

Análise das variáveis térmica e lumínica através do método da superfície de resposta durante o processo de montagem de computadores

Luciano Fernandes Monteiro (UFPB) (FASETTE) (UNESC) (ETER) lucianofm@uol.com.br

Luiz Bueno da Silva (UFPB) bueno@ct.ufpb.br

Antônio Souto Coutinho (UFPB) coutinho@ct.ufpb.br

Flávio Luiz Honorato da Silva (UFCG) flhs@deq.ufcg.edu.br

Resumo

Este artigo trata de um trabalho realizado na Escola Técnica Redentorista, com alunos do curso de Informática, tendo como objetivo verificar a influência dos fatores ambientais sobre o processo produtivo de montagem de computadores em um laboratório específico. As variáveis de entrada no estudo correspondem à temperatura e à luminosidade, as quais foram controladas antes dos experimentos. Como variáveis de respostas foram observados o tempo de montagem e as falhas cometidas pelos alunos durante a realização do experimento. Apresentam-se estudos relacionados ao conforto ambiental, avaliação da resistência térmica das vestimentas, avaliação das taxas metabólicas e os efeitos da iluminação e da temperatura simultaneamente, sobre o desempenho do grupo de estudo, integrado por 29 alunos. Mediante o método de planejamento fatorial e análise de superfície de respostas foi verificado que as variáveis independentes temperatura e luminosidade apresentaram resultados significativos com nível de confiança de 90%, sobre o desempenho. Concomitantemente foi realizado o levantamento de opiniões subjetivas sobre o ambiente e comparados os resultados com os da superfície de resposta.

Palavras chave: Planejamento fatorial; Superfície de resposta; Variáveis térmica e lumínica.

1. Introdução

As teorias da administração desenvolvidas ao longo do tempo tentam dar justificativas plausíveis para o aumento da produção nas mais diversas organizações.

Por volta de 1940, Ludwig Von Bertalanffy, iniciou estudos de sistemas gerais pensando no metabolismo, estados estáveis, crescimento e sistemas abertos, por meio de conceitos encontrados na química-física, cinemática e termodinâmica. A partir desses estudos foi desenvolvida a Teoria dos Sistemas, onde o sistema é definido como um conjunto de elementos interagentes e interdependentes relacionados cada um ao seu ambiente, de modo a formar um todo organizado. Isto implica que não existe uma fórmula exclusiva capaz de elevar a produção porque todo processo produtivo é algo complexo, sistemático e sinérgico e cada variável a ser analisada poderá ter influência direta na obtenção dos resultados.

Este trabalho tem como objetivo geral verificar a influência dos fatores ambientais sobre o processo produtivo de montagem de computadores em um laboratório da Escola Técnica Redentorista, situada em Campina Grande, Paraíba.

2. Planejamento e otimização de experimentos

Segundo Barros Neto (2001), é comum especialistas em indústrias químicas aparecerem com problemas em que seja preciso estudar várias propriedades ao mesmo tempo e estas, por sua vez, afetadas por um grande número de fatores experimentais. Por outro lado, é preciso que sejam respondidas as seguintes perguntas: como investigar os efeitos de todos esses fatores sobre todas as propriedades, minimizando o trabalho necessário e o custo dos experimentos? Quais fatores experimentais devem ser controlados para que a qualidade do produto seja assegurada?

No entanto, as pesquisas realizadas com o objetivo de fornecer respostas a essas perguntas muitas vezes tomam vários meses de trabalho de pesquisadores e técnicos, a um custo bastante alto em termos de salários, reagentes, análises químicas e testes físicos. Portanto, o emprego do conhecimento estatístico pode ajudar a responder estas perguntas de forma racional e econômica. 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.

Um experimento é uma série de ensaios nos quais são realizadas variações nos parâmetros ou variáveis de entrada do processo ou de uma operação industrial, objetivando verificar e identificar as variações nas respostas ou variáveis de saída (COSTA, 1999).

O desenho de experimentos permite conduzir os ensaios de uma maneira otimizada. Com o planejamento experimental é possível variar todos os fatores simultaneamente e obter estimativas quantitativas dos principais efeitos e das interações entre os fatores. O planejamento experimental assegura um menor erro na determinação dos efeitos de interesse que qualquer outro método ortodoxo poderia alcançar. Além do mais, é possível obter os resultados desejados de uma maneira muito mais econômica com menor número de experimentos (AKHNAZAROVA e KAFAROV, 1982).

Os métodos estatísticos suavizam as dificuldades na determinação do erro experimental e a complexidade dos efeitos estudados (BOX et al, 1978).

De acordo com Carpinetti (1996), a análise experimental com base no planejamento estatístico, pode fornecer informações sobre:

Quais as variáveis, ou fatores, do processo são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse, o qual se constitui na variável dependente ou item de controle;

Os níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variação do parâmetro de resposta seja mínimo;

Os níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;

Os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis seja reduzido.

As técnicas usuais de planejamento de experimentos e otimização de processos, amplamente utilizados em ciências e engenharia são encontradas de forma detalhada nos textos de Box et al (1978) e Barros Neto et al (2001).

Os experimentos fatoriais e os experimentos fatoriais fracionários são as técnicas mais usuais no planejamento experimental, usando o quadro de análise de variância (ANOVA) para análise estatística de dados.

O experimento fatorial 2K é um tipo especial de planejamento experimental, adequado ao estudo eficiente e econômico do efeito conjunto de vários fatores ou variáveis de entrada,

sobre uma variável de resposta de interesse, onde cada fator está presente em apenas dois níveis. Portanto, se o número de níveis for igual a 2, uma série experimental completa se transforma em: $2^1 \times 2^2 \times \dots \times 2^k$ com 2^k experimentos, onde k é o número de variáveis de entrada (independentes). Observa-se que, trabalhando apenas com dois níveis de cada variável, a série experimental é reduzida substancialmente (BARROS NETO et al, 2001).

No projeto fatorial completo em dois níveis, pode-se trabalhar com variáveis independentes descontínuas (qualitativas) ou contínuas. Os níveis de cada variável podem ser codificadas em nível baixo (-) e nível alto (+).

No método clássico de experimentos, as variáveis independentes de um determinado processo são avaliadas uma de cada vez, mantendo-se constante as demais, sendo a resposta (variável dependente) estimada por um método de medida adequada. A abordagem dessa técnica experimental apresenta como desvantagem o fato de requerer um número grande de ensaios experimentais quando se trata de experimentos multivariados, além de apresentar limitações nas conclusões, em consequência de possíveis interações entre as variáveis estudadas (BARROS NETO et al, 2001).

Desta forma, o planejamento estatístico de experimentos e a análise de variância proporcionam um vantajoso método para a avaliação dos efeitos e interações das variáveis operacionais mais importantes do processo em análise. Assim, para alcançar o resultado esperado (máximo ou mínimo), as variáveis operacionais devem ser cuidadosamente controladas e as quantificadas suas influências na variável de resposta, sendo recomendada a utilização de experimentos estatisticamente planejados e técnicas de otimização, que são ferramentas indispensáveis de auxílio à pesquisa, pois fornecem resultados a partir de um reduzido número de experimentos com sensível aumento na precisão das informações obtidas (BOX et al, 1978).

De acordo com Almeida (2004), uma das técnicas mais utilizadas na otimização estatística de experimentos é a metodologia de superfícies de resposta, que implica na representação de superfícies em três dimensões, demonstrando de forma clara, uma tendência na variável de resposta que deve ser analisada criteriosamente. Após a determinação da região de interesse, busca-se um detalhamento dessa área visando a obter-se as condições nas quais a resposta será otimizada. Esta técnica é comumente empregada na análise de dados experimentais, permitindo não somente minimizar o número de experimentos, que em sua maioria são bastante trabalhosos e dispendiosos, como também permitindo a otimização do processo e melhorando a qualidade dos produtos finais.

3. Iluminação e frequência de acidentes de trabalho

Os espaços de produção apresentam alguns problemas relacionados a acidentes de trabalho e doenças profissionais, ocasionadas pela sua execução, além de questões de qualidade e de produtividade. Muitas vezes esses parâmetros estão relacionados com o “erro humano”; isto é, o trabalhador seria o principal responsável pelos problemas que o atingem. Contudo, ocasionalmente, as principais causas desses problemas estão na inadequação do trabalho às características humanas, seja devido à pouca iluminação, ao excessivo ruído, à má organização espacial do ambiente, etc. Portanto, a segurança e o bom desempenho do operário estão ligados à qualidade do espaço construído.

Os ambientes termicamente confortáveis favorecem a maximização da qualidade dos serviços, pois o trabalhador se sente mais atraído pelo posto de trabalho, por sua atividade e pelos resultados positivos das tarefas, haja vista a diminuição de queixas tanto em relação às

necessidades individuais quanto a doenças adquiridas nesses ambientes, resultando em uma conseqüente redução de custos operacionais (BAUMAN, 1994).

A iluminação é uma variável do conforto ambiental interno bastante importante na concepção do projeto arquitetônico, pois está intrinsecamente relacionada ao ruído e à temperatura. Afinal, a mesma abertura, seja uma esquadria, ou seja, um elemento vazado, cuja função é o de iluminar, permite concomitantemente a entrada de calor e barulho. Sua importância também está subordinada à questão da economia no consumo de energia elétrica.

Em um relatório do Safety Council dos EUA os peritos avaliaram que 5% de todos os acidentes de trabalho na indústria têm como causa direta a iluminação insuficiente e que o ambiente luminoso e a fadiga visual são participantes na origem de 20% de todos os acidentes.

Como exemplo, pode-se citar a experiência de uma indústria pesada americana, a Allis Chalmers, no início dos anos 50, onde o aumento do nível de iluminação geral de 200 lx em uma linha de montagem provocou uma queda da frequência de acidentes em 32%. Em uma ação mais simples, as paredes e o teto das oficinas foram pintados com cores claras, provocando uma redução dos contrastes e uma melhor dispersão da iluminação; após estas medidas a frequência de acidentes de trabalho na empresa caiu mais 16,5%. Levantamentos semelhantes sobre drásticas reduções de frequências de acidentes foram feitos na Inglaterra e na França, sendo estes estudos realizados em estaleiros, em fundições, em galpões de montagem e em oficinas mecânicas (KROEMER e GRANDJEAN, 2005).

4. Climatização e conforto térmico

Grande parte da população trabalhadora exerce sua atividade em ambientes fechados como escritórios, auditórios, salas de aula, salas de cirurgia, cabinas de aeronaves e navios, etc. Em vista disso, passou-se a ver a climatização como um possível fator de satisfação e aumento de produtividade, pois o conforto térmico é um estado fisiológico sem grande esforço do sistema de termorregulação, que, portanto, fica livre de uma carga extra (SILVA, 2000).

A temperatura do corpo não é, como freqüentemente se pensa, igualmente distribuída em todo o organismo. Uma temperatura constante, no entorno dos 37°C, se encontra no interior do cérebro, do coração e nos órgãos abdominais (temperatura do núcleo). Essa temperatura é necessária para o fluxo normal dos mais importantes processos vitais; fortes e duradouros desvios não são condizentes com seres de sangue quente (KROEMER e GRANDJEAN, 2005).

Segundo este mesmo autor, ao contrário da temperatura do núcleo, a temperatura nos músculos, nos membros e bem especialmente, na pele (temperatura periférica), apresenta oscilações. Análises fisiológicas mostraram que, em ambientes frios, a temperatura da pele pode cair abruptamente. Nesses ambientes, a temperatura pode chegar a 35°C a dois cm abaixo da superfície da pele, enquanto que em ambientes quentes, já em poucos milímetros abaixo da superfície da pele, a temperatura oscila entre 35 e 36°C. Esta capacidade de adaptação da periferia do corpo permite ao homem absorver ou ceder uma carga térmica para todo o corpo de centenas de Watts por metro quadrado.

Com relação ao conforto climático e o seu significado fisiológico, geralmente não se percebe um clima confortável no ambiente, mas se percebe imediatamente um clima não confortável, quanto mais este se distancia daquele (KROEMER e GRANDJEAN, 2005).

A sensação de desconforto pode ser um incômodo ou até um tormento, conforme a intensidade da perturbação do equilíbrio térmico. Este sentimento é uma regulação biológica

importante: ela deve indicar aos animais de sangue quente as medidas necessárias para restabelecer o equilíbrio térmico perturbado. O animal ficará tentado a procurar outro local mais confortável, onde não esteja exposto nem a excessos de calor nem a excessos de frio; o homem pode procurar a adaptação através da vestimenta ou da atividade, bem como com o uso de possibilidades tecnológicas para restaurar seu equilíbrio novamente.

O metabolismo refere-se à energia liberada pela reação química ocorrida entre o oxigênio e o alimento, a qual é proporcional ao esforço realizado pelos músculos, sendo sua unidade de medida W/m^2 , usando também o met que equivale a $58 W/m^2$ (COUTINHO, 1998).

5. Materiais e métodos

Tendo como finalidade verificar a influência da luminosidade e da temperatura durante o processo de montagem dos computadores no laboratório do curso de informática da ETER, optou-se pelo método do planejamento fatorial 2×2 , com três repetições no ponto central mais configuração estrela, utilizando o programa STATISTICA na análise dos resultados, pelo método da superfície de resposta.

Os estudos foram realizados em uma sala com $30m^2$ de área construída por 3m de altura, com a participação de 29 alunos do curso técnico profissionalizante da área de Informática da Escola Técnica Redentorista, os quais desenvolveram a função de montagem e desmontagem em computadores.

Dos 29 alunos que participaram da pesquisa, dez deles realizaram dois experimentos cada um, com diferentes temperaturas e iluminações, perfazendo um total de 39 ensaios. Vale salientar que as duas turmas do curso de informática totalizavam 95 alunos, sendo: 46 do turno da manhã e 49 do turno da tarde. Portanto, a amostra mostrou-se significativa para o estudo, apresentando um percentual de 41,05% do total de alunos. Levando em conta os dez alunos que fizeram novos experimentos, a amostra efetiva é de 29 alunos, representando 30,53% do total de alunos das turmas envolvidas.

O mobiliário do laboratório consistiu em 3 bancadas para acomodação dos computadores e facilitação dos trabalhos dos alunos durante o processo de montagem e desmontagem. Havia 12 lâmpadas fluorescentes instaladas no teto.

A metodologia de estudo consistiu em medir o tempo de montagem dos computadores nos locais de trabalho específicos, os índices de luminosidade no local e as condições térmicas ambientais. Concomitantemente a este estudo, foram aplicados questionários de pesquisa contendo perguntas pertinentes aos índices pessoais de satisfação e insatisfação térmica no momento do experimento. Também foram aplicados questionários relacionados com a motivação pessoal dos alunos no momento da montagem dos computadores.

Quanto à medição de temperatura e da umidade, foram instalados equipamentos para medir constantemente a temperatura e a umidade do ar no local de trabalho durante o experimento. Para isso foram instalados termômetros digitais e um higrômetro digital. Os experimentos foram realizados com a utilização dos seguintes equipamentos: 2 condicionadores de ar modelo BCH10A; 1 luxímetro digital modelo 401025; 1 termo-higrômetro digital; 1 anemômetro de ventoinha; 1 termômetro digital e 3 computadores.

6. Resultados e discussões

Na Tabela 1 verifica-se que, para um limite de confiança de 80% para a variável resposta falha, o modelo estatístico ajusta bem os dados experimentais. O valor de F calculado é 4,55

vezes maior que o F tabelado de regressão, sendo, portanto, estatisticamente significativo e preditivo. A regressão explica 72,22% da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 100,00%. Em relação ao tempo de montagem, para um limite de confiança de 90% o modelo proposto é estatisticamente significativo e preditivo, o valor de F calculado por regressão é 4,75 vezes maior que o tabelado, enquanto a razão de F calculado por F tabelado é igual a 0,0736. A regressão explica 93,53% da variação total em torno da média em relação ao valor máximo explicável de 99,60%.

Variável Resposta	Qualidade do Ajuste R^2 (%)	R	Teste F (Regressão)			Teste F (Falta de Ajuste)		
			Fcalc MQR/MQr	Ftab	Fcal/Ftab	Fcalc MQfaj/MQep	Ftab	Fcal/Ftab
tmont (90%)	93,53	0,967	16,71	3,52	4,75	4,11	55,83	0,0736
Falhas (80%)	72,22	0,850	9,1	2,00	4,55	∞	14,30	-

Tabela 1 - Resultados da análise de regressão: tempo de montagem e falhas

O modelo estatístico para a variável falha é preditivo, sendo aceito para a análise das tendências dos efeitos combinados de iluminação e temperatura. Com essas restrições pode-se apresentar o modelo estatístico codificado para variável resposta *falha*, para um limite de confiança de 80%, que é dado pela equação:

$$\mathbf{FALHAS} = \mathbf{0,771000} - \mathbf{0,282258 * L} + \mathbf{0,165000 * L * T} \quad (1)$$

No caso de tempo de montagem, em que o modelo se apresentou como significativo e preditivo a equação em termos dos fatores codificados é:

$$\mathbf{t(s)} = \mathbf{1202,500s} + \mathbf{129,313T^2} - \mathbf{197,869L} + \mathbf{348,312L^2} - \mathbf{213,250L.T} \quad (2)$$

As variáveis codificadas nas Equações 1 e 2 são:

$$L = \frac{L(\%) - 50\%}{50\%} \quad e \quad T = \frac{T(^{\circ}C) - 23^{\circ}C}{5^{\circ}C}$$

Como consideração final em relação aos modelos estatísticos propostos, pode-se afirmar que as condições ótimas de trabalho previstas pelo modelo coincidem com os resultados obtidos através das respostas ao questionário de satisfação. Isto é, os menores tempos de montagem e com menor número de falhas ocorrem em geral nas condições de temperatura e iluminação nas quais os estudantes manifestaram sensação de conforto.

6.1 Análise dos resultados pelo método de planejamento fatorial

A Tabela 2 contém os valores da Matriz Experimental (Planejamento fatorial $2^2 +$ configuração estrela), contendo 8 experimentos + 2 repetições no ponto central, assim estabelecidos: $2^k + 2 + 4$, em que: no primeiro termo (2^k) o k representa as variáveis controladas durante o experimento que são a iluminação e a temperatura, o segundo termo (2) refere-se às repetições no ponto central, que são 2, e o terceiro termo (+4) refere-se aos experimentos da configuração estrela ($2 \times K$).

ensaios	T(°C)	L (%)	Tempo montagem (s)	falhas
1	-1 (18)	-1 (0)	1578	1,33
2	-1 (18)	1(100)	1539	0,67
3	1 (28)	-1 (0)	2139	0,67
4	1 (28)	1 (100)	1247	0,67
5	-1,4142 (16)	0 (50)	1622	0,67
6	1,4142 (30)	0 (50)	1409	0,67
7	0 (23)	-1,4142 (- 20)	2184 ^(a)	1,41 ^(a)
8	0 (23)	1,4142 (120)	1723 ^(a)	0,28 ^(a)
9	0 (23)	0 (50)	1155	0,67
10	0 (23)	0 (50)	1250	0,67

(a) Valores extrapolados a partir das curvas de tendência, obtidos através da Equação 1, para o tempo de montagem e da Equação 2, para as falhas.

Tabela 2 - Matriz do planejamento fatorial 2^2 + configuração estrela

Estes valores foram previamente adotados de acordo com a matriz proposta e em seguida o laboratório foi preparado de acordo com as intensidades luminosas e as temperaturas estabelecidas em cada ensaio, conforme a Tabela 2.

Devido a limitações experimentais, os experimentos com -20% e +120% de luminosidade não puderam ser realizados. Deste modo, para completar a configuração estrela, os valores das respostas tempo de montagem e número de falhas para esses pontos foram estimados a partir das curvas de tendência, equações 1 e 2.

As análises estatísticas das variáveis respostas obtidas no presente trabalho foram efetuadas para um nível de confiança de 90%.

6.2 Análise quanto às falhas

Verifica-se na Figura 1, para um limite de confiança de 90%, que o único efeito significativo sobre as falhas, é o efeito linear negativo da variável independente luminosidade, ou seja, como esperado, o número de falhas diminui quando a luminosidade aumenta. No entanto, quando o nível de confiança é reduzido para 80%, a interação luminosidade-temperatura aparece também como efeito significativo positivo, conforme se observa na Figura 2; isto é, o efeito do aumento combinado da temperatura e luminosidade provoca um aumento do número de falhas.

Fenomenologicamente, esse efeito pode ser justificado, tendo em vista que o aumento da variável luminosidade faz com que o desempenho na produção melhore devido ao trabalho ser efetuado com uma maior precisão, mas nota-se que o aumento da temperatura conjuntamente com o aumento da luminosidade (interação luminosidade X temperatura), ocorre um aumento no número de falhas.

As legendas apresentadas nas Figuras 1; 2 e 8, são:

(2) L (L)	Linear da luminosidade;
1 L by 2 (L)	Interação da temperatura e luminosidade
1 (T) (L)	Linear da temperatura
L (Q)	Quadrático da luminosidade
T (Q)	Quadrático da temperatura

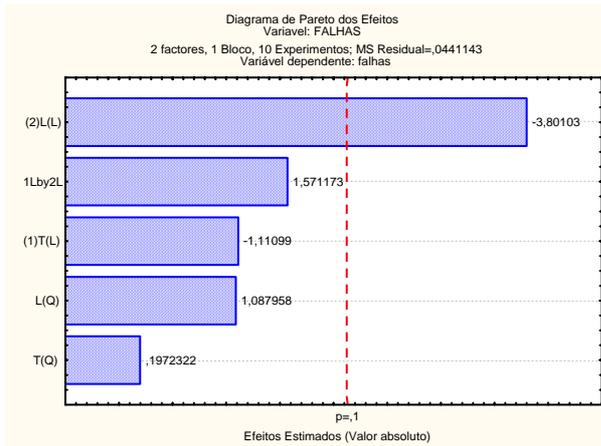


Figura 1 – Diagrama de Pareto dos efeitos sobre as falhas. Nível de confiança de 90%

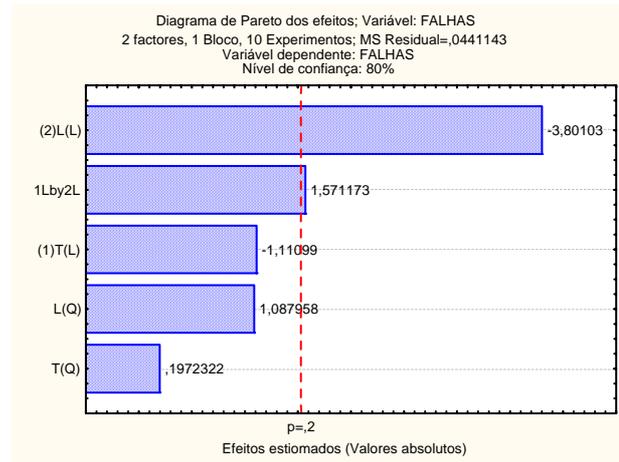


Figura 2 – Diagrama de Pareto dos efeitos sobre as falhas. Nível de confiança de 80%.

Verifica-se na Figuras 3 que os valores observados apresentam pouca dispersão em relação aos valores preditos, o que pode confirmar um bom ajuste do modelo estatístico proposto. Sobre a distribuição de resíduos, mostrada na Figura 4, a dispersão aleatória permite afirmar que os dados não são tendenciosos.

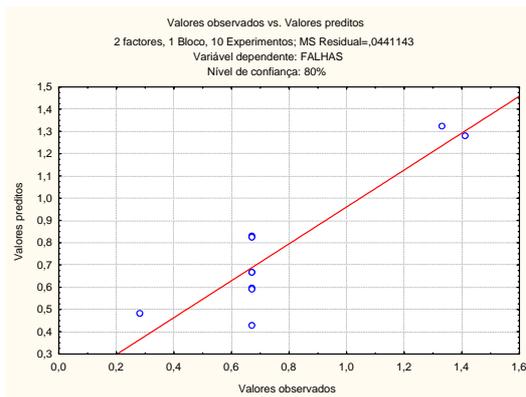


Figura 3 – Valores preditos e observados para as falhas. Nível de confiança de 80%.

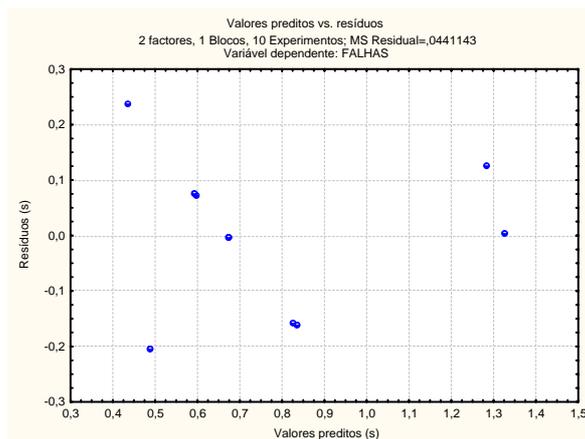


Figura 4 – Distribuição de resíduos para as falhas

Observa-se na Figura 5 a superfície de resposta e na Figura 6 suas curvas de nível, com modelo de 2ª ordem e nível de confiança de 80% para a variável dependente falhas.

Confirma-se, de acordo com estas figuras, que o número de falhas diminui com o aumento da luminosidade, praticamente de forma linear. Quanto à interação com a temperatura, para baixa luminosidade, o aumento da temperatura provoca uma diminuição das falhas, enquanto que, para altos níveis de iluminação, ocorre o inverso: o menor número de falhas se encontra a baixas temperaturas. Já para níveis intermediários de iluminação, a temperatura não afeta o desempenho em termos de falhas. Contrariamente, nas temperaturas elevadas o grau de luminosidade parece não afetar significativamente o número de falhas cometidas.

A explicação para entender estes comportamentos aparentemente contraditórios, deve estar relacionada com o tempo de montagem, já que, maiores tempos, embora indesejáveis com relação à produtividade, poderão conduzir a um menor número de erros na montagem. Efetivamente, no ponto seguinte, onde se discute a resposta tempo de montagem, será observado que os maiores tempos de montagem (da ordem de 3500s a 4000s) correspondem aos casos com temperatura elevada associada a uma baixa luminosidade. Os tempos seguintes

em ordem de grandeza (3000s a 3500 s) são encontrados na situação extrema oposta de baixa temperatura com elevada luminosidade. São justamente estas situações as relacionadas com um menor número de falhas.

É oportuno lembrar que na análise com 90% de confiança, o único efeito estatisticamente significativo foi o decréscimo linear do número de falhas com a luminosidade, não sendo observado efeito da temperatura para esse nível.

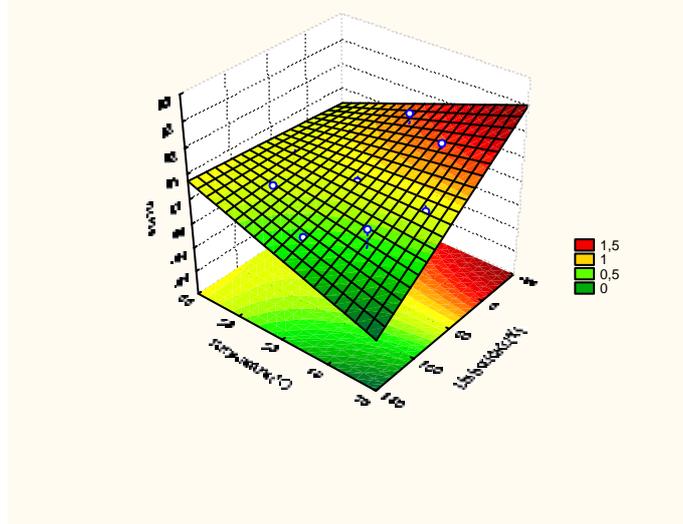
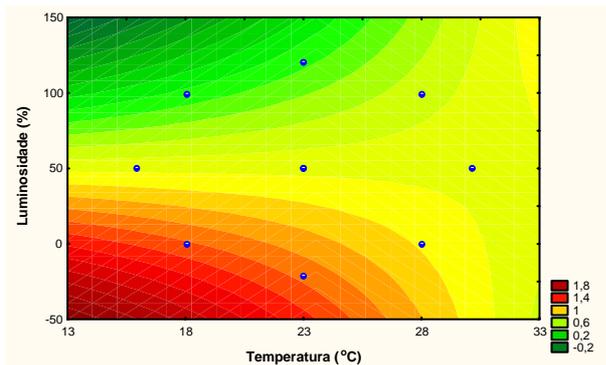


Figura 5 - Superfície de resposta: falhas como função da temperatura e luminosidade. Nível de confiança 80%

Na Figura 7 é representado o modelo linear da superfície de resposta da variável falhas para um nível de confiança de 90%. Como se observa na figura, o número de falhas diminui linearmente com o aumento da porcentagem de luminosidade, para todos os níveis de temperatura, sendo independente desta última variável. O efeito da interação temperatura-luminosidade só é evidenciado quando se diminui o nível de confiança para 80%, como relatado no parágrafo acima.



Figuras 6 – Curvas de níveis da superfície de resposta, para falhas. Nível de confiança de 80%.

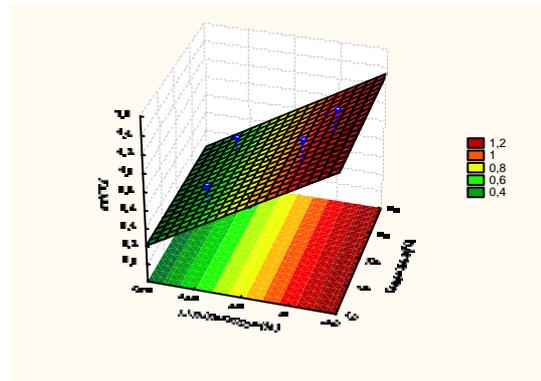


Figura 7 - Superfície de resposta da variável falhas, modelo linear. Nível de confiança de 80%.

6.3 Análise quanto ao tempo de montagem

Verifica-se na Figura 8, diagrama de Pareto, que o efeito principal na variável resposta tempo de montagem é da luminosidade, apresentando um efeito quadrático positivo. Este efeito pode ser justificado haja vista que quanto maior a luminosidade, maior o critério de avaliação da qualidade do produto, o que comprova a redução das falhas mostradas anteriormente. Por

outro lado, observa-se também um efeito interativo linear das variáveis independentes: temperatura e luminosidade e efeito quadrático da temperatura, confirmando a existência de um ponto de ótimo, relacionado com a região de conforto térmico. Neste diagrama e nas análises subseqüentes o efeito linear da temperatura foi eliminado, devido a não ser significativo com um nível de 90% de confiança.

Na Figura 9 observa-se a dispersão dos valores experimentais com os preditos pelo modelo estatístico, indicando uma boa qualidade do ajuste. A distribuição de resíduos mostrada na Figura 10 tem caráter aleatório em torno do zero, confirmando desse modo a validade do modelo quadrático proposto.

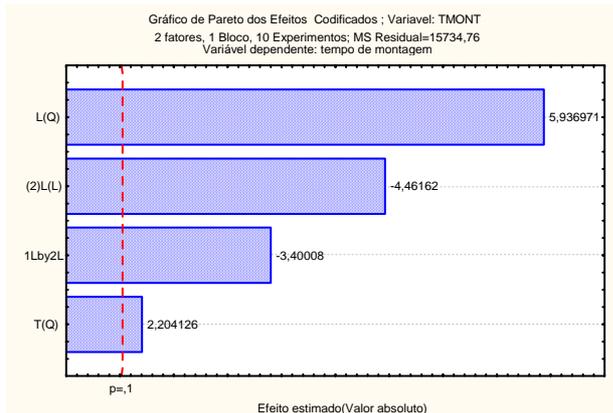


Figura 8 – Diagrama de Pareto dos efeitos para variável resposta: tempo de montagem. Nível de confiança 90%.

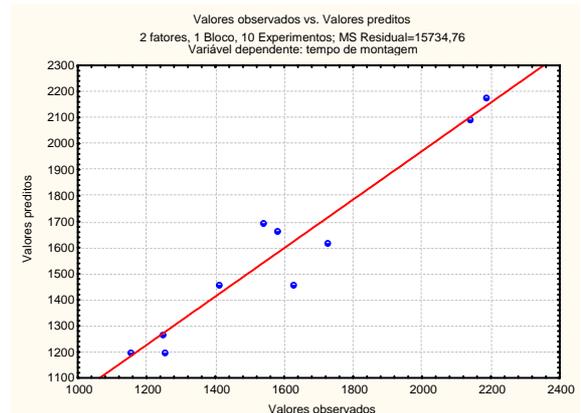


Figura 9 – Valores preditos e observados para o tempo de montagem

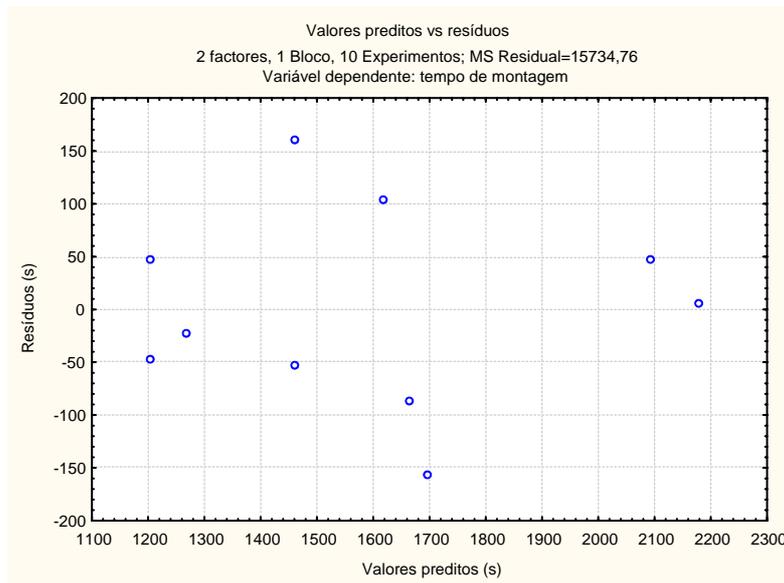
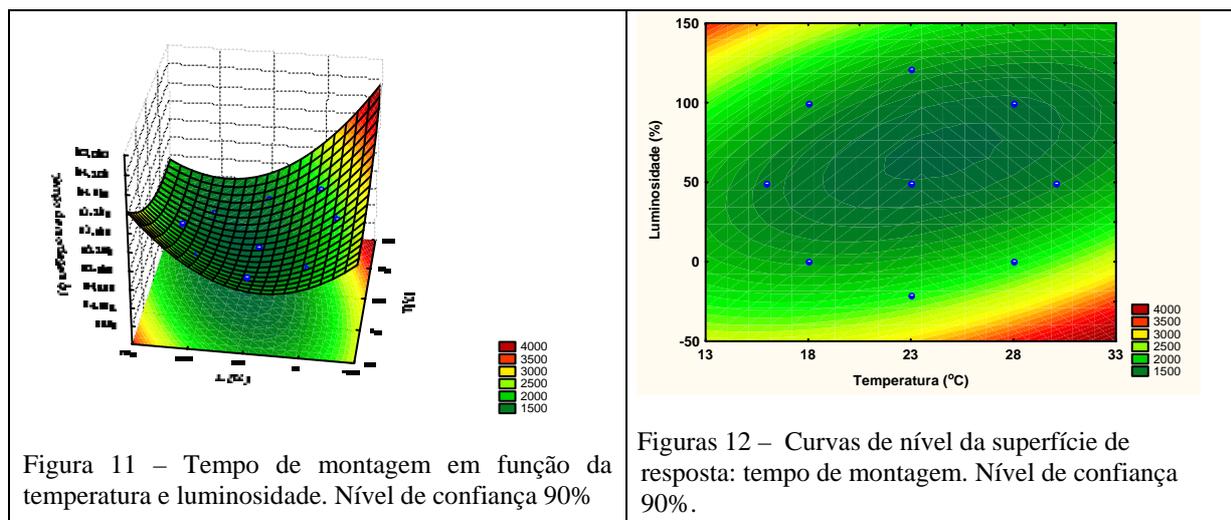


Figura 10 – Distribuição de resíduos para o tempo de montagem. Nível de confiança de 90%.

As Figuras 11 e 12 apresentam, respectivamente a superfície de resposta e as curvas de nível do tempo de montagem em função das variáveis independentes temperatura e luminosidade. Nestas figuras observa-se claramente a presença de um valor mínimo no tempo de montagem, de 1.500s, na região próxima do ponto central (0,0) que corresponde à temperatura entre 23°C e 25°C e luminosidade na faixa de 50% a 75% de lâmpadas acessas. Conforme as figuras citadas, o modelo prediz que os maiores tempos de montagem correspondem aos extremos de temperatura elevada associada à baixa luminosidade, bem como temperaturas baixas, mesmo

que com alta iluminação. Mais uma vez pode-se apreciar a boa qualidade do modelo através da proximidade dos pontos experimentais com a superfície ajustada.



7. CONCLUSÃO

Observou-se que alguns alunos apresentaram maior habilidade para desenvolver esta atividade, enquanto outros não apresentaram um bom desempenho, o que resultou em uma interferência significativa no processo produtivo. Possivelmente estas diferenças individuais estão relacionadas a fatores subjetivos, tais como motivação pessoal, destreza, etc.

De acordo com os resultados obtidos durante os ensaios para a elaboração deste trabalho, pode-se inferir que existe uma tendência de relação entre a variação de iluminação e os números de falhas encontrados durante a montagem dos computadores.

Comparando os resultados de outros autores com a pesquisa realizada, pode-se afirmar que os alunos da Escola Técnica Redentorista também se sentiram incomodados durante o processo de montagem dos computadores no momento em que as temperaturas se aproximavam de 30°C. Em compensação, a mesma sensação de desconforto foi apresentada quando as temperaturas se encontravam próximas de 16°C.

É importante ressaltar que nos estudos realizados, as análises estatísticas recaíram sobre duas variáveis simultaneamente: a iluminação e a temperatura; ou seja, não foi proposta a análise destas variáveis de forma isolada, uma vez que ambas apresentaram influência significativa quando comparadas simultaneamente.

Os estudos comprovaram que existe uma condição ótima de trabalho relacionado ao tempo de montagem, observando-se nitidamente a presença de um mínimo em torno de 65% de iluminação. A esse mínimo corresponde uma média de 1500 segundos para a montagem dos computadores. Do mesmo modo, esta mesma observação foi constatada quando se analisou a relação entre o tempo de montagem e a temperatura do ar, em torno de 23 °C. Nessa temperatura, os alunos requereram em média 1500 segundos para montar os computadores, para os diferentes níveis de iluminação utilizados.

Seria mais interessante, no futuro próximo, realizar experimentos adimensionalizados, ou seja, referenciar os experimentos com a destreza do aluno e realizar novos trabalhos tomando uma amostra maior.

Outra sugestão seria realizar pesquisas com a finalidade de encontrar os índices de conforto térmico sugeridos nas regiões brasileiras e compará-los com os índices encontrados por Fanger e pela norma ISO 7730.

Referências

- AKHNAZAROVA, S. L., KAFAROV, V. V. *Experiment optimization in chemistry and chemical engineering*. Moscow: Mir, 1982, 312p.
- ALMEIDA, Marcello Maia de, *Secagem de fatias e pedaços cúbicos de goiaba (psidium guajava l.)*, 2004. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia de Processos, área de concentração Desenvolvimento de Processos). Universidade Federal de Campina Grande – PB, UFCG, Campina Grande - PB, 2004.
- BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. *Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria*. Campinas – SP, Editora da Unicamp, 2001, 401p.
- BAUMAN, Fred S. P. E., *Giving occupants what they want: guidelines for implementing personal environmental control in your building*. World workplace 99, October 3-5, Los Angeles, CA, 1999.
- BOX, G. E. P., HUNTER, J. H. e HUNTER, W. G. *Statistics for experimenters – an introduction to desing, data analysis and model bilding*. New York, John Wiley & Sons, 1978, 653p.
- CARPINETTI, L. C. R. *Planejamento de experimentos*. São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, 1996. v.1.
- COSTA, Gilberto José Corrêa da, *Iluminação econômica: cálculo e avaliação*. 2ª Ed. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2000. 503p.
- COUTINHO, Antônio Souto. *Conforto e insalubridade térmica em ambientes de trabalho*. João Pessoa – PB, Edições PPGE, 1998, 215p.
- KROEMER, Karl H. E; GRANDJEAN, Etienne. *Manual de ergonomia: adaptando o trabalho ao homem*. 5ª ed. Porto Alegre - RS. Editora Bookman, 2005, 328p.
- SILVA, Luiz Bueno da. *Análise da relação entre produtividade e conforto térmico: o caso dos digitadores do Centro de Processamento Dados da Caixa Econômica Federal de Pernambuco*. 2001. 171p. Tese (Doutorado em Engenharia de Produção, área de concentração em Ergonomia). Universidade Federal de Santa Catarina. CCPGEP da UFSc, Florianópolis - SC, 2001. 171 p.
- SILVA, Reinaldo Oliveira da, *Teorias da Administração*. Editora Pioneira Thomson Learning, São Paulo – SP, 2002, 523p.