de  $Z$ ;
- $w_j$  são pesos que levam em conta a unidade e importância relativa de cada variável resposta;
- $T_j$  é o valor ideal para a variável resposta  $j$ ;
- $\hat{Y}_j$  é o modelo de regressão obtido para cada variável resposta  $j$ ;
- $\hat{\sigma}_{Yj}$  é a estimativa do desvio padrão da variável resposta  $j$ ;
- $\hat{\sigma}_{Xk}$  é a estimativa do desvio padrão do fator controlável  $k$ .

Esta versão da função de perda refere-se a variáveis resposta do tipo nominal-é-melhor. O valor da perda é mínimo quando a média do processo (valor médio) coincide com o valor ideal, e a perda aumenta simetricamente à medida que se afasta do valor ideal. Além disso, a função perda apresentada não incorpora as possíveis interações que possam ocorrer entre as variáveis resposta.

## ***CAPÍTULO 3***

### ***ESTUDO DE CASO***

#### ***3.1 APRESENTAÇÃO DA EMPRESA***

O estudo de caso desenvolvido nesta monografia surgiu da necessidade apresentada pela empresa onde a autora realiza estágio, em reuniões com a equipe técnica. A partir desta necessidade, foi feito o planejamento da metodologia a ser utilizada e das técnicas pertinentes à análise do problema.

A ABB-Cachoeirinha, é uma empresa do grupo ASEA BROWN BOVERI, com sede em Zurich-Suíça o qual é o maior grupo mundial em engenharia de energia. A natureza do negócio da unidade Cachoeirinha é o desenvolvimento de soluções em medição de energia, e tem como produtos destaque, medidores eletromecânicos e eletrônicos, nas versões monofásicos e polifásicos.

A empresa não mede esforços quando o assunto é *qualidade*, e, é buscando continuamente a satisfação de seus clientes internos e externos através da qualidade de seus produtos e serviços que mantém-se competitiva no mercado em que atua. Como informação adicional, vale ressaltar que a ABB-Cachoeirinha é certificada em ISO9000 e ISO14000 e utiliza a metodologia *Six Sigma* como ferramenta gerencial, o que vem a demonstrar que acredita no potencial das técnicas estatísticas na detecção, análise e solução de problemas, em todos os processos produtivos e administrativos.

A metodologia *Six Sigma* alia ao conhecimento técnico das pessoas envolvidas nos processos, o estudo e aplicação desde técnicas estatísticas descritivas, até aquelas mais sofisticadas como análise de regressão, análise de variância e projetos de experimentos para otimização de processos e redução de custos. Para tanto, busca-se oportunidades de melhoria

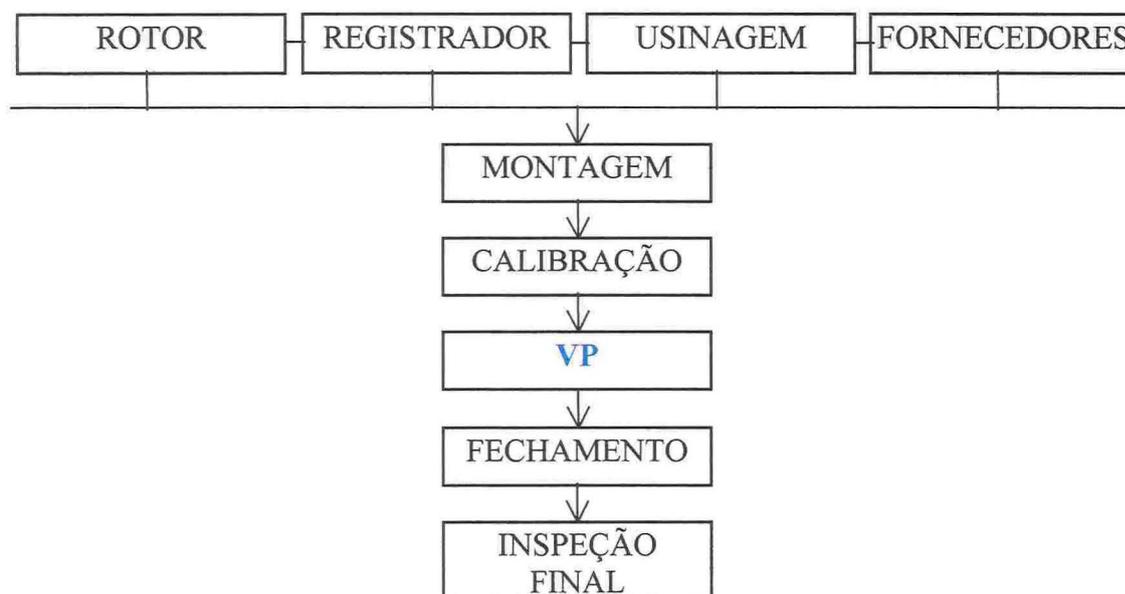
em qualquer parte da empresa, as quais geram projetos que são continuamente desenvolvidos e aprimorados.

Neste contexto, Hahn (1998), ressalta a crescente importância do profissional de estatística na indústria, seja em treinamentos ou trabalhando em equipes gerenciais e/ou técnicas, na análise e solução de problemas relacionados a todos os processos, e não apenas a problemas específicos de manufatura, como ocorria no passado.

### 3.2 IDENTIFICAÇÃO DA OPORTUNIDADE DE MELHORIA

Numa visão sistêmica da empresa, muitas foram as oportunidades de melhoria que surgiram quando a equipe se reuniu para priorizar uma delas a ser analisada nesta monografia.

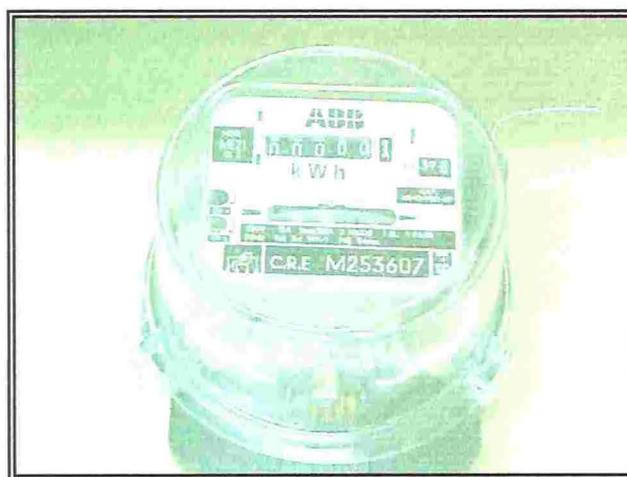
Decidiu-se, *a priori*, trabalhar em uma das etapas do processo de produção de medidores eletromecânicos monofásicos (Figura 3.1), uma vez que posteriormente o estudo poderá ser estendido também aos polifásicos. O esforço foi concentrado no teste VP – Vazio Partida ou corrente de partida e marcha à vazio, o último realizado antes do fechamento do medidor que, em seguida, passa pela inspeção final e está pronto para ser entregue ao cliente.



**Figura 3.1 – Desdobramento da etapas do processo de produção de medidores.**

O teste VP simula situações encontradas em campo, nas quais o medidor (Figura 3.2) necessita estar em perfeito funcionamento para que o consumo de energia seja corretamente mensurado. Informalmente, pode-se dizer que os teste de corrente de partida e marcha em vazio reproduzem situações onde inicialmente se tem um consumo mínimo de energia e se verifica a sensibilidade do produto, que deve registrar este consumo corretamente: corrente de partida. Ao mesmo tempo é necessário que, quando não há consumo, o medidor fique estanco: marcha em vazio.

O objetivo do estudo de caso desenvolvido nesta monografia foi avaliar o desempenho dos medidores monofásicos nos ensaios de corrente de partida e marcha a vazio (VP), visto que, as reprovações nestes testes podem caracterizar dois tipos de conseqüências indesejáveis: a sub-utilização da banca onde são realizados e a própria reprovação, que leva ao retrabalho ou sucata. Ou seja, em relação à sub-utilização da banca, é importante que todas as posições estejam ocupadas e que o teste seja realizado apenas uma vez em cada uma delas para que se tenha maior produção. Já a reprovação, depende do desempenho do medidor e das características relacionadas aos seus componentes as quais serão posteriormente descritas e analisadas.



**Figura 3.2 – Medidor monofásico modelo ME21.**

As bancas de VP (Figura 3.3), como são comumente chamadas, contém vinte borneiras (ou posições) e cada uma delas tem capacidade para testar um medidor de cada vez. Além disso, tem-se um painel de controle onde são feitos os ajustes das cargas aplicadas no medidor e onde pode-se observar o *status* dos testes durante a sua realização, da seguinte forma: para cada uma das borneiras existem três lâmpadas coloridas que sinalizam a aprovação ou reprovação do medidor, sendo que a lâmpada vermelha continuamente acesa

indica que o medidor posicionado está realizando o teste de corrente de partida, a lâmpada amarela acesa indica a realização do teste de marcha à vazio e a verde indica que o medidor foi aprovado. Se, durante a execução do teste, a lâmpada vermelha ou a amarela piscar, o medidor é reprovado.

Além deste sinalizador, quando os medidores estão alocados nas borneiras, um painel programável é capaz de informar quanto tempo uma determinada borneira precisou para aprovar em partida e/ou em vazio e o tempo que a mesma ficou sem realizar testes. Pode-se também gerar relatórios estratificados por turno, com dados sobre o total de unidades produzidas e o número de aprovações e reprovações ocorridas segundo o tipo de teste.

Esta banca é controlada por apenas um operador, que acompanha a execução dos testes através do painel, retira os medidores aprovados, posiciona outra unidade na borneira e assim sucessivamente.



*Figura 3.3 – Banca VP, suas 20 borneiras (posições) e o painel de controle.*

### 3.3 ENSAIOS DE CORRENTE DE PARTIDA E MARCHA À VAZIO

Todos os medidores produzidos são submetidos a estes testes, realizados em bancas compostas por vinte borneiras independentes. Os resultados são do tipo *go/no go*, onde o medidor será aprovado se passar em ambos os testes, partida e vazio. Isso significa que, se for reprovado em partida, automaticamente não realiza o teste de vazio.

Tecnicamente, temos a seguinte caracterização dos testes, segundo a NBR 5313 da ABNT (1997):

- **Corrente de partida:** tem como finalidade verificar se o medidor está ajustado e se existem atritos anormais sobre o elemento móvel (disco) que prejudiquem o desempenho do medidor. Consiste em aplicar um percentual da corrente nominal do medidor, com tensão e frequência nominais. *Critério de aprovação:* será considerado aprovado o medidor no qual o sensor contar 180 marcas num tempo máximo de 20 minutos. Será reprovado quando não ocorrer incremento no número de marcas em um tempo igual ou inferior a 45 segundos ou se ao término de 20 minutos não ocorrer a contagem de 180 marcas.
- **Marcha à vazio:** tem como objetivo verificar se o medidor está adequadamente calibrado e se não existem dissimetrias eletromagnéticas. Este teste consiste em aplicar um percentual da tensão nominal, com frequência nominal e sem corrente. *Critério de aprovação:* o medidor que, ao término de 15 minutos, contar um número de marcas inferior a 150 será considerado aprovado, caso contrário, será reprovado.

Para a avaliação do desempenho dos medidores nos testes de corrente de partida e marcha à vazio, a metodologia utilizada foi dividida em três etapas: análise do sistema de medição, projeto experimental e otimização, apresentadas a seguir.

### ***3.4 ANÁLISE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO E PROJETO EXPERIMENTAL***

#### ***3.4.1 Análise do Sistema de Medição***

Para realizar a avaliação do desempenho dos medidores monofásicos e atender o objetivo principal desta monografia, foi necessário analisar a qualidade dos dados gerados pelo sistema de medição - banca VP - que seria utilizado neste estudo.

A banca VP foi avaliada em relação a dois importantes aspectos assim caracterizados: uma vez aprovado (ou reprovado) o medidor em uma das posições, o mesmo deve ser também aprovado (ou reprovado) em qualquer uma das demais, assim como, se repetido o teste na mesma posição, os resultados obtidos devem ser os mesmos. De outra forma, espera-se que a proporção de reprovações seja distribuída de forma aproximadamente uniforme entre as borneiras.

Como descrito anteriormente, os resultados são do tipo aprovado/reprovado e, sendo assim, para avaliar o sistema de medição, foi realizado um estudo de R&R – Repetibilidade e Reprodutibilidade por atributos, para o qual os dados foram obtidos da seguinte forma: foram selecionados aleatoriamente dez medidores da produção de um dia qualquer (modelo: M8C - 15A - 120V) e cada um deles foi testado duas vezes em cada uma das vinte posições da banca analisada (célula 3), obtendo-se assim, 40 leituras para cada medidor e 20 para cada posição.

Segundo o método apresentado por Ribeiro e Caten (1998) para o estudo de Repetitividade e Reprodutibilidade por atributos, deve-se analisar apenas as observações classificadas em ao menos uma oportunidade como defeituosas (às quais atribui-se o código 1, enquanto que para as demais, 0), independente do tamanho da amostra. Em seguida, conta-se o número de discrepâncias encontradas entre os resultados dos testes realizados mantendo-se o mesmo medidor na mesma posição; desta forma, obtém-se a estimativa para o percentual de erros de repetitividade. As discrepâncias de reprodutibilidade são avaliadas através da amplitude entre as contagens de reprovações em cada borneira, para cada medidor. As tabelas com os resultados dos testes encontram-se no ANEXO I.

Em virtude do teste de marcha à vazio (V) não ser realizado quando o medidor é reprovado no teste de corrente de partida (P), consideramos como duas oportunidades de falha a seqüência dos testes (VP), ou seja, a reprovação em partida implica na reprovação em vazio (logo, atribui-se o código 1 aos dois testes). Segundo o conhecimento técnico dos engenheiros envolvidos no processo e a prática do operador, a combinação aprovado em partida/reprovado

em vazio é um evento muito raro (com probabilidade de ocorrência inferior a 1%) e o percentual efetivo de reprovações de medidores no teste de corrente de partida é da margem de 2%.

Nesta etapa do estudo, tinha-se interesse apenas nos resultados caracterizados em aprovação ou reprovação para avaliar o sistema de medição, conforme o procedimento normal de operação, por isso utilizou-se a avaliação por atributos.

Nesta análise, foram encontradas sete discrepâncias de repetitividade, quando o máximo seria 200, visto que tínhamos 20 posições e 10 medidores. Assim, o percentual de discrepâncias de repetitividade é estimado como:

$$\text{Repetitividade \%} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de discrepâncias de repetitividade}}{\text{n}^\circ \text{ máximo de discrepâncias possível}}$$

$$\text{Repetitividade \%} = 7 / 200 = 3,5\%$$

Foram encontradas também, onze discrepâncias de reprodutibilidade, para a qual o máximo seria 20 ( 10 medidores vezes a amplitude máxima das discrepâncias, neste caso, 2).

$$\text{Reprodutibilidade \%} = \frac{\text{n}^\circ \text{ de discrepâncias de reprodutibilidade}}{\text{n}^\circ \text{ máximo de discrepâncias possível}}$$

$$\text{Reprodutibilidade \%} = 11 / 20 = 55,0\%$$

De forma geral, se os erros de repetitividade ou de reprodutibilidade não ultrapassarem 20%, o sistema é aceito, ou seja, admitiríamos que o critério de aprovação utilizado pelas posições é o mesmo para todos os medidores. O percentual de erros de reprodutibilidade encontrado neste estudo indica que o sistema precisa ser melhorado neste aspecto para que as posições não apresentem tendência a reprovar com maior ou menor frequência os medidores.

A realização desta análise possibilitou a identificação das borneiras nas quais deveríamos tomar uma ação corretiva, ou seja, fazer manutenção (13 e 20), além de confirmar a suposição de membros da equipe de que algumas das borneiras tinham uma certa tendência a reprovar com maior frequência os medidores, levantada a partir da observação da rotina da produção.

### ***3.4.2 Projeto Experimental***

O projeto experimental foi executado com o objetivo de identificar os fatores que exercem efeito significativo sobre o desempenho dos medidores. Seu desenvolvimento foi composto por cinco etapas, adaptadas de Montgomery (1991).

#### ***Etapa 1 - Identificação do Problema***

A partir de reuniões com a equipe técnica, constatou-se a importância de avaliar o desempenho dos medidores monofásicos nos testes de corrente de partida e marcha em vazio, visto que tem-se interesse em aumentar a qualidade das unidades produzidas através da fabricação de medidores que aprovem em menos tempo. Apesar da banca VP não ser um gargalo, ela poderia ser melhor utilizada se o tempo necessário para a realização dos testes fosse reduzido e se cada medidor fosse testado apenas uma vez, pois é prática comum entre os operadores repetir o teste mais de uma vez, caso ocorra reprovação .

Dessa forma, a próxima etapa foi identificar a variável resposta adequada às expectativas do experimento.

#### ***Etapa 2 - Escolha da variável resposta***

Na banca VP, o resultado dos testes de corrente de partida e marcha em vazio fornece uma resposta do tipo aprovado/reprovado no painel de luzes; este é o resultado utilizado normalmente no processo produtivo.

No início do planejamento deste experimento, pretendia-se utilizar esta informação como variável resposta do tipo dicotômica (0 ou 1).

Porém, analisando-se o potencial de informações contido no painel VP, descobriu-se a possibilidade de quantificação do tempo de realização dos testes, individualmente, para cada uma das borneiras. Definiu-se então o tempo de realização dos testes de corrente de partida e marcha à vazio, em minutos, como variáveis resposta do estudo realizado, visto que a análise adquire maior precisão à medida que tem-se como mensurar o desempenho dos medidores não apenas através do número de reprovações (qualitativamente), mas também pelo tempo de

realização dos testes, critério este que define a aprovação do medidor. O número de marcas contadas não foi considerada relevante pela equipe que optou pelo controle do tempo.

A descrição das variáveis resposta é apresentada na **Tabela 3.1**.

**Tabela 3.1** – *Descrição das variáveis resposta (características de qualidade).*

Variável resposta	Valor Alvo	Unidade de medida
Tempo teste de partida	*	minutos
Tempo teste vazio	15 (segundo NBR 5313)	minutos

\* A Norma não estabelece um valor alvo para este teste; utiliza-se normalmente 20 minutos.

### *Etapa 3 - Seleção dos fatores e seus níveis*

Através da análise dos componentes do medidor monofásico que poderiam interferir no desempenho do medidor nos testes de corrente de partida e marcha em vazio, a equipe concluiu que seria interessante investigar a influência de diferentes diâmetros do furo feito nos discos e a tensão para a qual os medidores são projetados.

O modelo selecionado para o estudo foi o medidor monofásico ME21 de 60Hz, que é o mais produzido nesta versão. Normalmente, o diâmetro do furo deste produto é igual a 1,5mm sendo que, deste mesmo modelo, também já foram experimentalmente produzidas unidades sem furo. Porém, nenhum controle que demonstre alguma diferença no índice de reprovações entre eles foi até então realizado.

Depois dessa experiência, várias pessoas envolvidas no processo de produção destes medidores lançaram a seguinte questão: “O que aconteceria se produzíssemos todas as unidades sem furo, já que operacionalmente seria mais fácil?”. Em outros modelos de medidores, são utilizados também furos de 1mm de diâmetro, mas estes apresentam dificuldades de manufatura no sentido de que ocorre seguidamente a quebra da peça que perfura o disco, em virtude de uma relação existente entre a espessura do disco e o diâmetro possível do furo, que diz que este não pode ser menor que a espessura. É devido a isso que tem-se em diferentes modelos, furos distintos para diferentes espessuras do disco, de acordo com o projeto .

Quanto à tensão, quase todas as unidades produzidas são nas versões de 120 ou 240 Volts, exceto em alguns dos casos para exportação. Desta forma, decidiu-se quais os fatores que deveriam compor o experimento:  $X_1$  = diâmetro do furo e  $X_2$  = tensão.

Na etapa de otimização do desempenho do produto, não é de interesse desse estudo obter-se um nível intermediário de tensão, pois os níveis 120V e 240V serão considerados fixos. Os níveis reais dos fatores e o número de repetições para cada tratamento (combinação de níveis dos fatores), podem ser observados na **Tabela 3.2**.

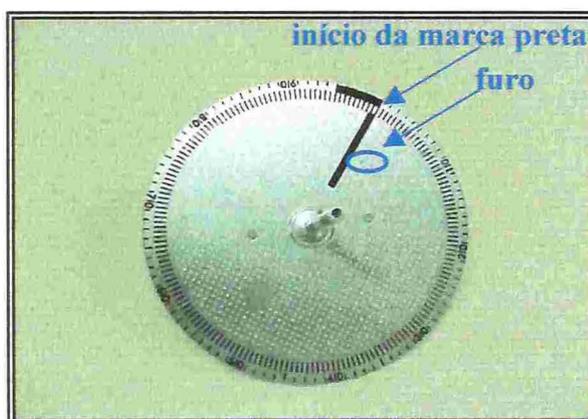
**Tabela 3.2** – Arranjo do fatorial com dois fatores e cinco repetições.

Tensão (V)	Diâmetro do furo (mm)		
	0 (sem furo)	1,0	1,5
120	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$
240	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$	$X_1, X_2, X_3, X_4, X_5$

Considerou-se como fator mantido constante o ponto no qual o sensor é posicionado ao dar-se início aos testes. Todos os medidores testados tiveram seus discos posicionados no início da marca preta impressa neles.

Além disso, o percentual da corrente nominal e da tensão de calibração também foram mantidos constantes.

A presença de limalhas sobre o disco (ver **Figura 3.4**) ou qualquer outra sujeira imperceptível, foi considerada fator ruído, por ser um fator não controlável apesar da sua presença poder interferir no desempenho do medidor.



**Figura 3.4** – Disco: componente do conjunto rotor.

O número de repetições foi definido de acordo com as restrições técnicas encontradas no que se refere à utilização da banca para testes e ao número de medidores disponíveis.

Os testes não poderiam ser realizados durante o turno normal de trabalho para que a produção não fosse comprometida. Além disso, dispunha-se de apenas quinze medidores ME21-60Hz-120V na data programada para a execução do experimento. Sendo assim, foram utilizados outros quinze medidores de 240V com o objetivo de construir um experimento fatorial balanceado.

#### ***Etapa 4 - Escolha do Projeto Experimental***

Conforme descrito anteriormente, o experimento é composto por dois fatores, um com três níveis e o outro com dois, caracterizando assim um fatorial completo 3X2 (seis tratamentos). Neste caso, as unidades experimentais são os medidores e estes foram instalados de forma completamente casualizada nas borneiras nas quais os testes foram realizados.

O objetivo do projeto experimental é identificar a presença do efeito da tensão, do diâmetro do furo e da interação entre estes dois fatores no desempenho dos medidores, avaliado pelo tempo de realização dos testes de corrente de partida e marcha à vazio. Na prática, provavelmente não deixará de existir demanda para medidores de ambas as tensões, 120V e 240V, mas deseja-se através deste experimento verificar qual o diâmetro do furo mais adequado para cada uma das tensões, ou seja, aquele que aprovará em menos tempo.

#### ***Etapa 5 - Execução do Experimento***

Inicialmente, quinze medidores ME21-60Hz-120V foram instalados aleatoriamente nas posições, sendo que sete deles ficaram à esquerda do painel e oito à direita (a banca contém dez borneiras de cada lado). As borneiras de números 13 e 20 não foram utilizadas neste experimento por apresentarem problemas de reprodutibilidade apontados pelo estudo de R&R.

Os ajustes realizados às cargas aplicadas no medidor para a realização dos testes, seguem a norma NBR 5313 (1997) da ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Utilizou-se 0,7% da corrente nominal e 110% de tensão de calibração (vazio), de forma que os três visores ajustáveis do painel VP apresentavam os seguintes valores:

PARTIDA: 120V	VAZIO:132V	105 milliamperes
---------------	------------	------------------

Nota: Para o teste de partida: 120V (tensão) - 105 milliamperes (corrente) e para o teste em vazio: 132V (tensão) - 0 milliamperes (sem corrente).

PARTIDA: 240V	VAZIO:264V	75 milliamperes
---------------	------------	-----------------

Nota: Para o teste de partida: 240V (tensão)-75 milliamperes (corrente) e para o teste em vazio: 264V (tensão)-0 milliamperes (sem corrente).

A banca não pode realizar testes em medidores de diferentes tensões ao mesmo tempo, portanto, foram testadas quinze unidades de 120V e depois quinze de 240V. Considerando que a banca é desligada antes de serem feitos os novos ajustes, acredita-se que esta ordem não tem efeito nos resultados.

À medida que os medidores encerravam o teste de partida, era feita a programação que indica o tempo de duração do teste, obtido através de uma combinação do tipo *bbpp*, onde *bb* representa o número da borneira a qual deseja-se verificar o tempo, e *pp* representa o código do teste (03 = partida e 04 = vazio). Por exemplo, a seqüência de comandos para a leitura do tempo de duração do teste de corrente de partida para a borneira número 1 é, então: F1 – 0103, e para o teste de marcha em vazio: F1 – 0104. F1 apenas indica ao painel que alguma informação será solicitada.

O valor indicado no visor foi registrado em uma planilha na qual constavam as seguintes informações: número da posição (de 1 a 19, exceto a 13), tensão (120V e 240V), diâmetro do furo (0mm, 1mm e 1,5mm), tempo no teste de corrente de partida (em minutos) e tempo no teste de marcha em vazio (em minutos) ( ver **Tabela 3.4**).

As variáveis independentes (fatores) foram codificadas, utilizando-se a seguinte relação:

$$X = \frac{x_i - c_i}{a_i}$$

onde:  $x_i$  é o valor referente ao nível do fator;

$c_i$  é o nível mais utilizado do fator ou o valor central entre os níveis;

$a_i$  é a semi-amplitude do intervalo de variação dos fatores.

Por exemplo, o código do nível um do fator tensão (120V) é  $-1$ , pois:

$$X = \frac{120 - 180}{120/2} = -1$$

Os níveis reais e codificados dos fatores são apresentados na Tabela 3.3:

**Tabela 3.3** – *Níveis reais e codificados dos fatores controláveis.*

FATOR	NÍVEIS REAIS	NÍVEIS CODIFICADOS
X <sub>1</sub> : diâmetro do furo	0 1,0 1,5	-1 0 +1
X <sub>2</sub> : tensão	120 240	-1 +1

A matriz experimental pode ser representada pela **Tabela 3.4**. Observa-se que no teste de corrente de partida todos os medidores foram aprovados enquanto que, em vazio, um deles foi reprovado. Sendo assim, para esta variável resposta tem-se apenas quatro repetições no tratamento (0, -1), ou seja, diâmetro do furo igual a 1,0mm e tensão 120V.

É importante salientar que, devido ao fato da variável tempo ter como unidade de medida minutos, ocorreram situações nas quais o teste de marcha em vazio assume tempo igual a zero, quando levou menos de um minuto para completar o teste, pois o painel não oferece a possibilidade de quantificar o tempo em segundos.

**Tabela 3.4** – Matriz experimental do fatorial 3X2.

Rodada	Nº borneira	Diâmetro furo	Tensão	Valores codificados		Partida	Vazio
				X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>		
1	1	1,5	120	1	-1	9	5
2	3	1,5	120	1	-1	8	2
3	4	1	120	0	-1	7	0
4	5	1,5	120	1	-1	8	4
5	7	0	120	-1	-1	12	14
6	8	1,5	120	1	-1	8	0
7	9	0	120	-1	-1	9	11
8	10	1	120	0	-1	7	-
9	11	0	120	-1	-1	10	4
10	14	1	120	0	-1	8	1
11	15	1	120	0	-1	8	8
12	16	0	120	-1	-1	7	12
13	17	0	120	-1	-1	10	1
14	18	1	120	0	-1	9	1
15	19	1,5	120	1	-1	11	1
16	1	1,5	240	1	1	13	1
17	3	1	240	0	1	11	1
18	4	1,5	240	1	1	16	3
19	5	0	240	-1	1	13	5
20	7	1,5	240	1	1	10	2
21	8	0	240	-1	1	13	7
22	9	0	240	-1	1	10	2
23	10	1,5	240	1	1	10	1
24	11	1	240	0	1	10	20
25	14	1,5	240	1	1	10	2
26	15	1	240	0	1	9	1
27	16	1	240	0	1	10	2
28	17	1	240	0	1	10	2
29	18	0	240	-1	1	9	18
30	19	0	240	-1	1	10	20

### **Etapa 6 - Análise de dados**

A análise de dados foi dividida em três partes: (i) análise descritiva, (ii) análise do experimento fatorial e (iii) otimização dos parâmetros do processo.

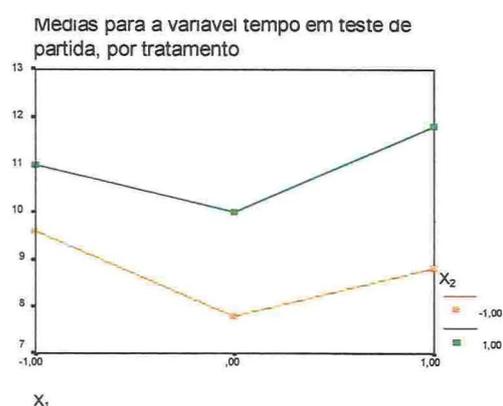
Inicialmente realizou-se uma análise descritiva dos resultados a fim de gerar informações que auxiliem no desenvolvimento das análises posteriores.

O tratamento estatístico foi realizado utilizando-se os *softwares* SAS e SPSS, este último preferencialmente para os gráficos apresentados a seguir. Apesar de ambos fornecerem

os mesmos resultados, o SAS apresenta a vantagem de execução de todas as análises desejadas através de um único programa, enquanto que o SPSS requer maior número de operações.

As análises serão apresentadas utilizando-se a codificação dos fatores apresentada na **Tabela 3.3**.

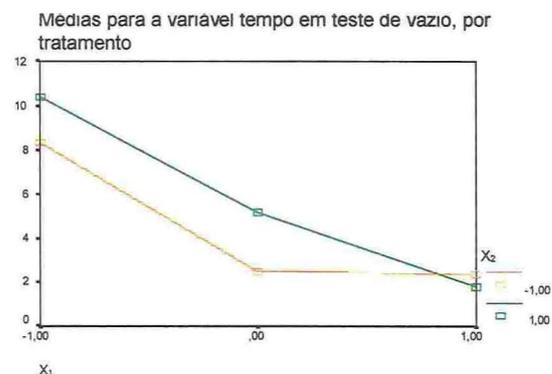
X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>	
		-1	1
-1	Nº de repetições	5	5
	Média	9,6	11
	Desvio padrão	1,817	1,871
0	Nº de repetições	5	5
	Média	7,8	10
	Desvio padrão	0,837	0,707
1	Nº de repetições	5	5
	Média	8,8	11,8
	Desvio padrão	1,304	2,683



**Figura 3.5** – Estatísticas descritivas da variável resposta tempo em teste de corrente de partida, por tratamento.

Na **Figura 3.5**, observa-se que independente do diâmetro do furo do disco, os medidores de 120V de tensão testados demoraram menos tempo, em média, para aprovar no teste de corrente de partida do que os de 240V. Para ambas as tensões, o menor tempo ocorreu em discos com furo de 1mm (nível codificado: 0).

X <sub>1</sub>		X <sub>2</sub>	
		-1	1
-1	Nº de repetições	5	5
	Média	8,4	10,4
	Desvio padrão	5,595	8,081
0	Nº de repetições	4	5
	Média	2,5	5,2
	Desvio padrão	3,697	8,289
1	Nº de repetições	5	5
	Média	2,4	1,8
	Desvio padrão	2,074	0,837



**Figura 3.6** – Estatísticas descritivas da variável resposta tempo em teste de marcha em vazio, por tratamento.

No teste de marcha em vazio, os medidores de 120V foram aprovados em um tempo menor que os de 240V quando nas condições de diâmetro do furo zero e de 1mm de diâmetro. Já, quando o furo do disco era de 1,5mm, os medidores com 240V de tensão tiveram um desempenho médio discretamente melhor, porém o desvio padrão das medidas de tempo é extremamente menor neste tratamento (+1, +1) em relação aos demais, o que favorece o desempenho. Independente da tensão, os medidores que possuíam discos com furo de 1,5mm de diâmetro tiveram melhor desempenho e os sem furo, o pior.

As análises prévias apresentaram muitas informações, porém, para verificar-se o efeito significativo dos fatores sobre as variáveis resposta, foi utilizada a ANOVA - Análise de Variância com duas variáveis independentes (fatores), através do procedimento GLM - *General Linear Models* (do SAS) que é indicado no caso em que se possui um delineamento fatorial com dois fatores.

Se o efeito do diâmetro do furo for significativo, tem-se interesse em identificar o melhor diâmetro a ser utilizado. Para tanto, poderão ser utilizados procedimentos de análise de regressão.

O modelo construído é da forma vista em (3):

$$y_{ijk} = \mu + \alpha_i + \beta_j + \alpha\beta_{ij} + \varepsilon_{ijk}, \text{ onde:}$$

$\mu$  é a média geral;

$\alpha_i$  é o efeito do  $i$ -ésimo nível do fator tensão;

$\beta_j$  é o efeito do  $j$ -ésimo nível do fator diâmetro do furo;

$\alpha\beta_{ij}$ , é o efeito da interação entre o  $i$ -ésimo nível de tensão e o  $j$ -ésimo nível do fator diâmetro;

$\varepsilon_{ij}$  é o erro aleatório associado à observação  $y_{ijk}$

Os resultados do experimento (obtidos no SAS) aparecem a seguir, juntamente com o estudo da adequabilidade do modelo de análise de variância especificado. O programa escrito para gerar cada uma das saídas encontra-se no Anexo II, que apresenta também a matriz de dados.

### 1) Análise de Variância para a variável resposta tempo no teste de corrente de partida (TEMPP)

**Tabela 3.5** – Análise de Variância para a variável tempo em teste de corrente de partida.

Causas de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	F prob.
X <sub>1</sub> : diâmetro	2	13.06	6.53	2.32	0.1200
X <sub>2</sub> : tensão	1	36.30	36.30	12.89	0.0015*
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	2	3.20	1.60	0.57	0.5741
Erro	24	67.60	2.82	-	-
Total	29	120.16			

A tabela de análise de variância (Tabela 3.5) indica a existência de efeito da tensão, independente do diâmetro do furo, sobre o tempo que os medidores levaram para ser aprovados no teste de corrente de partida ( $p=0,0015$ ).

**Tabela 3.6** – Média e desvio-padrão do fator tensão.

TENSÃO	Desvio Padrão	Média
T = -1 (120V)	1.4864467	8.7333333
T = 1 (240V)	1.9444671	10.9333333

Pode-se observar através da **Tabela 3.6** que as unidades que operam com 120V de tensão produziram melhores resultados pois levaram, em média, menos tempo que aquelas com tensão de 240V. Além disso, uma vez não identificada a influência do diâmetro do furo no desempenho do medidor no teste de corrente de partida, as evidências amostrais indicam que poder-se-ia utilizar tanto discos sem furo, quanto com furos de 1mm ou 1,5mm.

Porém, esta análise está condicionada à adequabilidade do modelo, analisada através dos seguintes itens, comentados na seqüência: análise pontual dos resíduos brutos, *boxplot*, gráfico de probabilidade normal, estatística W de Shapiro Wilks para testar normalidade,

análise gráfica dos resíduos *versus* valores estimados e análise gráfica dos resíduos *versus* tratamentos.

**Tabela 3.7** – *Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de partida.*

OBS	TEMPP	ESTY	RESY
1	9	8.8	0.2
2	8	8.8	-0.8
3	7	7.8	-0.8
4	8	8.8	-0.8
5	12	9.6	2.4
6	8	8.8	-0.8
7	9	9.6	-0.6
8	7	7.8	-0.8
9	10	9.6	0.4
10	8	7.8	0.2
11	8	7.8	0.2
12	7	9.6	-2.6
13	10	9.6	0.4
14	9	7.8	1.2
15	11	8.8	2.2
16	13	11.8	1.2
17	11	10.0	1.0
18	16	11.8	<b>4.2</b>
19	13	11.0	2.0
20	10	11.8	-1.8
21	13	11.0	2.0
22	10	11.0	-1.0
23	10	11.8	-1.8
24	10	10.0	0.0
25	10	11.8	-1.8
26	9	10.0	-1.0
27	10	10.0	0.0
28	10	10.0	0.0
29	9	11.0	-2.0
30	10	11.0	-1.0

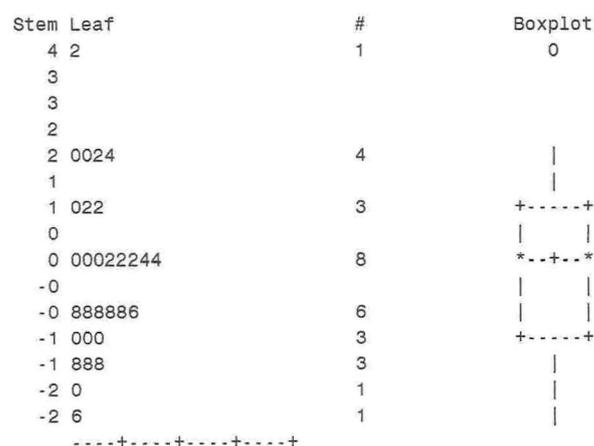
Através da análise dos resíduos brutos apresentada na **Tabela 3.7**, pode-se notar que a rodada número 18, apresentou um valor relativamente alto para o resíduo, quando comparado com os demais. Para classificar-se corretamente uma observação como *outlier* é usual obter-se o resíduo padronizado:

$$e_{ijk} = \text{resíduo bruto} / (\text{QME})^{0.5} = 4,2 / 2,82^{0.5} = 2,50$$

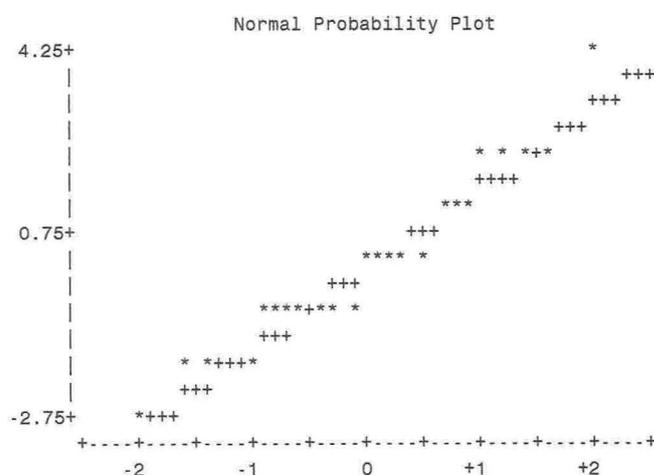
e comparar-se com  $Z_{0,01} = 2,58$ , segundo recomendado pela literatura (Riboldi,1994a). Neste caso, pode-se assumi-lo como uma observação não destoante, pois  $2,50 < 2,58$ .

O teste de normalidade dos resíduos, foi realizado utilizando-se a estatística  $W$  de *Shapiro Wilks*, a qual apresentou  $\text{Pr} < W = 0,2363$ . Em testes de aderência, em geral, deseja-se que  $\text{Pr} < W$  seja próxima de um, ou no mínimo maior que 0,05 se for utilizado um nível de 5% de significância, para que se aceite a hipótese de que os resíduos são normalmente distribuídos. Logo, neste caso, a hipótese pode ser aceita.

A normalidade dos resíduos pode também ser analisada através do gráfico de probabilidade normal (**Figura 3.8**), cuja interpretação é a seguinte: quanto mais próximo de uma reta ( $x = y$ ) os pontos estiverem distribuídos, melhor é o ajuste à distribuição normal.



**Figura 3.7 – Boxplot dos resíduos.**



**Figura 3.8 –Gráfico de probabilidade normal.**

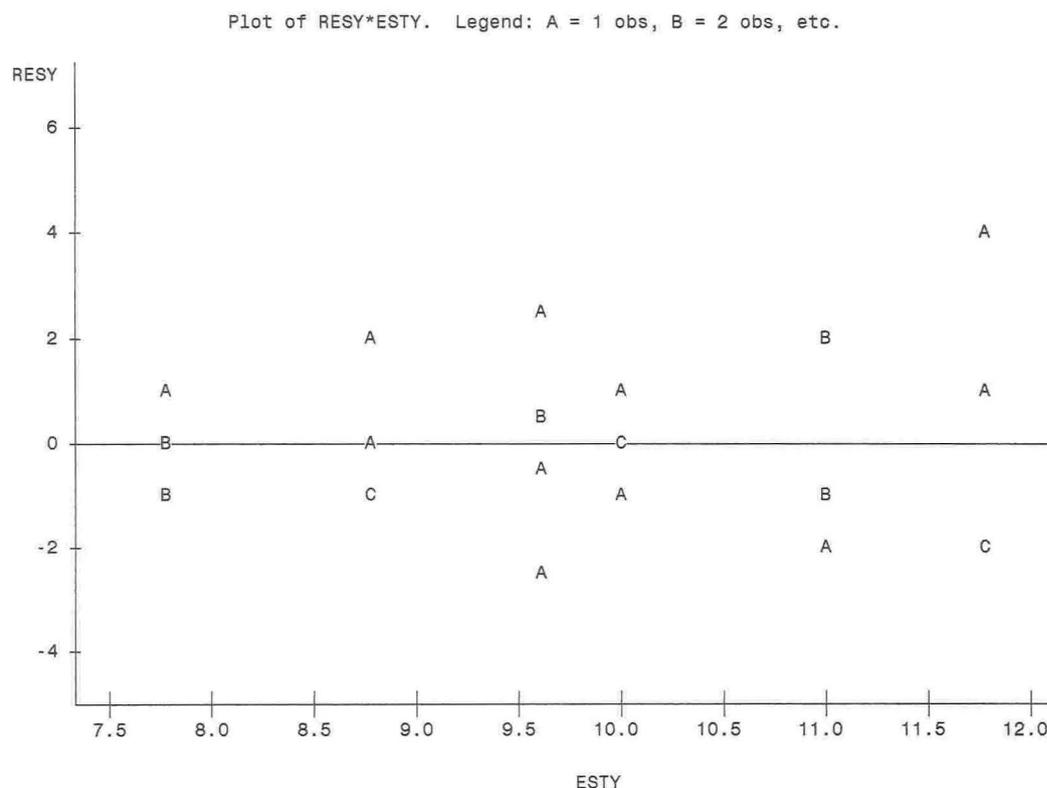
As **Figura 3.7 e 3.8** alertam para a existência de um valor suspeito, indicado pelo '0' no *boxplot*, que é a observação número 18, a qual já foi analisada a partir da **Tabela 3.7**.

A seguir, são apresentados os gráficos dos resíduos *versus* os valores estimados do tempo de execução do teste de corrente de partida, os níveis de tensão e de diâmetro do furo.

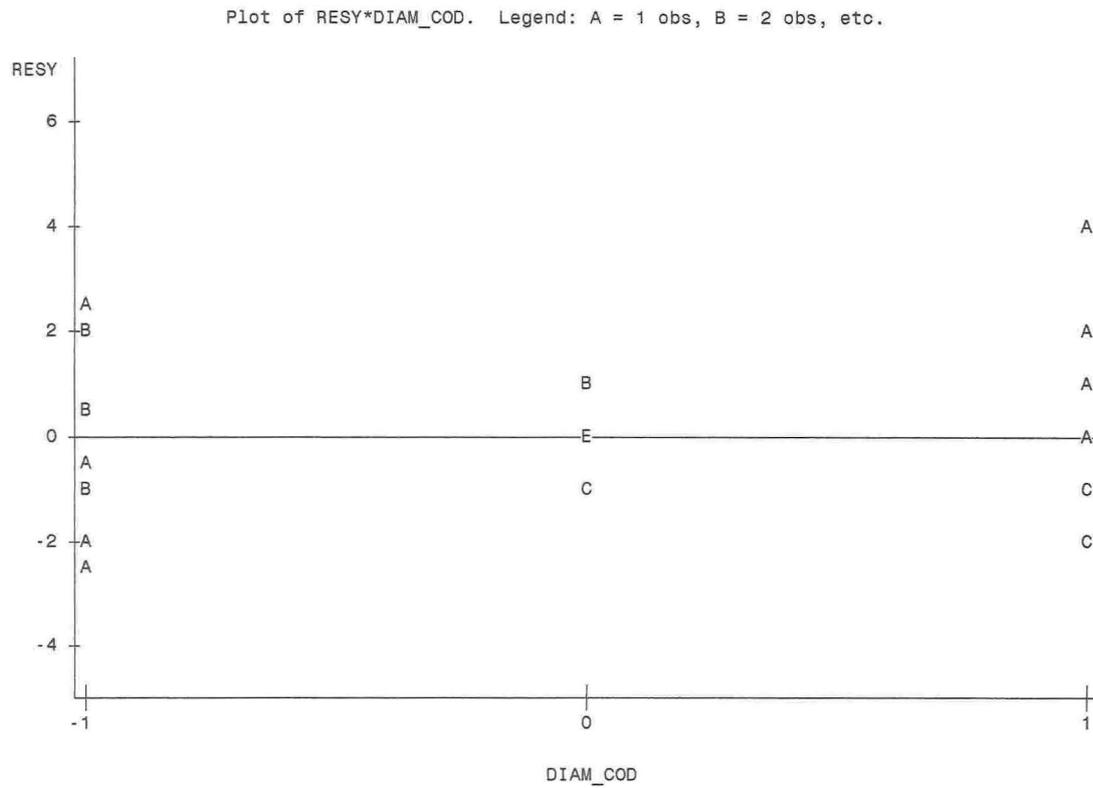
A **Figura 3.9** ilustra a distribuição dos resíduos em função dos valores estimados, a qual é utilizada para verificar a homogeneidade das variâncias, que é suposição para a aplicação da Análise de Variância.

A hipótese de que há homogeneidade de variâncias é aceita se os resíduos estiverem aleatoriamente distribuídos em torno de zero, sem apresentar nenhum padrão (como forma de funil, ou ciclos, por exemplo). Neste caso, a hipótese foi aceita.

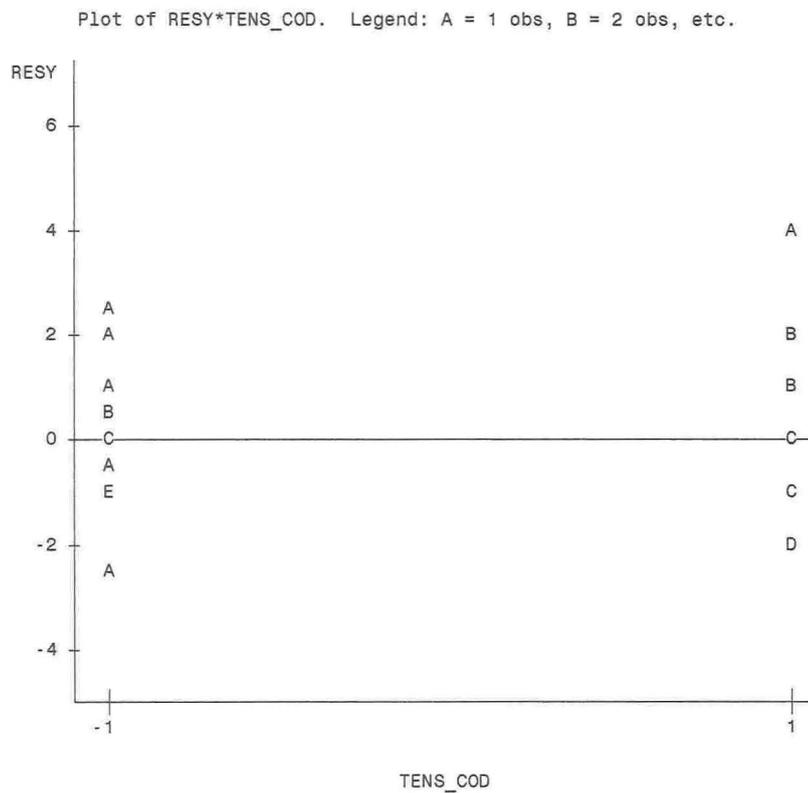
Nas **Figuras 3.10 e 3.11** é desejável que a variabilidade dos resíduos nos níveis de cada um dos fatores seja semelhante.



**Figura 3.9** – Análise de resíduos x valores estimados da variável tempo em teste de partida.



**Figura 3.10 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de partida  $x X_1$ .**



**Figura 3.11 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de partida  $x X_2$ .**

Após a realização das análises das figuras anteriores, observa-se que a maior parte das suposições descritas para assumir-se a adequabilidade do modelo foram satisfeitas, salientando-se apenas que a variabilidade dos resíduos nos diferentes níveis do fator diâmetro do furo não são muito semelhantes. Sendo assim, o modelo especificado foi considerado adequado, ou seja, apresentou um bom ajuste aos dados.

No Anexo III, encontram-se as análises para a variável resposta *tempo em teste de partida*, quando se rejeita a hipótese de homogeneidade de variâncias e se utiliza uma transformação de dados. Os resultados obtidos para a variável transformada também indicaram a influência de  $X_2$  : tensão, o que indica que a variabilidade observada dentro dos níveis do fator diâmetro do furo não comprometeu os resultados. Sendo assim, optou-se por analisar a variável original.

## 2) Análise de Variância para a variável resposta tempo no teste de marcha em vazio (TEMPV)

Conforme comentado anteriormente, tem-se uma informação perdida para a variável tempo no teste de marcha à vazio no tratamento (0,-1), tornando o experimento desbalanceado.

**Tabela 3.8** – Análise de Variância para a variável tempo em teste de marcha em vazio.

Causas de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados <sup>1</sup>	Quadrado médio	F	F prob.
$X_1$ : diâmetro	2	288.66	144.33	4.60	0.0209*
$X_2$ : tensão	1	13.45	13.45	0.43	0.5193
$X_1 * X_2$	2	14.60	7.30	0.23	0.7944
Erro	23	718.05		-	-
Total	28 <sup>2</sup>	1034.76			

**Tabela 3.9** – *Teste de comparações múltiplas.*

$X_1$	Média
-1	9.40 a
0	3.85 b
+1	2.10 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de comparações múltiplas da mínima diferença significativa, ao n.s. 5%.

Observa-se na **Tabela 3.8**, que o efeito do diâmetro do furo é significativo, independentemente da tensão dos medidores testados (pois a interação não foi significativa), sendo que o menor tempo de teste foi obtido pelas unidades com discos cujos furos tem 1,5mm de diâmetro. O teste foi mais demorado nos medidores sem furo, e não houve diferença significativa entre os níveis 0 e 1 do fator, como mostra o teste de comparações múltiplas da mínima diferença significativa (*lsmeans*) na **Tabela 3.9**. Ou seja, neste caso não houve diferença entre os medidores com disco de furo de 1,0 e 1,5mm, em relação ao desempenho no teste de marcha em vazio. Sob o ponto de vista prático, isto facilita o trabalho de perfuração do disco, uma vez que estes indícios sugerem que não há necessidade de utilizar-se furos de 1mm em detrimento aos de 1,5mm em medidores ME21-15A-60Hz, sejam eles de 120V ou 240V.

Porém, estas conclusões só serão válidas depois de verificada a adequabilidade do modelo para esta variável resposta, a qual é apresentada a partir da **Tabela 3.10**.

**Tabela 3.10** – *Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de vazio.*

OBS	TEMPV	ESTY	RESY
1	5	2.4	2.6
2	2	2.4	-0.4
3	0	2.5	-2.5
4	4	2.4	1.6
5	14	8.4	5.6
6	0	2.4	-2.4
7	11	8.4	2.6
8	.	2.5	.
9	4	8.4	-4.4
10	1	2.5	-1.5
11	8	2.5	5.5
12	12	8.4	3.6
13	1	8.4	-7.4
14	1	2.5	-1.5
15	1	2.4	-1.4
16	1	1.8	-0.8

OBS	TEMPV	ESTY	RESY
17	1	5.2	-4.2
18	3	1.8	1.2
19	5	10.4	-5.4
20	2	1.8	0.2
21	7	10.4	-3.4
22	2	10.4	-8.4
23	1	1.8	-0.8
24	20	5.2	<b>14.8</b>
25	2	1.8	0.2
26	1	5.2	-4.2
27	2	5.2	-3.2
28	2	5.2	-3.2
29	18	10.4	7.6
30	20	10.4	9.6

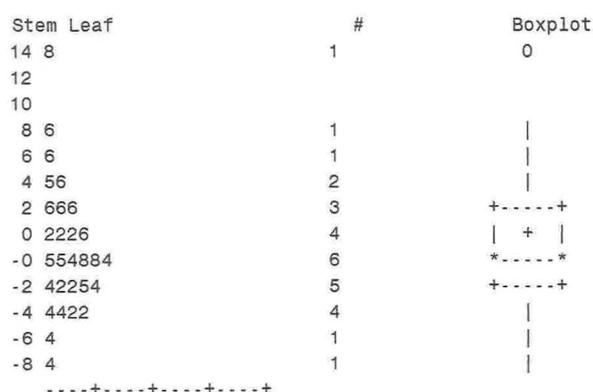
O resíduo padronizado referente à observação número 24:

$$e_{ijk} = \text{resíduo bruto} / (\text{QME})^{0.5} = 14,8 / 31,4^{0.5} = 2,64$$

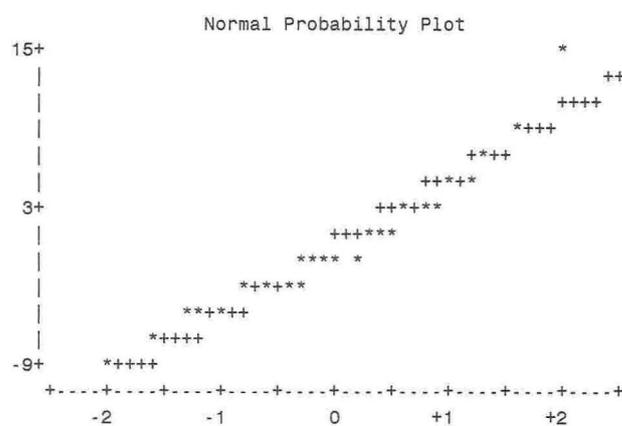
é significativo ao nível de 1%, pois  $2,64 > 2,58$  indicando a presença de um *outlier*, uma vez que se tem segurança da exatidão do registro (medição).

A estatística  $W$  de *Shapiro Wilks*, apresentou  $\text{Pr} < W = 0,1263$ , indicando que a hipótese de que os resíduos são normalmente distribuídos pode ser aceita.

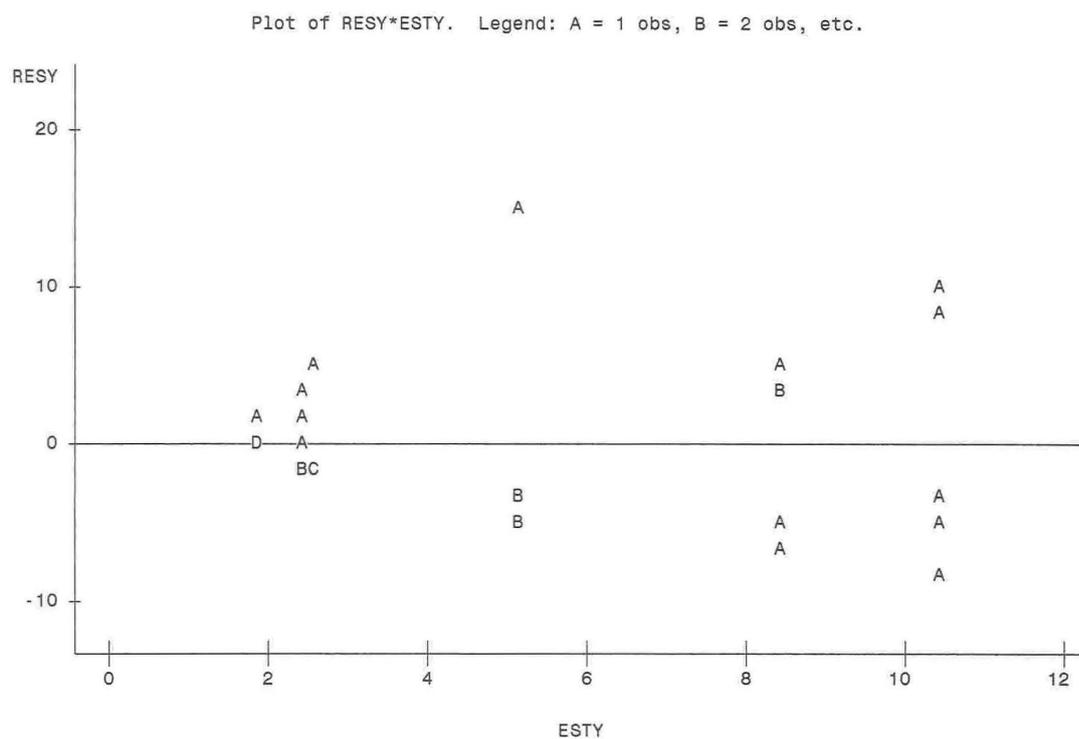
O *boxplot* e o gráfico de probabilidade normal, apresentados nas **Figura 3.12 e 3.13**, sinalizam a presença de uma observação destoante já investigada através do cálculo do resíduo padronizado (observação 24).



**Figura 3.12 – Boxplot dos resíduos.**



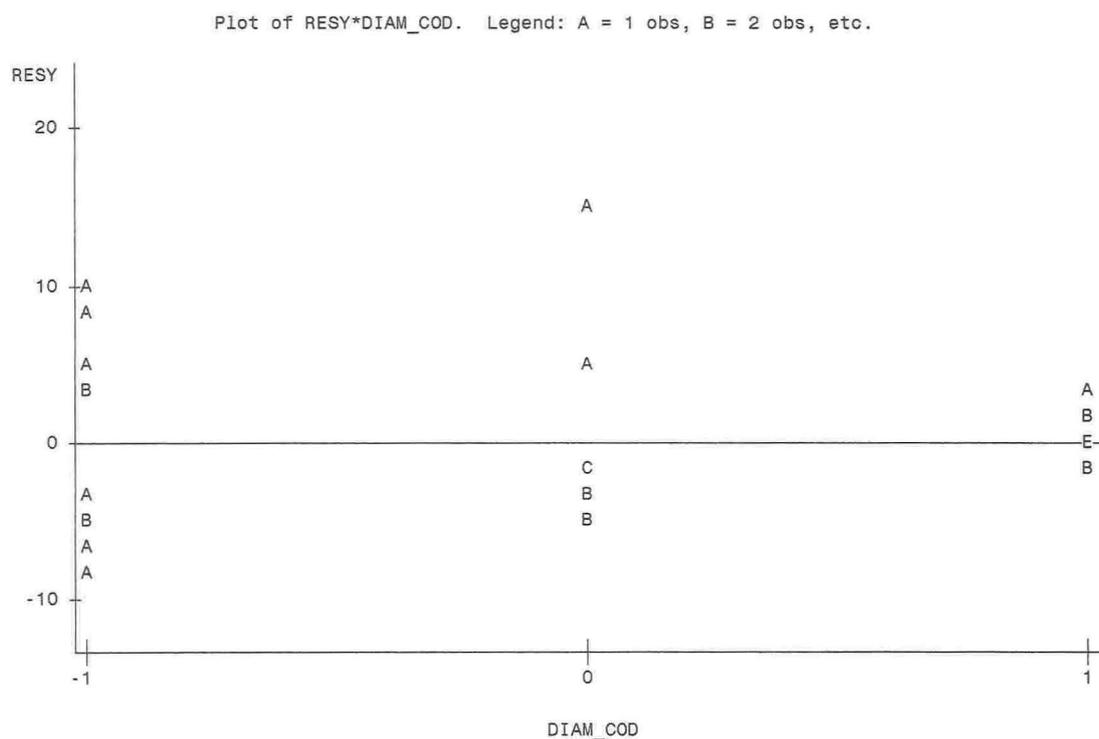
**Figura 3.13 - Gráfico de probabilidade normal.**



NOTE: 1 obs had missing values.

**Figura 3.14 - Análise de resíduos x valores estimados da variável tempo em teste de vazio.**

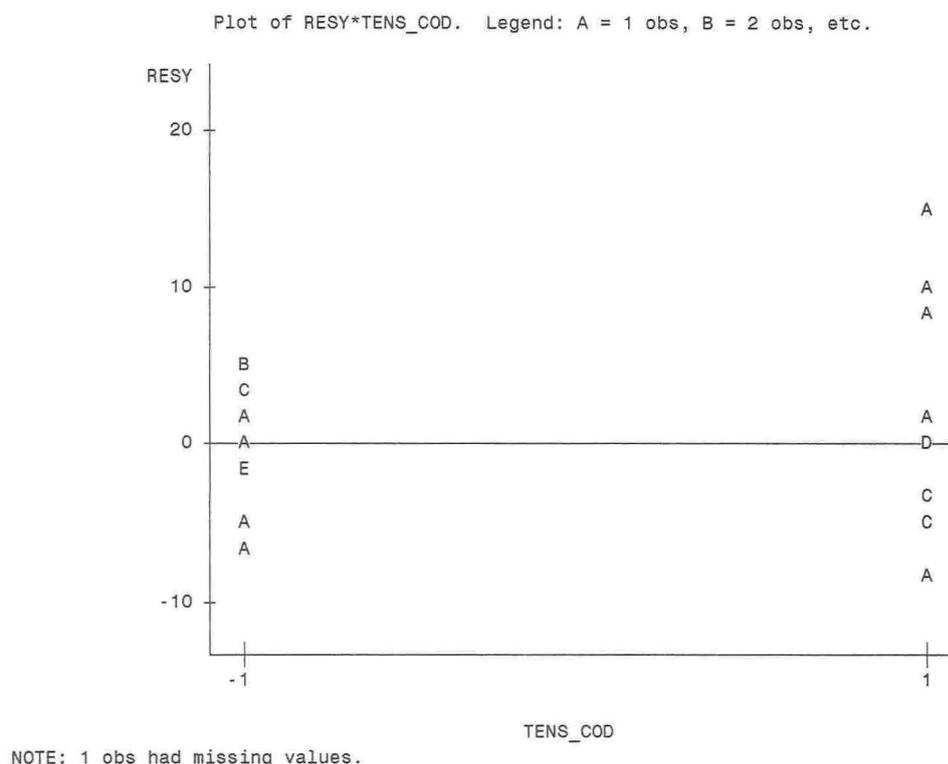
A forma de funil observada na **Figura 3.14** indica a heterogeneidade de variâncias, o que vem a contribuir para a indicação de inadequação do modelo já apontada pela presença de um *outlier*.



NOTE: 1 obs had missing values.

**Figura 3.15** – *Análise de resíduos da variável tempo em teste de marcha em vazio  $x X_1$ .*

Os dois gráficos apresentados nas **Figuras 3.15** e **3.16**, apresentam a homogeneidade dos grupos referentes ao nível mais alto do fator diâmetro do furo e mais baixo do fator tensão e a heterogeneidade dos demais níveis dos fatores, com relação à distribuição dos resíduos.



**Figura 3.16 – Análise de resíduos da variável tempo em teste de marcha em vazio x  $X_2$ .**

Optou-se por mostrar o comportamento de um modelo mal especificado, para que o pesquisador atente a este fato antes de tirar conclusões de um experimento cujas análises podem estar seriamente comprometidas, prejudicando ou até mesmo desperdiçando todo o trabalho. Em casos como este, é recomendável utilizar-se uma transformação da variável resposta, que será escolhida segundo critério apresentado por Riboldi (1994a), cujas etapas seguem:

(i) Busca-se empiricamente um valor  $\alpha$  que indicará a transformação a ser utilizada, através da equação de regressão:

$$\log s_i = \log \theta + \hat{\alpha} \log \bar{y}_i.$$

onde  $s_i$  é o desvio padrão do tratamento  $i$  e  $\bar{y}_i$  é a média do tratamento  $i$ , utilizados desde que não se conheça os verdadeiros parâmetros e  $\theta$  é uma constante de proporcionalidade tal que:

$$\sigma_{y_i} \propto \mu_i^\alpha = \theta \mu_i^\alpha.$$

(ii) Obtido o valor de  $\alpha$ , a relação  $\lambda=1-\alpha$  indica a transformação, sendo que as mais utilizadas são apresentadas no quadro abaixo:

$\alpha$	$\lambda=1-\alpha$	Transformações
0	1	Nenhuma
1/2	1/2	Raiz quadrada
1	0	Logaritmo
3/2	-1/2	Raiz quadrada recíproca
2	-1	Recíproca

*Figura 3.17 - Algumas das transformações mais utilizadas.*

Para o tempo do teste de marcha à vazia, tem-se os cálculos intermediários abaixo, necessários para encontrar-se a transformação adequada:

trat	média	desv. pad.	log(média)	log(desv.pad.)
1	8,4	5,595	0,924	0,748
2	2,5	3,697	0,398	0,568
3	2,4	2,074	0,380	0,317
4	10,4	8,081	1,017	0,907
5	5,2	8,289	0,716	0,918
6	1,8	0,837	0,255	-0,077

*Figura 3.18 – Dados necessários para a obtenção da transformação.*

$$\log s_i = \log \theta + \alpha \log \bar{y}_i$$

$$\log s_i = -0,07576 + 1,039193 * \log \bar{y}_i \quad \Rightarrow \quad \lambda = 1 - \alpha \quad \Rightarrow \quad \lambda = 1 - 1,039 \cong 0$$

Logo, para  $\lambda \cong 0$ , a **Figura 3.17** conduz à transformação logarítmica.

Como neste caso tem-se respostas que assumem o valor zero, utilizou-se  $\log(x+0,5)$ .

A Análise de Variância para a variável transformada é apresentada a seguir.

### 3) Análise de Variância para a variável log (tempo em teste de vazão + 0.5) (TRANV)

**Tabela 3.11** – Análise de Variância para a variável transformada.

Causas de variação	Graus de liberdade	Soma de quadrados	Quadrado médio	F	F prob.
X <sub>1</sub> : diâmetro	2	9.50	4.75	5.51	0.0111*
X <sub>2</sub> : tensão	1	0.49	0.49	0.57	0.4575
X <sub>1</sub> *X <sub>2</sub>	2	0.37	0.19	0.22	0.8075
Erro	23	19.61	0.85	-	-
Total	28	29.97			

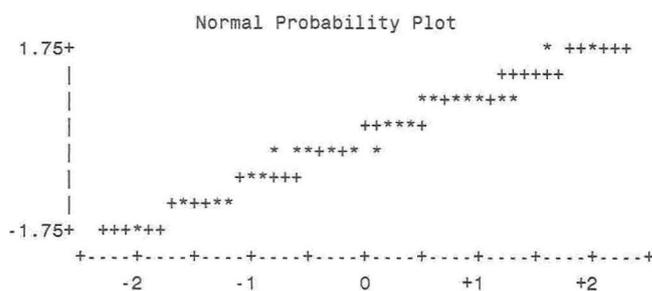
**Tabela 3.12** – Teste de comparações múltiplas.

X <sub>1</sub>	Média
-1	2.01 a
0	0.85 b
+1	0.77 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem significativamente pelo teste de comparações múltiplas da mínima diferença significativa, ao n.s. 5%.

Observa-se através das **Tabelas 3.11 e 3.12** que após a transformação, o efeito significativo do fator diâmetro do furo se manteve ( $p=0,0111$ ), e até mesmo os resultados das comparações múltiplas não sofreram alterações. Porém, o modelo especificado para a variável transformada apresenta as suposições de adequabilidade satisfeitas, fornecendo maior segurança nos resultados.

A estatística W assumiu  $Pr < W = 0,6242$ , demonstrando um bom ajuste dos resíduos à distribuição normal, o que também pode ser verificado através do gráfico de probabilidade normal (**Figura 3.19**).



**Figura 3.19** – Gráfico de probabilidade normal.

**Tabela 3.13** – Análise de resíduos (brutos) para a variável resposta tempo em teste de vazio transformada.

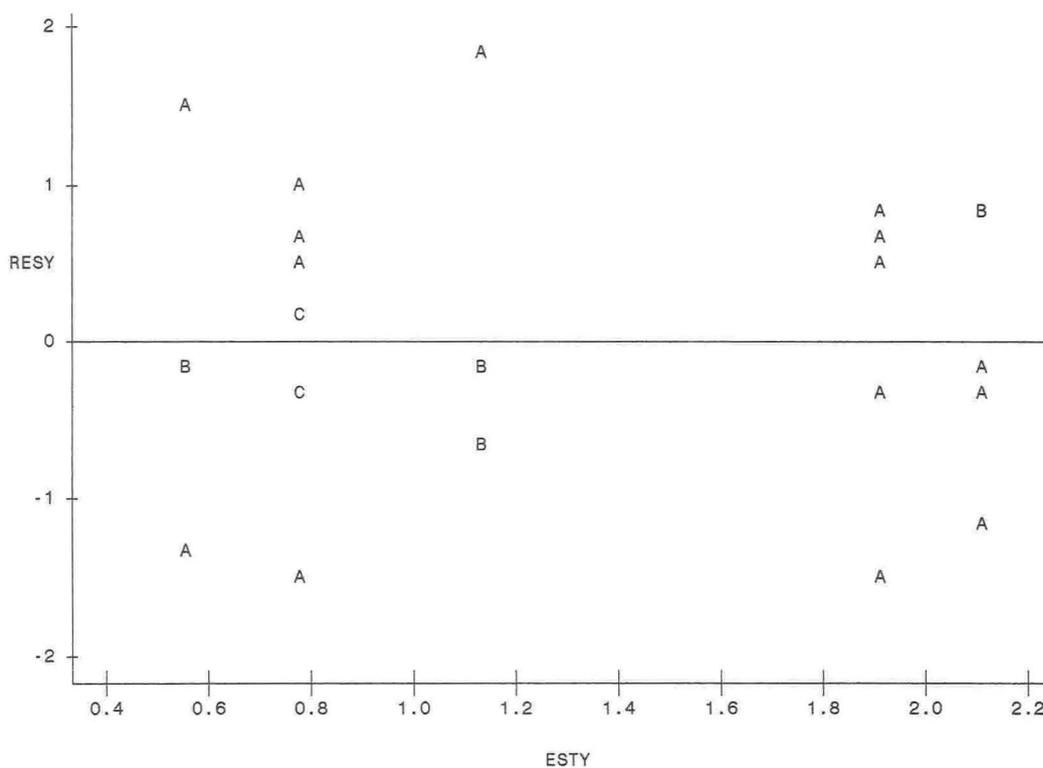
OBS	TRANV	ESTY	RESY
1	1.70475	0.76749	0.93726
2	0.91629	0.76749	0.14880
3	-0.69315	0.56446	-1.25761
4	1.50408	0.76749	0.73659
5	2.67415	1.91035	0.76380
6	-0.69315	0.76749	-1.46063
7	2.44235	1.91035	0.53199
8	.	0.56446	.
9	1.50408	1.91035	-0.40628
10	0.40547	0.56446	-0.15900
11	2.14007	0.56446	1.57560
12	2.52573	1.91035	0.61538
13	0.40547	1.91035	-1.50489
14	0.40547	0.56446	-0.15900
15	0.40547	0.76749	-0.36202
16	0.40547	0.77925	-0.37379
17	0.40547	1.13279	-0.72732
18	1.25276	0.77925	0.47351
19	1.70475	2.11483	-0.41008
20	0.91629	0.77925	0.13704
21	2.01490	2.11483	-0.09992
22	0.91629	2.11483	-1.19854
23	0.40547	0.77925	-0.37379
24	3.02042	1.13279	1.88764
25	0.91629	0.77925	0.13704
26	0.40547	1.13279	-0.72732
27	0.91629	1.13279	-0.21650
28	0.91629	1.13279	-0.21650
29	2.91777	2.11483	0.80294
30	3.02042	2.11483	0.90560

Stem Leaf	#	Boxplot
1 69	2	
1		
0 55678899	8	+-----+
0 111	3	+
-0 4444422221	10	*-----*
-0 77	2	
-1 32	2	
-1 55	2	
-----+-----+-----+		

**Figura 3.20** – Boxplot dos resíduos da variável transformada log (tempo em teste de vazio + 0.5).

Através da **Figura 3.20**, observa-se que a transformação utilizada foi adequada para solucionar o problema da existência de uma observação destoante (número 24), pois esta já não se destaca das demais.

Plot of RESY\*ESTY. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



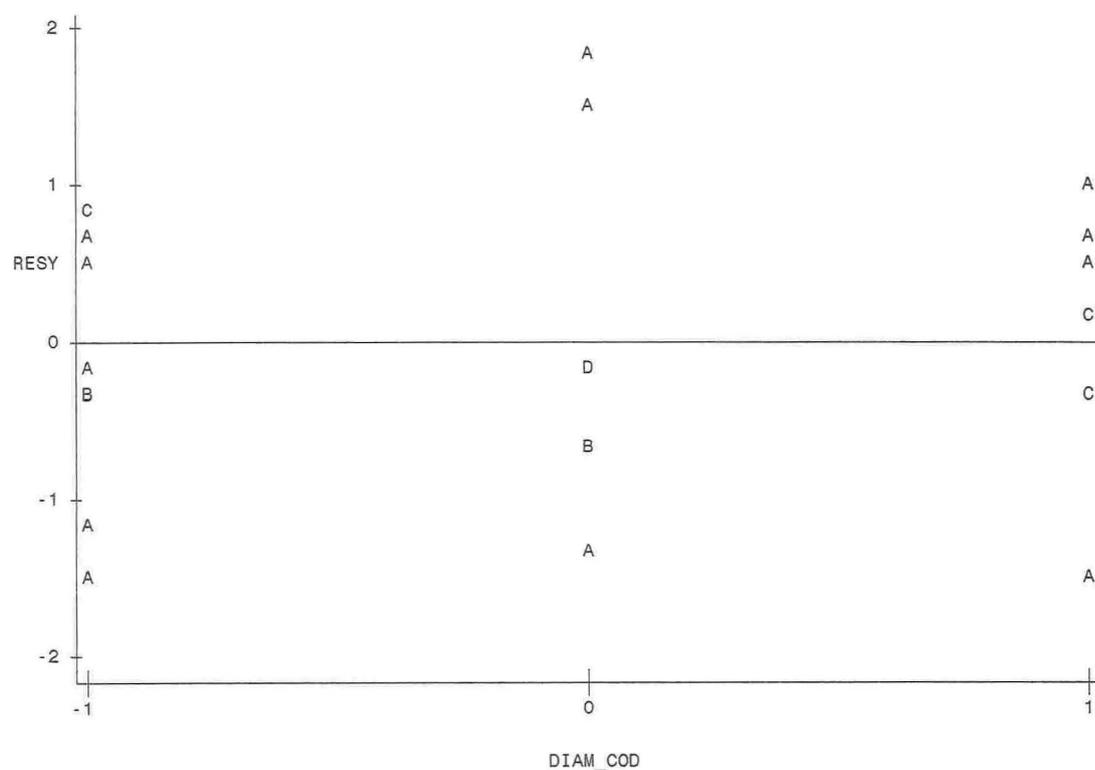
NOTE: 1 obs had missing values.

**Figura 3.21** - Análise de resíduos x valores estimados da variável transformada.

O gráfico dos resíduos apresentado na **Figura 3.21**, demonstra que o problema de heterocedasticidade foi resolvido pela transformação, uma vez que a distribuição dos resíduos que antes apresentava forma de funil, agora encontra-se aleatoriamente em torno de zero.

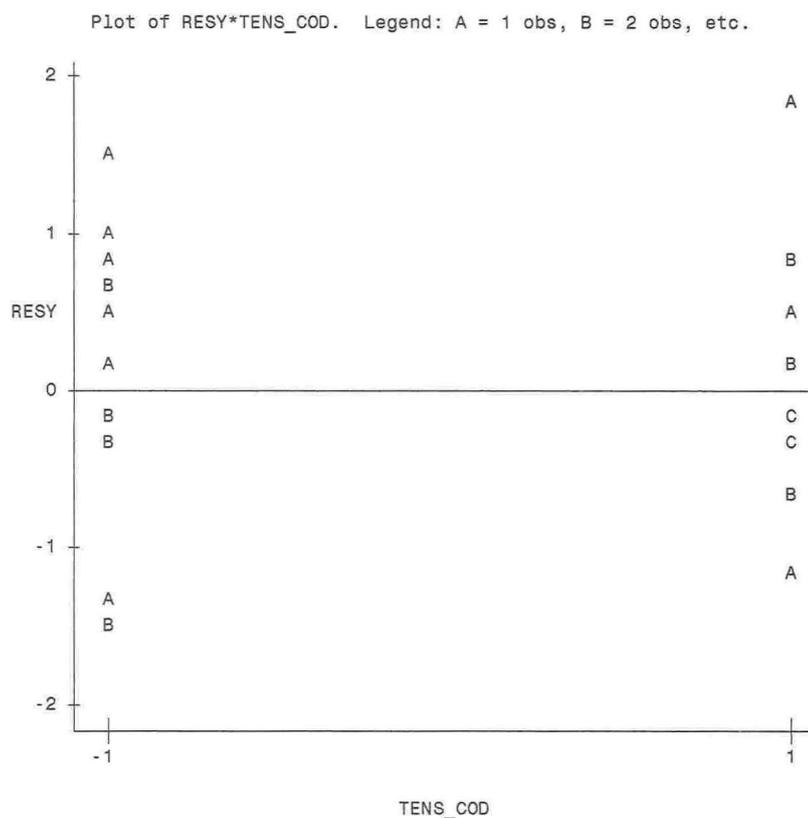
As **Figuras 3.22** e **3.23** também confirmam a solução da heterogeneidade de variâncias, as quais retratam que, após a transformação dos dados, os grupos tornaram-se mais homogêneos.

Plot of RESY\*DIAM\_COD. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



NOTE: 1 obs had missing values.

**Figura 3.22** – *Análise de resíduos da variável transformada  $x X_1$ .*



**Figura 3.23 – Análise de resíduos da variável transformada  $x X_2$ .**

Após a análise de cada uma das etapas que compõem a avaliação do modelo especificado, vale salientar mais uma vez que, neste experimento, não houve alterações nos resultados devido à inadequabilidade, embora isso pudesse ter ocorrido. Recomenda-se, porém, que esta análise seja realizada antes da aceitação dos resultados da Análise de Variância, para que as conclusões obtidas sejam realmente válidas.

### 3.4.3 Modelagem individual das variáveis e otimização

Através da modelagem individual das variáveis resposta, pode-se quantificar o efeito dos parâmetros do processo (fatores controláveis) sobre cada variável resposta separadamente.

Os modelos de regressão foram estabelecidos para cada variável apenas em função do fator identificado como significativo, ou seja, para a variável resposta *tempo em teste de partida* o modelo ajustado é linear dado que se tem apenas dois níveis para o fator tensão;

para a variável resposta *tempo em teste de vazio*, o modelo utilizado é quadrático ( três níveis para o fator diâmetro do furo) visto que este teve um valor maior para o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que o modelo linear. A **Tabela 3.14** apresenta os modelos obtidos em função dos níveis codificados dos fatores  $X_1$  : diâmetro e  $X_2$  : tensão.

**Tabela 3.14** – *Modelagem individual das variáveis resposta.*

Variável resposta	Modelo de regressão	$R^2$
$Y_1$ : Tempo teste de partida	$\hat{Y} = 9,83 + 1,1 * X_2$	30,2%
$Y_2$ : Tempo teste em vazio	$\hat{Y} = 4,0 - 3,65 * X_1 + 1,75 * X_1^2$	27,6%

Apesar da explicação dos modelos obtidos ser muito baixa, não foi possível aumentar o número de observações para melhorar o valor de  $R^2$  devido às restrições práticas. No entanto, optou-se por apresentar os resultados com ressalvas e sedimentar a metodologia aplicada.

Após a modelagem individual, foi obtida uma função que fornece a otimização global entre as variáveis. A otimização global consiste em identificar o ajuste dos fatores controláveis que otimiza simultaneamente todas as variáveis resposta de interesse com um compromisso entre elas, isto é, busca-se uma solução conciliatória que pondere as importâncias relativas de cada variável resposta sobre o produto final. Caten (1995), utilizou a Função de Perda Quadrática Multivariada para realizar esta otimização, a qual incorpora três objetivos distintos: (i) desvios do alvo; (ii) robustez do ruído e (iii) robustez às oscilações nos fatores controláveis. A Função de Perda Quadrática Multivariada foi adaptada para este estudo, com o objetivo único de avaliar a perda devido aos desvios do alvo. A equação é denotada por:

$$\hat{Z} = \sum_{j=1}^J w_j (\hat{Y}_j - T_j)^2$$

onde:

$\hat{Z}$  é a função a ser minimizada; para cada ajuste dos fatores controláveis, pode-se obter um valor estimado de  $Z$ ;

$w_j$  são pesos que levam em conta a unidade e importância relativa de cada variável resposta;

$T_j$  é o valor ideal para a variável resposta  $j$ ;

$\hat{Y}_j$  é o modelo de regressão obtido para cada variável resposta  $j$ .

A justificativa para utilizar-se esta função é que a perda incorrida ao consumidor devido à má qualidade é, em muitos casos, aproximadamente proporcional ao quadrado do desvio do alvo, perda esta que ocorre devido ao processo de deterioração gradual sofrido pelo produto à medida que as variáveis resposta distanciam-se do valor alvo.

Para os fatores utilizados, não havia interesse em se utilizar níveis intermediários de tensão em busca da otimização global, enquanto que para o diâmetro, a equipe gostaria de conhecer o ajuste ótimo. Sendo assim, fixou-se inicialmente a tensão em seu nível mais baixo (-1) e através de relações matemáticas se obteve o “ajuste ótimo” do diâmetro do furo; em seguida, procedeu-se da mesma forma para o nível mais alto do fator tensão (+1). Denominou-se, neste caso, “ajuste ótimo” o nível do fator diâmetro do furo que produziu resultados mais próximos do valor alvo em ambas as variáveis resposta.

O valor alvo para a variável resposta *tempo em teste de partida* foi fixado com base no mínimo tempo observado neste estudo, uma vez que a Norma não fixa um valor, e o peso atribuído a ela pela equipe técnica de acordo com a importância do teste foi 0,6; já para o *tempo em teste de vazio*, utilizou-se o valor especificado pela NBR 5313 da ABNT (1997) e o peso atribuído foi 0,4. Ambas as variáveis são do tipo menor-é-melhor.

Assim, para este estudo, as perdas foram assim obtidas (para os valores codificados):

$$\hat{Z} = 0,6 * (\hat{Y}_1 - 7)^2 + 0,4 * (\hat{Y}_2 - 15)^2$$

$$\hat{Z} = 0,6 * ((9,83 + 1,1 * X_1) - 7)^2 + 0,4 * ((4,0 - 3,65 * X_1 + 1,75 * X_1^2) - 15)^2$$

A **Tabela 3.15** apresenta as combinações de níveis que produziram menor perda e os valores alvo com seus respectivos valores estimados para as variáveis resposta.

**Tabela 3.15** – Ajustes ótimos dos fatores controláveis, valores alvo e respectivos valores estimados para as variáveis resposta.

$X_1$	$X_2$	$T_1$	$T_2$	$\hat{Y}_1$	$\hat{Y}_2$
1	-1	7	15	8,7	9,4
1	1	7	15	10,9	2,1

Para estes ajustes, a perda relacionada a  $X_2 = 1$ , ou seja, à tensão 240V foi aproximadamente cinco vezes maior que aquela relacionada a 120V.

Além disso, ao considerar o compromisso entre as variáveis resposta segundo os pesos atribuídos pela equipe, nota-se que o melhor desempenho foi obtido pelos medidores que possuíam o nível de  $X_1 = 1$ , ou seja, o diâmetro do furo igual a 1,5mm.

Lembrando que, ao analisar isoladamente as variáveis não foi identificada diferença significativa entre os diferentes diâmetros do furo para a variável resposta tempo em teste de partida e que, para a variável resposta tempo em teste de vazio, o melhor desempenho ocorreu em medidores com furo de 1,5mm, independente da tensão, o resultado é coerente.

Porém, as informações obtidas nesta etapa do estudo não foram consideradas conclusivas e serão analisadas pela equipe técnica com o objetivo de verificar a adequação destes resultados à prática.

## ***CAPÍTULO 4***

### ***CONSIDERAÇÕES FINAIS***

#### ***4.1 CONCLUSÕES***

A Estatística vem conquistando espaço em diferentes áreas atualmente, e um dos principais motivos é a preocupação das empresas em oferecer qualidade a seus clientes em seus produtos e serviços. Prova disso, é o crescente número de certificações ISO e QS obtidas pelo reconhecimento da qualidade e, mais recentemente, a utilização da metodologia *Six Sigma* que é fundamentalmente composta por ferramentas estatísticas.

Este trabalho apresentou técnicas já bastante difundidas no meio industrial: análise de sistemas de medição e projetos experimentais. Foi realizada inicialmente uma revisão da literatura e a aplicação destas técnicas foi ilustrada através de um estudo de caso.

Com o objetivo de melhorar o desempenho do produto alvo – medidores monofásicos - através da obtenção dos ajustes ótimos dos parâmetros controláveis do processo, a confiabilidade no sistema de medição utilizado para a realização dos testes - bancas VP - foi de suma importância, visto que, todas as análises seriam realizadas com base nas informações obtidas através deste sistema.

Na primeira etapa do estudo de caso, procedeu-se uma análise de R&R - Repetibilidade e Reproduzibilidade por atributos, a qual possui poucas fontes de referência quando se trata do tipo de sistema de medição utilizado. Esta análise indicou problemas de reprodutibilidade, confirmando suspeitas levantadas frente à observação da rotina de operação do sistema, de que havia uma variabilidade maior que a admissível entre as diferentes borneiras que compõem a banca avaliada no que se refere ao critério de aprovação das unidades produzidas. Além disso, foi possível identificar-se as borneiras que apresentaram

comportamento indesejável (diferente das demais) nas quais foi recomendada a tomada de ações corretivas.

Na segunda etapa, projetou-se o experimento conforme os passos sugeridos por Montgomery (1991): identificação do problema, escolha da variável resposta, seleção dos fatores e seus níveis, escolha do planejamento experimental, execução do experimento e análise dos dados.

Foram utilizadas técnicas de Análise de Variância para as duas variáveis resposta consideradas: tempo em teste de partida e tempo em teste de vazio, visando identificar-se o efeito significativo dos fatores tensão e diâmetro do furo sobre elas. Verificou-se a adequabilidade dos modelos especificados e, no caso em que observou-se um mau ajuste, foi recomendado um procedimento de transformação da variável resposta.

Para a variável *tempo em teste de partida*, concluiu-se que apenas a tensão exerce influência significativa sobre o desempenho do medidor, independentemente do diâmetro do furo utilizado, sendo que os medidores com tensão igual a 120V realizaram o teste em um tempo menor que os de 240V.

Já para o *tempo em teste de marcha à vazio* identificou-se a influência do diâmetro do furo, independentemente da tensão; o desempenho dos medidores sem furo foi pior que daqueles com furos de 1mm e 1,5mm, os quais não diferiram significativamente entre si.

Com o objetivo de encontrar-se o ajuste ótimo dos parâmetros que conduzisse ao melhor desempenho dos medidores em ambos os testes, ou seja, aprovações obtidas em menor tempo que o atual, foram construídos modelos de regressão que incorporassem apenas os efeitos significativos encontrados para cada uma das variáveis resposta e, a partir deles e dos valores alvo fixados para o tempo em cada um dos testes, utilizou-se a função perda quadrática multivariada. A função perda quadrática utilizada contemplou apenas um dos aspectos referentes à qualidade de um produto: *desvios do alvo*, robustez ao ruído e às oscilações dos parâmetros do processo, além dos aspectos econômicos. O valor ótimo obtido para o fator diâmetro do furo foi 1,5mm.

De forma geral, pode-se dizer que os objetivos do trabalho foram cumpridos tanto sob o ponto de vista teórico quanto prático, visto que os assuntos abordados foram profundamente estudados e sua aplicação conduziu a resultados que, embora não tenham sido considerados conclusivos, tiveram grande valor tanto para o pesquisador quanto para a empresa na qual foi realizado.

A metodologia utilizada foi simples e as técnicas de R&R e delineamento de experimentos já são conhecidas pela equipe envolvida no processo analisado, o que facilitou o entendimento do trabalho. Além disso, estas ferramentas podem facilmente ser replicadas na indústria.

A possibilidade de utilizar-se a Análise de Variância Multivariada (MANOVA) também foi analisada, porém, os resultados obtidos foram idênticos no que se refere ao efeito significativo dos fatores identificados. Optou-se por utilizar a técnica multivariada apenas na etapa de otimização, através da função perda, para a qual a modelagem é feita individualmente.

#### ***4.2 SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS***

A partir da problemática apresentada pela empresa, tentou-se otimizar o desempenho dos medidores quando estes encontravam-se na última etapa do processo, o teste VP. Chegou-se a um resultado realmente importante no estudo de R&R. Porém, recomenda-se que o experimento seja repetido, utilizando-se maior número de unidades experimentais, em uma etapa anterior (calibração, por exemplo) e considerando-se outros fatores controláveis, o que provavelmente levará a resultados práticos mais pertinentes.

Outro comentário importante é que as técnicas apresentadas neste trabalho oferecem excelentes oportunidades para a otimização não apenas do processo analisado, mas também de outros que posteriormente podem ser alvo de novos estudos, e podem auxiliar inclusive na quantificação dos custos gerados pela má qualidade, se o potencial das ferramentas for utilizado adequadamente.

## ANEXOS



continuação

Medidor	P 11				Erros Repet	P 12				Erros Repet	P 13				Erros Repet	P 14				Erros Repet	P 15				Erros Repet			
	R1		R2			P	V	P	V		P	V	P	V		P	V	P	V		P	V						
	P	V	P	V	P					V					P					V			P	V	P	V	P	V
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Totais</b>					0					0					2					0					0			

Medidor	P 16				Erros Repet	P 17				Erros Repet	P 18				Erros Repet	P 19				Erros Repet	P 20				Erros Repet			
	R1		R2			P	V	P	V		P	V	P	V		P	V	P	V		P	V						
	P	V	P	V	P					V					P					V			P	V	P	V	P	V
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Totais</b>					0					0					0					0					2			
<b>Total</b>																									7			

continua

**Reprodutibilidade:**

<b>Medidor</b>	<b>Erros Reprodutibilidade</b>
<b>1</b>	2
<b>2</b>	1
<b>3</b>	2
<b>4</b>	2
<b>5</b>	1
<b>6</b>	0
<b>7</b>	0
<b>8</b>	0
<b>9</b>	1
<b>10</b>	2
<b>Total</b>	11

## ANEXO II

### *Rotinas do SAS e a matriz de dados*

```
data experim;
options nodate nonumber;
input run tensao diamet tens_cod diam_cod tempv temp;
tranv=log(tempv+.5);
tranp=1/tempv;
cards;
1      120      1.5      -1      1      9      5
2      120      1.5      -1      1      8      2
3      120      1        -1      0      7      0
4      120      1.5      -1      1      8      4
5      120      0        -1      -1     12     14
6      120      1.5      -1      1      8      0
7      120      0        -1      -1     9      11
8      120      1        -1      0      7      .
9      120      0        -1      -1     10     4
10     120      1        -1      0      8      1
11     120      1        -1      0      8      8
12     120      0        -1      -1     7      12
13     120      0        -1      -1     10     1
14     120      1        -1      0      9      1
15     120      1.5      -1      1      11     1
16     240      1.5      1      1      13     1
17     240      1        1      0      11     1
18     240      1.5      1      1      16     3
19     240      0        1      -1     13     5
20     240      1.5      1      1      10     2
21     240      0        1      -1     13     7
22     240      0        1      -1     10     2
23     240      1.5      1      1      10     1
24     240      1        1      0      10     20
25     240      1.5      1      1      10     2
26     240      1        1      0      9      1
27     240      1        1      0      10     2
28     240      1        1      0      10     2
29     240      0        1      -1     9      18
30     240      0        1      -1     10     20
;
/*PARTIDA*/
proc glm;
class tens_cod diam_cod;
model tempv=tens_cod diam_cod tens_cod*diam_cod;
lsmeans diam_cod/p;
output out=a r=resy p=esty;
proc print;
var tempv esty resy;
proc univariate normal plot;
var resy;
proc plot;
plot resy*esty/vref=0;
plot resy*tens_cod/vref=0;
plot resy*diam_cod/vref=0;
```

```

run;
/*VAZIO*/
proc glm;
class tens_cod diam_cod;
model tempv=tens_cod diam_cod tens_cod*diam_cod;
lsmeans diam_cod/p;
output out=a r=resy p=esty;
proc print;
    var tempv esty resy;
proc univariate normal plot;
var resy;
proc plot;
plot resy*esty/vref=0;
plot resy*tens_cod/vref=0;
plot resy*diam_cod/vref=0;

run;

```

```

/*VAZIO COM TRANSFORMAÇÃO LOG(X+0.5)*/
proc glm;
class tens_cod diam_cod;
model tranv=tens_cod diam_cod tens_cod*diam_cod;
lsmeans diam_cod/p;
output out=a r=resy p=esty;
proc print;
    var tranv esty resy;
proc univariate normal plot;
var resy;
proc plot;
plot resy*esty/vref=0;
plot resy*tens_cod/vref=0;
plot resy*diam_cod/vref=0;

run;

```

```

/*PARTIDA COM TRANSFORMAÇÃO RECÍPROCA*/
proc glm;
class tens_cod diam_cod;
model tranp=tens_cod diam_cod tens_cod*diam_cod;
lsmeans diam_cod/p;
output out=a r=resy p=esty;
proc print;
    var tranp esty resy;
proc univariate normal plot;
var resy;
proc plot;
plot resy*esty/vref=0;
plot resy*tens_cod/vref=0;
plot resy*diam_cod/vref=0;

run;

```

## ANEXO III

*Análise da variável transformada: tempo do teste de corrente de partida*

*Transformação Utilizada: recíproca*

General Linear Models Procedure  
Class Level Information

Class	Levels	Values
TENS_COD	2	1 -1
DIAM_COD	3	0 1 -1

Number of observations in data set = 30

General Linear Models Procedure

Dependent Variable: TRANP

Source	DF	Sum of Squares	Mean Square	F Value	Pr > F
Model	5	0.00582083	0.00116417	4.70	0.0039
Error	24	0.00594287	0.00024762		
Corrected Total	29	0.01176370			
	R-Square	C.V.	Root MSE	TRANP Mean	
	0.494813	14.90358	0.01573593	0.10558492	

Source	DF	Type I SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TENS_COD	1	0.00419484	0.00419484	16.94	0.0004
DIAM_COD	2	0.00130731	0.00065365	2.64	0.0920
TENS_COD*DIAM_COD	2	0.00031868	0.00015934	0.64	0.5343

Source	DF	Type III SS	Mean Square	F Value	Pr > F
TENS_COD	1	0.00419484	0.00419484	16.94	0.0004
DIAM_COD	2	0.00130731	0.00065365	2.64	0.0920
TENS_COD*DIAM_COD	2	0.00031868	0.00015934	0.64	0.5343

OBS	TRANP	ESTY	RESY
1	0.11111	0.11540	-0.004293
2	0.12500	0.11540	0.009596
3	0.14286	0.12937	0.013492
4	0.12500	0.11540	0.009596
5	0.08333	0.10746	-0.024127
6	0.12500	0.11540	0.009596
7	0.11111	0.10746	0.003651

8	0.14286	0.12937	0.013492
9	0.10000	0.10746	-0.007460
10	0.12500	0.12937	-0.004365
11	0.12500	0.12937	-0.004365
12	0.14286	0.10746	0.035397
13	0.10000	0.10746	-0.007460
14	0.11111	0.12937	-0.018254
15	0.09091	0.11540	-0.024495
16	0.07692	0.08788	-0.010962
17	0.09091	0.10040	-0.009495
18	0.06250	0.08788	-0.025385
19	0.07692	0.09299	-0.016068
20	0.10000	0.08788	0.012115
21	0.07692	0.09299	-0.016068
22	0.10000	0.09299	0.007009
23	0.10000	0.08788	0.012115
24	0.10000	0.10040	-0.000404
25	0.10000	0.08788	0.012115
26	0.11111	0.10040	0.010707
27	0.10000	0.10040	-0.000404
28	0.10000	0.10040	-0.000404
29	0.11111	0.09299	0.018120
30	0.10000	0.09299	0.007009

Variable=RESY

Moments				Quantiles(Def=5)			
N	30	Sum Wgts	30	100% Max	0.035397	99%	0.035397
Mean	0	Sum	0	75% Q3	0.010707	95%	0.01812
Std Dev	0.014315	Variance	0.000205	50% Med	-0.0004	90%	0.013492
Skewness	0.03065	Kurtosis	-0.06416	25% Q1	-0.00949	10%	-0.02119
USS	0.005943	CSS	0.005943	0% Min	-0.02538	5%	-0.02449
CV	.	Std Mean	0.002614			1%	-0.02538
T:Mean=0	0	Pr> T	1.0000	Range	0.060781		
Num ^= 0	30	Num > 0	14	Q3-Q1	0.020202		
M(Sign)	-1	Pr>= M	0.8555	Mode	-0.0004		
Sgn Rank	1.5	Pr>= S	0.9760				
W:Normal	0.959534	Pr<W	0.3432				

Extremes

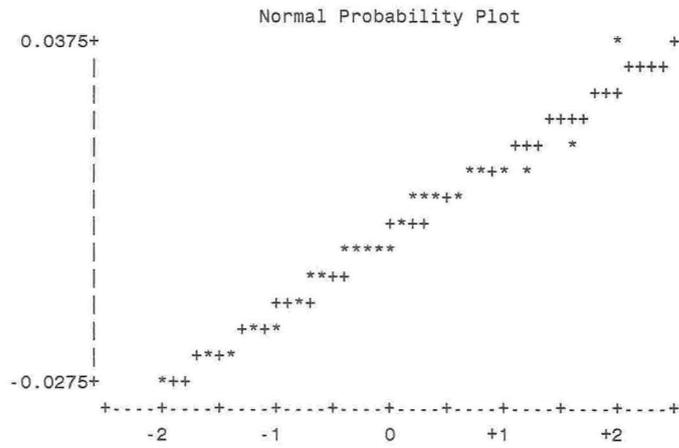
Lowest	Obs	Highest	Obs
-0.02538(	18)	0.012115(	25)
-0.02449(	15)	0.013492(	3)
-0.02413(	5)	0.013492(	8)
-0.01825(	14)	0.01812(	29)
-0.01607(	21)	0.035397(	12)

Variable=RESY

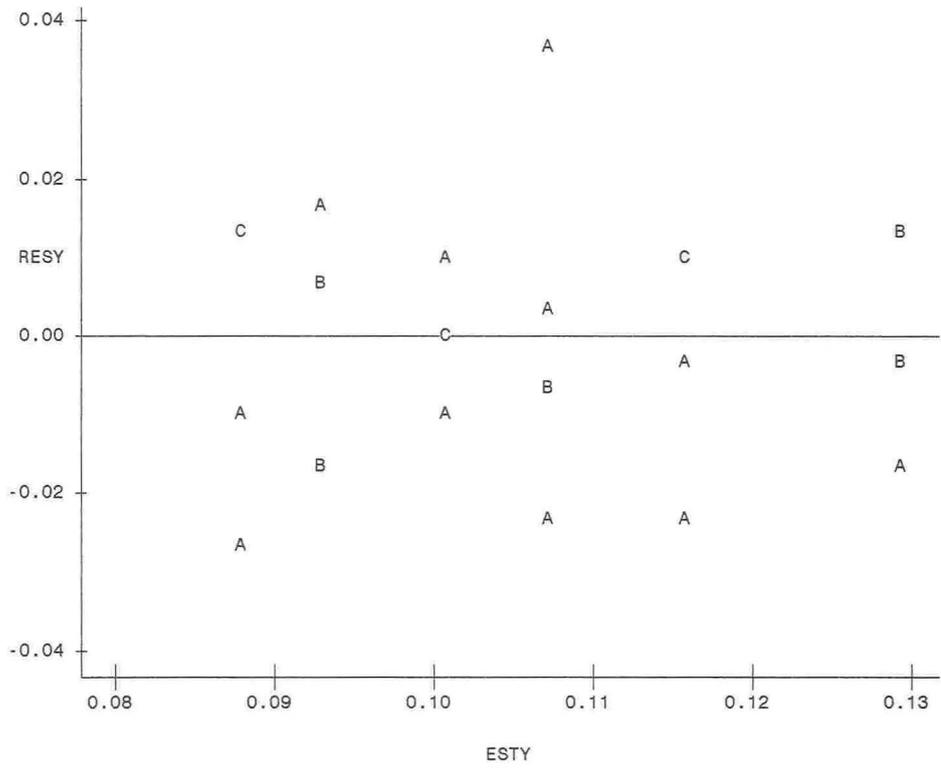
Stem Leaf	#	Boxplot
3 5	1	
3		
2		
2		
1 8	1	
1 000122233	9	+-----+
0 77	2	
0 4	1	+
-0 444000	6	*-----*
-0 977	3	+-----+
-1 1	1	
-1 866	3	
-2 44	2	
-2 5	1	
-----+-----+-----+		

Multiply Stem.Leaf by 10\*\*-2

Variable=RESY

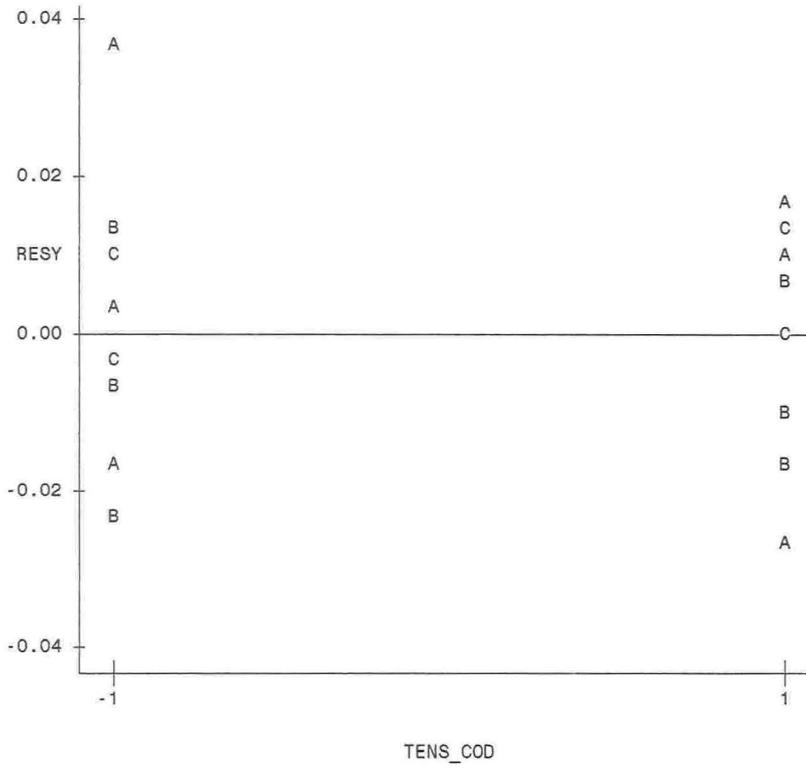


Plot of RESY\*ESTY. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.

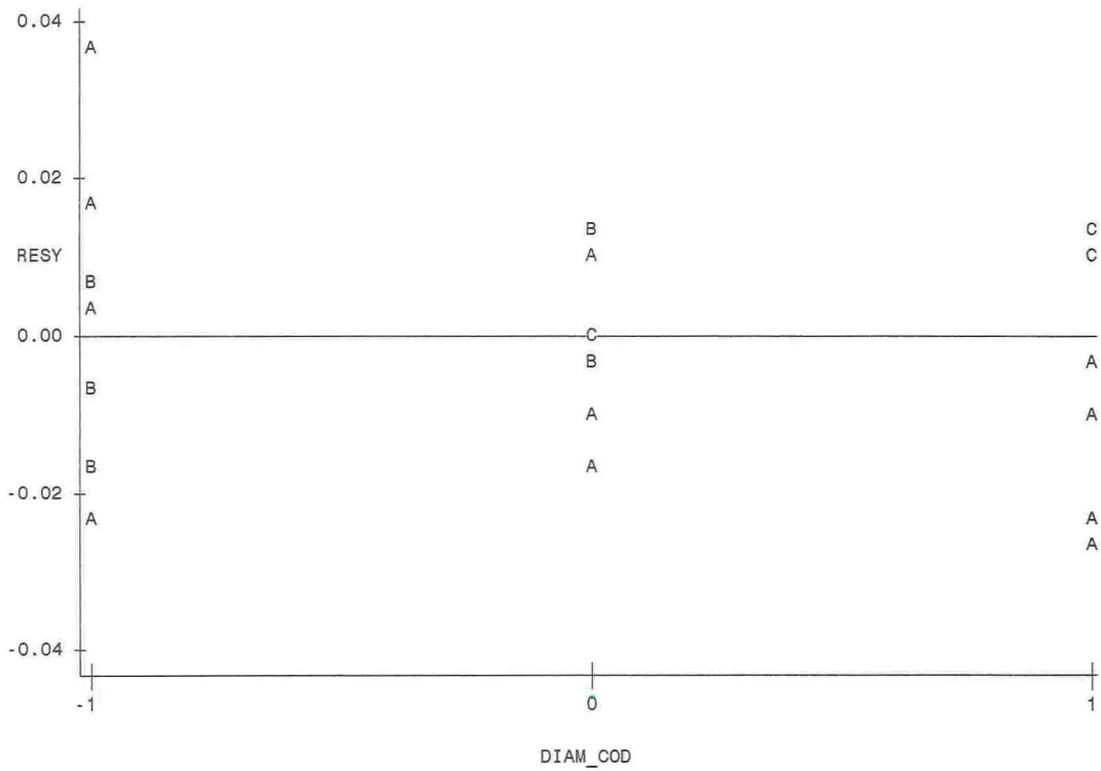


The SAS System

Plot of RESY\*TENS\_COD. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



Plot of RESY\*DIAM\_COD. Legend: A = 1 obs, B = 2 obs, etc.



## <sup>1</sup>*GLOSSÁRIO*

**AFERIÇÃO:** determinação dos erros do medidor.

**CALIBRAÇÃO:** manejo dos dispositivos de calibração do medidor de modo a fazê-lo indicar, dentro dos erros admissíveis, a energia a ser medida.

**CORRENTE NOMINAL (em Amperes):** intensidade de corrente para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios constantes da norma NBR 5313 (dezembro, 1997)

**DISCO:** o disco deve ter rigidez suficiente para evitar empeno. A borda, de pelo menos um disco, deve ter marca indelével de cor preta para referência na contagem das rotações, marcas e/ou ranhuras para aferição estroboscópica e 100 divisões ou riscos numerados de 10 em 10 para aferição por comparação com o medidor padrão.

**FREQÜÊNCIA NOMINAL (em Hz):** freqüência para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios constantes da norma NBR 5313 (dezembro, 1997). Número de ciclos da corrente alternada do medidor, por segundo.

**TENSÃO NOMINAL (em Volts):** tensão para a qual o medidor é projetado e que serve de referência para a realização dos ensaios constantes da norma NBR 5313 (dezembro, 1997)

---

<sup>1</sup> \* Glossário construído segundo classificação da NBR 5313 da ABNT (1997).

## ***REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS***

- ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 5313**. Dez.,1997. 10p.
- Banzatto, D.A. e Kronka, S. **Experimentação Agrícola**. Departamento de Ciências Exatas – UNESP. 1989. 247p.
- Bishop, T, Petersen, B. e Trayser, D. **Another look at the statistician's role in experimental planning and design**. The American Statistician, vol. 36, nº 4, p.387-389, nov. 1982.
- Campos, H. **Estatística aplicada à experimentação com cana-de-açúcar**. Fundação de Estudos Agrários Luiz de Queiroz.1983. 292p.
- Caten, C.S. **Método de otimização de produtos e processos medidos por múltiplas características de qualidade**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 1995.
- Chrysler Corporation, Ford Motor Company e General Motors Company. **Análise dos sistemas de medição**. 1995. 127p.
- Coleman, D.E. e Montgomery, D.C. **A systematic approach to planning for a designed industrial experiment**. Technometrics, v.35, nº 1, p. 1-12, fev. 1993.
- Deming, W.E. **The logic of evaluation**. The Handbook of Evaluation Research. v.1, 1986.
- Echeveste, M.E.S. **Planejamento da otimização experimental de processos industriais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, 1997.
- Gomes, F.P. **Curso de estatística experimental**. 6ª ed., São Paulo, 1976. 430p.
- Hahn, G. **Some things engineers should know about experimental design**. Journal of Quality Technology. v.9, nº 1, p. 13-20, jan. 1977.
- Hahn. G. e Hoerl. R. **Key challenges for statisticians in business and industry**. Technometrics. v.40, nº 3, p-195-200, ago. 1998.

- Hicks, C.R. **Fundamental concepts in the design of experiments**. Ed. Hoh Riebehart and Winston, 1964. 263p.
- Kempthorne, O. **The design and analysis of experiments**. John Wiley & Sons, Inc. London. 1967. 628p.
- Knowlton, J. e Keppinger, R. **The Experimentation Process**. Quality Progress, p.43-47, fev. 1993.
- Marquardt, D.W. **Statistical consulting in industry**. **The American Statistician**, vol. 33, nº 3, p.102-107, aug.1979.
- Mizuno, S. e Akao, Y. **QFD: The customer driven approach to quality planning and design**. Tokyo, Asian. Asian Productivity Organization, 1994. 365p.
- Montgomery, D.C. **Design and analysis of experiments**. New York: John Wiley and Sons, 3rd ed., 1991. 645p.
- Neto, B.B., Scarmino, I.S. e Bruns, H.E. **Planejamento e otimização de experimentos**. Ed. da Unicamp, São Paulo, 1996.
- Ribeiro, J.L. e Caten, C. **Controle estatístico do processo – CEP**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, UFRGS, Porto Alegre, RS, 1998. (Notas de Aula)
- Riboldi, J. **Planejamento e análise de experimentos**. Instituto de Matemática/UFRGS (Cadernos de Matemática e Estatística, Série B, nº 23), Porto Alegre, RS, 1994a.138p.
- Riboldi, J. **Planejamento e análise de experimentos**. Instituto de Matemática/UFRGS (Cadernos de Matemática e Estatística, Série B, nº 29), Porto Alegre, RS, 1994b.67p.
- SAS – **Statistical Analysis System**, Ver. 6.0. Copyright 1990 by Institute Inc., Cary, NC, USA.
- SPSS – **Statistical Package for the Social Sciences**, Ver. 8.0. Copyright 1998 by SPSS Inc.
- Werkema, M.C.C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Fundação Cristiano Ottoni, 1995. vol.2, 384p.

