

APLICABILIDADE DE MODELOS DE REGRESSÃO LINEAR SIMPLES E MÚLTIPLA EM AVALIAÇÕES TÉRMICAS DE AMBIENTES DE TRABALHO

Pablo Adamoglu de Oliveira

Universidade Federal da Paraíba (UFPB). E-mail: pablo_oliveira@msn.com

Luiz Bueno da Silva

Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Departamento de Engenharia de Produção (DEP).
Centro de Tecnologia – Campus I, Cidade Universitária, CEP: 58051-970, João Pessoa (PB).
E-mail: bueno@producao.ct.ufpb.br

Antonio Souto Coutinho

Universidade Federal da Paraíba (UFPB) – Departamento de Engenharia de Produção (DEP).
Centro de Tecnologia – Campus I, Cidade Universitária, CEP: 58051-970, João Pessoa (PB).
E-mail: coutinho@producao.ct.ufpb.br

Resumo. *Um problema de grande importância no estudo de variáveis térmicas que possuem distribuição normal é a análise simultânea entre elas, com a finalidade de averiguar se existe alguma correlação significativa entre as mesmas ou de investigar a possibilidade de se fazer previsões a respeito dos valores de uma das variáveis correlacionadas, com base no conhecimento dos valores das outras. Este trabalho propôs-se a estudar os modelos de regressão linear simples e múltipla a fim de aplicá-los em pesquisas realizadas sobre o conforto térmico de ambientes, contribuindo assim para a compreensão das possíveis necessidades de refrigeração, aquecimento ou ventilação para um ambiente de trabalho. Inicialmente, partiu-se da pesquisa bibliográfica, seguida da pesquisa de campo, coleta de dados e tratamento matemático-estatístico destes em software específico. Por fim, procedeu-se à análise dos dados coletados e construção dos modelos de regressão, utilizando-se os testes t e F para verificar a consistência dos modelos e de seus parâmetros, bem como à estruturação de conclusões baseadas nas informações colhidas e na significância dos modelos matemáticos equacionados.*

Palavras-chave: *modelos de regressão, avaliação térmica, ambiente de trabalho.*

1. INTRODUÇÃO

A avaliação do conforto térmico em ambientes de trabalho é uma área pouco explorada por pesquisadores e cientistas brasileiros, razão pela qual a literatura técnica sobre este assunto é escassa (Gouvêa et al, 2003). Mesmo com a existência de trabalhos que geraram contribuições relevantes para este campo, tais como aqueles desenvolvidos por Araújo (1996), Gonçalves (2000), Xavier (2000) e Hackenberg (2000), todos citados e comentados por Gouvêa et al (2003), ainda não se dispõem de normas aplicadas especificamente à realidade brasileira; desta maneira as avaliações realizadas têm sido baseadas em normas e procedimentos desenvolvidos em outros países, cujas condições térmicas, ambientais, e de vestimentas são, em geral, diferentes daquelas aqui existentes.

O conforto térmico é função de diversas variáveis que atuam simultaneamente. Tem-se constatado a necessidade de se estabelecer relações que possibilitem predizer uma ou mais variáveis

em termos de outras, e de se conhecer a relação entre essas variáveis. A utilização de modelos matemático-estatísticos em tais avaliações poderá colaborar para uma melhor compreensão das influências de variáveis térmicas, contribuindo para a ampliação de conhecimentos na área de projetos e avaliações térmicas de ambientes inseridos na realidade brasileira. Assim, neste artigo, através de uma análise de regressão linear, determinou-se a temperatura interna de conforto para um ambiente de trabalho, levando-se em consideração os votos das sensações térmicas das pessoas em diversos horários, em comparação com a temperatura operativa verificada nos respectivos horários.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Pretende-se nesta seção introduzir, brevemente, a fundamentação teórica e os métodos matemático-estatísticos básicos de utilização de dados emparelhados com o intuito de avaliar a relação entre duas variáveis correspondentes.

2.1. Modelos de Regressão Linear

Dada uma coleção de dados amostrais emparelhados, o modelo de regressão linear simples (MRLS), apresentado por Charnet et al (1999), descreve a relação entre as duas variáveis envolvidas no estudo, e pode ser assim sumarizado pela Eq. (1):

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_i + \varepsilon_i \quad (1)$$

com β_0 , β_1 e x_i constantes; $E[\varepsilon_i] = 0$; $\text{Var}[\varepsilon_i] = \sigma^2$; $\text{Cov}[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = 0$, para $i \neq j$ e $i, j = 1, \dots, n$.

Quando a condição do modelo de probabilidade do erro é a normalidade, o modelo de regressão linear simples amostral correspondente adota a Eq. (1) sujeita às seguintes restrições: com β_0 , β_1 e x_i constantes; $\varepsilon_i \sim N(0; \sigma^2)$; $\text{Cov}[\varepsilon_i, \varepsilon_j] = 0$ para $i \neq j$ e $i, j = 1, \dots, n$. Convém enfatizar que a utilização de dados amostrais emparelhados é destinada à estimação da reta de regressão. Dispondo-se apenas de dados amostrais, não é possível determinar os valores exatos dos parâmetros populacionais β_0 e β_1 . Contudo, de posse desses dados, pode-se obter inferências utilizando os estimadores de quadrados mínimos b_0 e b_1 , comentados por Triola (1999) e ilustrados nas Eq. (2) e Eq. (3), a saber:

$$b_0 = \frac{(\sum y) \cdot (\sum x^2) - (\sum x) \cdot (\sum x \cdot y)}{n \cdot (\sum x^2) - \sum (x)^2} \quad (2)$$

$$b_1 = \frac{n \cdot \sum x \cdot y - (\sum x) \cdot (\sum y)}{n \cdot (\sum x^2) - \sum (x)^2} \quad (3)$$

os quais representam o intercepto em y e o coeficiente angular, respectivamente, da reta de regressão abaixo representada pela Eq. (4):

$$\hat{y}_i = b_0 + b_1 \cdot x_i \quad (4)$$

Adicionalmente, neste contexto, Triola (1999) define variação marginal como a quantidade em que uma variável muda quando a outra sofre uma variação de exatamente uma unidade. Uma análise de correlação e regressão linear de dados bivariados deve incluir uma investigação acerca dos pontos extremos e pontos de influência. Em um diagrama de dispersão, um ponto extremo é um ponto que está muito afastado dos demais. Por sua vez, os dados amostrais emparelhados podem

conter um ou mais pontos de influência, que são pontos capazes de afetar fortemente o gráfico da reta de regressão.

Ao considerar-se o modelo de regressão linear simples (MRLS), é válida a seguinte relação, expressa pela Eq. (5):

$$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (5)$$

Essa expressão indica que a variação total de y em torno de sua média \bar{y} pode ser tomada como a soma da variação de y em torno da reta de regressão com a variação das esperanças específicas de y , dado x , em torno de sua média \bar{y} . A Equação (5) provê o fundamento para o conceito de coeficiente de determinação r^2 , $0 \leq r^2 \leq 1$, que é o valor da variação de y explicado pela reta de regressão, encontrado por intermédio da Eq. (6) (Triola, 1999):

$$r^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (6)$$

Conforme Charnet et al (1999) e Ragsdale (2001), o modelo de regressão linear múltipla descreve a variável de interesse Y como uma soma de parte determinística e parte aleatória, sendo a parte determinística mais geral, de forma que se pode expressar o valor esperado de Y de duas maneiras, a saber: (1) como função de várias variáveis regressoras e (2) como função de polinômio de maior grau de uma única variável regressora.

As suposições sobre a variável erro (ε) são as mesmas definidas anteriormente para o modelo de regressão linear simples. Será comentada simplificadaamente a fundamentação teórica para os casos acima expostos. Inicialmente, tome-se o modelo polinomial com uma variável regressora, que pode ser escrito segundo a Eq. (7):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x + \dots + \beta_k \cdot x^k + \varepsilon, \text{ com } \varepsilon \sim N(0; \sigma^2) \quad (7)$$

onde x é o valor fixo da variável regressora X . Os parâmetros $\beta_0, \beta_1, \dots, \beta_k$ são os coeficientes do polinômio de grau k , que define a esperança de Y , para X fixo. O modelo de hiperplano com três variáveis regressoras é estruturado conforme a Eq. (8):

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_3 + \varepsilon, \text{ com } \varepsilon \sim N(0; \sigma^2) \quad (8)$$

Nesse modelo, x_j é o valor fixo da variável regressora X_j , para $j = 1, 2$ e 3 ; e os parâmetros β_1, β_2 e β_3 são os coeficientes de regressão parciais. Por fim, o modelo de duas variáveis regressoras e interação é aquele estruturado conforme a seguinte lei de formação, Eq. (9), abaixo:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_3 \cdot x_1 \cdot x_3 + \varepsilon, \text{ com } \varepsilon \sim N(0; \sigma^2) \quad (9)$$

para x_i como valor fixo da variável regressora X_i , $i = 1$ e 2 .

Por fim, são empregadas as estatísticas de testes t e F no intuito de se verificar a consistência e significância de modelos e seus respectivos parâmetros. Snedecor e Cochran (1989) apud Charnet et al (1999) acrescentam que para a consideração em que as populações X e Y têm distribuição

normal bivariada, pode-se testar as hipóteses: $H_0 : \rho = 0$ versus $H_1 : \rho \neq 0$, usando a estatística ilustrada na Eq. (10), a saber:

$$t = \frac{r \cdot \sqrt{n-2}}{\sqrt{1-r^2}} \quad (10)$$

sendo que H_0 tem distribuição t de Student com $(n-2)$ graus de liberdade, n é o tamanho da amostra, r é o coeficiente de correlação e r^2 o coeficiente de determinação.

Magalhães e Lima (2002) afirmam que no estudo da dispersão dos valores de duas populações $X \sim N(\mu_x, \sigma_x^2)$ e $Y \sim N(\mu_y, \sigma_y^2)$, através de suas variâncias, utiliza-se a quantidade F , Eq. (11), a fim de se testar as hipóteses: $H_0 : \sigma_x^2 = \sigma_y^2$ versus $H_1 : \sigma_x^2 \neq \sigma_y^2$. Assim a quantidade F , abaixo explicitada encontra-se baseada nas amostras obtidas das populações de interesse, cujas variâncias estão sendo comparadas. Logo:

$$F = \frac{S_x^2}{S_y^2} \quad (11)$$

sendo S_x^2 e S_y^2 as variâncias amostrais das populações X e Y , respectivamente. Sob a hipótese H_0 , sabe-se que F segue o modelo de Fisher-Snedecor, que é caracterizado pelos graus de liberdade associados às quantidades presentes no numerador e no denominador da Eq. (11), no caso, $n_1 - 1$ e $n_2 - 1$, respectivamente.

2.2. Conforto Térmico

Coutinho (1998) define conforto térmico como “um estado de espírito que reflete satisfação com o ambiente térmico no qual a pessoa está inserida”. Entre os anos 1970 e 1986, pesquisas comprovaram que o conforto térmico está estritamente relacionado com o equilíbrio térmico do corpo humano, e que esse equilíbrio é influenciado por fatores ambientais e pessoais (Ruas, 1999).

Várias pesquisas realizadas em laboratório e em campo têm sido desenvolvidas para verificar a relação entre o conforto térmico e o desempenho da pessoa (Fanger, 1970). Embora não tenham chegado a uma conclusão definitiva, elas mostram a tendência de o desconforto proporcionado por ambientes quentes ou frios reduzir o referido desempenho (Xavier, 1999).

Consoante (Fanger, 1970), a primeira condição para que um ser humano esteja em conforto térmico é que ele se encontre em balanço térmico. De acordo com a ASHRAE (1997) - American Society of Heating and Air-Conditioning Engineers - esse balanço pode ser representado pela Eq. (12), onde todas as parcelas têm a unidade $[W/m^2]$.

$$M - W = Q_{SK} + Q_{RES} + S_C = (C + R + E_{SK}) + (C_{RES} + E_{RES}) + (S_{SK} + S_{BC}) \quad (12)$$

onde:

M = Taxa metabólica de geração de calor por unidade de área;

W = Taxa de energia externa dispendida, por unidade de área;

Q_{SK} = Taxa de transferência de calor, por unidade de área, ocorrida na pele;

Q_{RES} = Taxa de transferência de calor, por unidade de área, através da respiração;

C = Taxa de transferência de calor, por unidade de área, devida a convecção na pele;

R = Taxa total de transferência de calor, por unidade de área, devida à radiação na pele;

E_{SK} = Taxa de perda de calor, por unidade de área, devida à evaporação na pele;

C_{RES} = Taxa de transferência de calor, por unidade de área, devida à convecção através da respiração;

E_{RES} = Taxa de transferência de calor, por unidade de área, devida a evaporação na respiração;

S_C = Taxa total de armazenagem de calor, por unidade de área;

S_{SK} = Taxa de armazenagem de calor, por unidade de área, ocorrida na pele;

S_{BC} = Taxa de armazenagem de calor, por unidade de área, ocorrida no centro do corpo.

Como se frisou, todas as parcelas constantes do balanço térmico são dadas em Watt por metro quadrado de superfície do corpo. Essa unidade se baseia na área Dubois (A_{DU}), assim representada pela Eq. (13) (ASHRAE, 1997):

$$A_{DU} = 0,202 \cdot m^{0,426} \cdot l^{0,726} \quad (13)$$

onde:

m = Massa, em [kg], e l = Altura, em [m].

A temperatura interna do corpo humano é controlada pelo sistema de termorregulação, que facilita ou dificulta a rejeição de calor, pela dilatação ou constrição dos vasos sanguíneos periféricos, pela sudorese ou pelo tiritar. Dessa maneira, pode-se afirmar que fora de uma determinada faixa de conforto, o balanço térmico é obtido às custas de esforço do organismo. Nessas ocasiões, as pessoas sentem-se mais quentes ou mais frias. Todavia, essa sensação varia de um indivíduo para outro, haja vista a subjetividade pessoal, conforme comentada por Fanger (1970).

Tal fato levou este pesquisador a definir um índice denominado PMV (Predicted Mean Vote), que é função do balanço térmico e da opinião de uma população estatisticamente representativa, conforme representado matematicamente pela Eq. (14):

$$\begin{aligned} PMV = & \left(0,303e^{-0,036M} + 0,028 \right) \cdot \left\{ (M - W) - 3,05 \times 10^{-3} \cdot [5733 - 6,99 \cdot (M - W) - p_v] \right\} - \\ & - 0,42 \cdot [(M - W) - 58,15] - \left[1,7 \cdot 10^{-5} \cdot M \cdot (5867 - p_v) \right] - \left[0,0014 \cdot M \cdot (34 - t_{bs}) \right] - \\ & - \left\{ 3,96 \cdot 10^{-8} \cdot f_{cl} \cdot \left[(t_{cl} + 273)^4 - (t_{rm} + 273)^4 \right] \right\} - \left[f_{cl} \cdot h_c \cdot (t_{cl} - t_{bs}) \right] \end{aligned} \quad (14)$$

onde M e W foram anteriormente definidos, restando por explicitar:

p_v = Pressão parcial de vapor de água, em [kPa] ;

t_{bs} = Temperatura de bulbo seco, em [°C];

t_{cl} = Temperatura das vestes, em [°C];

t_{rm} = Temperatura radiante média, em [°C];

h_c = Coeficiente de convecção, em [W/m²·°C];

f_{cl} = Relação adimensional entre a área do corpo vestida para a área do corpo sem roupa.

Esse índice é representado por uma escala em que cada valor corresponde a uma certa sensação térmica (S), assim especificada: -3 = muito frio; -2 = frio; -1 = levemente frio; 0 = neutralidade; +1 = levemente quente; +2 = quente; +3 = muito quente.

Naturalmente, verificou-se que a cada sensação térmica correspondia um determinado número de pessoas com ela insatisfeita. Essa situação foi representada por outro índice, denominado *PPD* (Predicted Percentage of Dissatisfied), conforme a Eq. (15):

$$PPD = 100 - 95 \cdot e^{-\left(0,03353 \cdot PMV^2 + 0,2179 \cdot PMV^2\right)} \quad (15)$$

Os dois índices apresentados são adotados pela norma ISO 7730/94, para avaliação de conforto em ambientes termicamente moderados. Ainda no contexto dessa avaliação, importa mencionar a definição de temperatura operativa (t_{op}), que, conforme a ASHRAE (1992), é conceituada como a temperatura uniforme de um ambiente imaginário no qual uma pessoa troca a mesma quantidade de calor sensível (por convecção ou radiação) como em um ambiente real, calculada por intermédio do emprego da Eq. (16), abaixo. Todas as variáveis nela presente foram previamente definidas, exceto h_r , o qual corresponde ao coeficiente de radiação, dado na mesma unidade de h_c . Logo:

$$t_{op} = \frac{h_r \cdot t_{rm} + h_c \cdot t_{bs}}{h_c + h_r} \quad (16)$$

A ASHRAE (1997) relaciona cinco fatores importantes que contribuem para o desconforto localizado, a saber:

- a) Assimetria de radiação térmica: causadas por superfícies de janelas, outras superfícies não isoladas, bocas de forno, máquinas e outros;
- b) Correntes de ar indesejáveis;
- c) Diferenças de temperatura do ar no sentido vertical: Olesen, McNair e Erikson apud ASHRAE (1997), relataram que se a temperatura ao nível da cabeça for inferior àquela ao nível do tornozelo, é provável que não haja desconforto térmico; nessas condições, as pessoas têm se mostrado mais tolerantes;
- d) Contatos com pisos quentes ou frios;
- e) Fatores fisiológicos, psicofísicos, físicos e comportamentais, que são inerentes, respectivamente, ao organismo humano, à relação estímulo-resposta, aos processos de transferência de calor na pessoa e a interação do homem com o meio ambiente.

3. METODOLOGIA

A metodologia utilizada teve dois suportes fundamentais: a) Teórico: Tabachnick e Fidel (1989), Levine, Berenson e Stephan (2000), Charnet et al (1999) e Ragsdale (2001); e b) Experimental: Statistica versão 5.0 – análises de estatística descritiva e de regressão linear; Excel versão 7.0 – teste de normalidade de Bera-Jarque. Essa metodologia constou do desenvolvimento das seguintes tarefas:

- a) Avaliar as condições climáticas no ambiente de trabalho de um setor bancário da cidade de Recife (PE), utilizando equipamentos do Laboratório de Análise do Trabalho (LAT) do Departamento de Engenharia de Produção (DEP) da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), que atendem às exigências da Norma ISO-DIS 7726/1996 (Ergonomics of The Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities). Questionários foram distribuídos com todas as pessoas participantes da pesquisa, para registrarem as respectivas opiniões sobre sensação térmica,

tipo de roupa utilizada e dados pessoais, conforme a Norma ISO 10551/1995 (Subjective Judgment Scales).

b) Verificar, através das medidas de BOX-COX, a normalidade das amostras coletadas no ambiente estudado. Trata-se de um teste de normalidade de Bera-Jarque, o qual é uma consequência do estudo feito por Shenton e Bowman em 1977, o qual é construído com as expressões para assimetria e curtose, de acordo com a Eq. (17):

$$N \left[\frac{\sqrt{b_1^2}}{6} + \frac{(b_2 - 3)^2}{24} \right] \approx \chi^2 \quad (17)$$

onde:

$$\sqrt{b_1^2} = \text{Assimetria}; \quad b_2 = \text{Curtose} \quad \text{e} \quad \chi^2 = \text{Qui-quadrado}.$$

Quando b_1 e b_2 são grandes, a expressão acima também é, e, por sua vez, maior que o Qui-quadrado (χ^2) tabelado. Ou seja, se o teste aplicado às variáveis coletadas ultrapassar o valor de 5,91, que representa 2 graus de liberdade e uma frequência de 0,95 na tabela do Qui-quadrado, a amostra relativa à variável testada não obedecerá a uma curva normal.

c) Construir um modelo de regressão linear. Segundo Tabachnick e Fidel (1989), Levine, Berenson e Stephan (2000), Charnet et al (1999) e Ragsdale (2001), o modelo geral de uma equação linear pode ser expresso como uma variável dependente (VD) em função de um conjunto de variáveis independentes (VI), ou seja, pode-se expressar o valor esperado da variável dependente (VD) como função de várias variáveis regressoras (VI). Desta forma, utilizou-se um modelo, Eq. (18), baseado na já citada Eq. (1), agora apresentando o seguinte formato e incorporando os respectivos significados a cada um dos seus elementos constitutivos, a saber:

$$y_p = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \varepsilon \quad (18)$$

onde:

y_p = Variável dependente (S – sensação térmica) predita pela variável de conforto térmico;

β_0 = Constante de regressão ou intercepto;

β_1 = Coeficiente parcial ou parâmetro da regressão para a variável x_1 ;

x_1 = Temperatura operativa em $[^\circ \text{C}]$;

ε = Erro ou resíduo devido ao modelo de regressão (estatístico e não-determinístico).

d) Verificar através dos testes t e F a consistência da equação e de seus parâmetros;

e) Determinar a temperatura interna de conforto térmico para o ambiente estudado segundo a percepção das pessoas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

No ambiente de trabalho estudado são realizadas atividades de operações bancárias, ou seja, atividade sedentária e vestimentas leves. Durante três dias foram coletados 5496 dados inerentes às variáveis climáticas I_{cl} (resistência térmica das vestes), M , t_{bs} , t_{rm} , t_{bu} , V_{ar} (velocidade do ar), UR (umidade relativa do ar em percentual) e t_{op} ; e pessoais, como S (sensação térmica), Idade,

Altura e Peso. Importa ressaltar que as unidades atribuídas às variáveis I_{cl} e V_{ar} são respectivamente $[clo = 0,155 \text{ m}^2 \cdot ^\circ\text{C/W}]$ e $[\text{m/s}]$. A temperatura interna de conforto determinada a partir desses dados coletados foi obtida levando-se em consideração os votos das sensações fornecidas pelas pessoas nos diversos horários, em comparação a temperatura operativa (t_{op}) verificada nos respectivos horários.

Por outro lado, vale salientar que neste experimento não foi preciso utilizar a regressão múltipla, haja vista que o modelo proposto envolveu apenas uma VD (S) e uma VI (t_{op}). Importa enfatizar que se poderia tentar escrever, por exemplo, VD (PROD) em função das variáveis explicitadas acima e das variáveis psicológicas, para mostrar em estudos futuros a implicação destas na variabilidade da produtividade (PROD) das pessoas. Tal constatação contribuiria para a maximização da qualidade do ambiente de trabalho com consequência na produtividade.

Dando sequência às etapas propostas, verificou-se através das medidas de BOX-COX a normalidade das variáveis acima, de acordo com a Eq. (17), conforme pode ser visto na Tab. (1) abaixo.

Tabela 1. Valores experimentais dos coeficientes (Distorção, Curtose e Bera-Jarque) relativos a cada uma das variáveis envolvidas no espaço amostral

| Coeficientes | I_{cl} | t_{bs} | t_{bu} | t_{rm} | V_{ar} | UR | t_{op} | Idade | Altura | Peso | S |
|-----------------|----------|----------|----------|----------|----------|--------|----------|-------|--------|-------|-------|
| Coef. Distorção | -0,79083 | 1,015 | 2,408 | 0,7473 | 2,796 | 3,0206 | 0,9448 | 0,744 | 9,882 | 0,718 | 0,02 |
| Coef. Curtose | 1,366008 | -0,4 | 5,357 | 0,062 | 7,964 | 8,3185 | -0,113 | -0,18 | 96,17 | 0,173 | -0,72 |
| Bera-Jarque | 0,209554 | 0,176 | 1,597 | 0,1247 | 3,109 | 3,3867 | 0,158 | 0,125 | 387 | 0,121 | 0,02 |

Os testes t e F mostraram que a consistência do modelo como também dos seus parâmetros foram altamente significativos ($p\text{-level} = 0,00000$, para $\alpha = 0,05$).

Através da análise de regressão linear e a sua respectiva reta de ajuste, obteve-se uma equação de regressão para o cálculo da sensação em função da temperatura operativa (t_{op}). Para a situação plena de conforto térmico, isto é $S = 0$, a temperatura determinada pela equação é considerada a temperatura interna de conforto. A Figura (1), a seguir, ilustra esta análise, como também expressa o modelo e a temperatura ideal segundo a percepção térmica das pessoas.

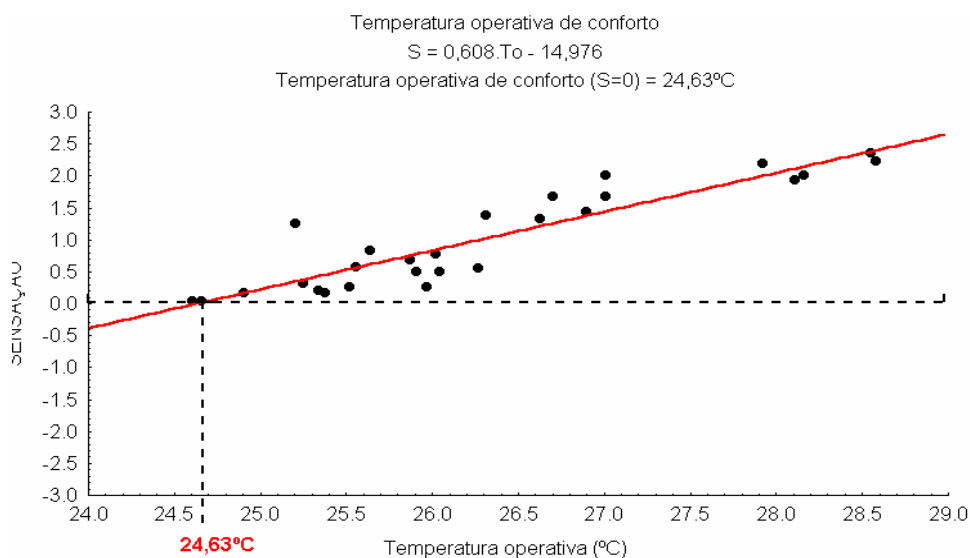


Figura 1. Reta de regressão entre as temperaturas operativas e as respectivas sensações relatadas pelas pessoas

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Observa-se na Fig. (1) que o valor de r^2 se aproxima de 1, tendo em vista que os pontos estão no entorno da reta de regressão. Tal afirmação demonstra que os modelos de regressão podem prever um valor de resposta com base nos valores de pelo menos uma variável independente ou explicativa. Neste trabalho, determinou-se, a partir dos dados experimentais, a Eq. (19):

$$S = -14,976 + 0,608 \cdot t_{op} \quad (19)$$

e, para $S = 0$, situação de conforto térmico, chegou-se à conclusão que a temperatura ideal para as pessoas que exercem suas atividades nesse ambiente de trabalho é de 24,63°C. Ou seja, pode-se através desse modelo de regressão, levando-se em consideração o significativo número de dados coletados, obter satisfação térmica e otimização de energia nos próximos ambientes projetados para realização de atividades em ambientes informatizados ou similares àquelas do ambiente estudado.

Dado o exposto, depreende-se que a aplicação de modelos de regressão linear às variáveis envolvidas na avaliação térmica de ambientes de trabalho informatizados representa uma contribuição para a percepção, em especial do projetista de ambientes e instalações, de possíveis necessidades de climatização, aquecimento ou ventilação dos mesmos a fim de se atingir as condições de conforto, determinadas a partir dos resultados gerados pelos referidos modelos e respaldadas pelas normas regulamentadoras nacionais e internacionais.

6. REFERÊNCIAS

- ASHRAE, 1992, “Thermal Environmental Conditions for Human Occupancy”, ANSI/ASHRAE Standard 55, Atlanta, GA 30329, ISSN 1041-2336.
- ASHRAE, 1997, “Fundamentals Thermal Comfort”, ASHRAE Handbook – Fundamentals, Atlanta, Georgia, chapter 8.
- Charnet, R. et al, 1999, “Análise de Modelos de Regressão Linear com Aplicações”, Campinas, São Paulo, Unicamp, 356p.
- Coutinho, A.S., 1998, “Conforto e Insalubridade Térmica em Ambientes de Trabalho”, João Pessoa (PB), Edições PPGE e Editora Universitária/UFPB, 210 p.
- Fanger, P.O., 1970, “Thermal Comfort – Analysis and Applications in Environmental Engineering”, United States, McGraw-Hill Book Company, 244 p.
- Gouvêa, T.C. et al, 2003, “Avaliação do Conforto Térmico: Uma Experiência de Campo”, In: VII Encontro Nacional de Conforto no Ambiente Construído (ENCAC) / III Conferência Latino-Americana sobre Conforto e Desempenho Energético de Edificações (CODETI), Curitiba, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Anais, 1 CD-ROM.
- ISO/DIS 7726, 1996, “Ergonomics of The Thermal Environment – Instruments for Measuring Physical Quantities”, International Organization for Standardization, Genebra.
- ISO 7730, 1994, “Moderate Thermal Environments – Determination of the PMV and PPD Indices and Specification of the Conditions for Thermal Comfort”, International Organization for Standardization, Genebra.
- ISO 10551, 1995, “Ergonomics of The Thermal Environment – Assessment of The Influence of The Thermal Environment Using Subjective Judgment Scales”, International Organization for Standardization, Genebra.
- Magalhães, M.N. e Lima, A.C.P. de, 2002, “Noções de Probabilidade e Estatística”, 5 ed, São Paulo, Editora da Universidade de São Paulo, ISBN 85-314-0677-3.
- Levine, D.M., Berenson, M.L. e Stephan, D., 2000, “Estatística: Teoria e Aplicações Usando Microsoft® Excel em Português”, Tradução por Teresa Cristina Padilha de Souza, Ed. LTC, Rio de Janeiro.

- Ragsdale, C.T., 2001, "Spreadsheet Modeling and Decision Analysis", 3 ed, South-Western College Publishing, Cincinnati, Ohio, ISBN 0-324-02122-4.
- Ruas, A.C., 1999, "Avaliação de Conforto Térmico – Contribuição à Aplicação Prática das Normas Internacionais", Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), Campinas, São Paulo.
- Shenton, L.R. and Bowman, K.O., 1997, "A Bivariate Model for The Distribution of $(b_1)^{1/2}$ and b_2 ", Journal of the American Statistical Association, Vol. 72, No. 357, March, 206-211p.
- Tabachnick, B.G. and Fidel, L.S., 1989, "Using Multivariate Statistics", New York, Harper & Row, ed. 2, 746p.
- Triola, M.F., 1999, "Introdução à Estatística", 7º ed, Ed. LTC, Rio de Janeiro.
- Xavier, A.A.P., 1999, "Condições de Conforto Térmico para Estudantes de 2º Grau na Região de Florianópolis", Florianópolis, Dissertação de mestrado, CPGEC da UFSC, 198 p.

7. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído neste trabalho.

APPLICABILITY OF SIMPLE AND MULTIPLE LINEAR REGRESSION MODELS IN THERMAL ANALYSIS OF WORK ENVIRONMENTS.

Pablo Adamoglu de Oliveira

Federal University of Paraíba (UFPB). E-mail: pablo_oliveira@msn.com

Luiz Bueno da Silva

Federal University of Paraíba (UFPB) – Industrial Engineering Department (DEP).

Centro de Tecnologia – Campus I, Cidade Universitária, CEP: 58051-970, João Pessoa (PB).

E-mail: bueno@producao.ct.ufpb.br

Antonio Souto Coutinho

Federal University of Paraíba (UFPB) – Industrial Engineering Department (DEP).

Centro de Tecnologia – Campus I, Cidade Universitária, CEP: 58051-970, João Pessoa (PB).

E-mail: coutinho@producao.ct.ufpb.br

Abstract. *A relevant problem involving the study of normally distributed thermal variables is the simultaneous analysis between them, in order to verify if there is any significant correlation between them or to investigate the possibility of inferring numerical values for one of the correlated variables, based on known values of the other ones. This work aims to study simple and multiple linear regression models intending to apply them in researches about environmental thermal comfort, contributing to comprehend the possible needs in terms of refrigeration, heating or ventilation for a work environment. Initially, a bibliographic research was conducted followed by a field research, data collecting and their mathematical-statistical treatment in specific software. Finally, analysis of collected data and construction of the regression models were proceeded using t and F tests in order to verify the consistence of the models and parameters, as well as to structure conclusions based on available information and significance of the developed mathematical models.*

Keywords: *regression models, thermal analysis, work environment.*