

MANEQUIM TÉRMICO-BIOMECÂNICO APLICADO EM SISTEMAS SUJETOS A ESCOAMNTOS TURBULENTOS E A VIBRAÇÕES EM REGIME TRANSITÓRIO

Eusébio Z. E. Conceição^{1,4}, M^a Inês L. Conceição², Margarida I. L. Conceição², M^a Manuela J. R. Lúcio¹ e João M. M. Gomes³

¹Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade do Algarve, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal
{econcei@ualg.pt, maria.manuela.lucio@gmail.com }

²Instituto Superior Técnico, Av. Rovisco Pais, 1049-001 Lisboa, Portugal
{ines.conceicao@tecnico.ulisboa.pt, margarida.conceicao@tecnico.ulisboa.pt }

³CINTAL, Campus de Gambelas, 8005-139 Faro, Portugal
{jgomes@ualg.pt }

⁴ADAI, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Luís Reis Santos, Pólo II, 3030-788 Coimbra, Portugal
{econcei@ualg.pt }

Resumo

Neste trabalho é desenvolvido e aplicado um manequim térmico-biomecânico virtual utilizado em sistemas sujeitos a fluxo de ar turbulento e sistemas vibratórios. Este modelo numérico é aplicado na determinação do campo de temperaturas e de vibrações das diferentes partes do corpo humano, em regime de condições transitórias. O modelo numérico térmico, baseado em equações integrais de balanço de energia e massa, considera os sistemas de equações de primeira ordem, enquanto o modelo numérico biomecânico, baseado na equação de Newton, considera os sistemas de equações de segunda ordem. Este sistema de equações de segunda ordem é convertido num sistema de equações de primeira ordem. A resolução do modelo numérico é feita, para ambas as situações, através do método Runge-Kutta-Fehlberg com controlo de erro. Na resposta térmica do corpo humano, são apresentadas as evoluções, quer da velocidade do ar, quer da temperatura da pele. Por sua vez, na resposta biomecânica do corpo humano, são apresentadas as evoluções da vibração do chão e da vibração das diferentes seções do corpo humano. Na primeira situação é analisada uma frequência de flutuação da velocidade do ar, de 0.4 Hz e, na segunda situação, são analisadas frequências de vibrações da superfície do chão, de 100 e 1000 Hz. De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que o método Runge-Kutta-Fehlberg é capaz de resolver sistemas de equações com baixas frequências de flutuação da velocidade do ar, como com elevadas frequências de vibração da superfície do chão.

Palavras-chave: Resposta térmica e biomecânica do corpo humano, equações integrais de balanço de energia e massa, equação de Newton, método de Runge-Kutta-Fehlberg.

Abstract

In this work, a thermo-biomechanical mannequin is developed and applied to systems subject to turbulent airflow and vibrating structures. Under transient conditions, this numerical model is applied in the evaluation of the temperature and vibration field of different parts of the human body. Based on integral energy and mass balance equations, the thermal numerical model considers systems of first-order equations, while the biomechanical numerical model, based on Newton's equation, considers systems of second-order equations. This system of second-order equations is converted into a system of

first-order equations. For both situations, the numerical model is resolved using the Runge-Kutta-Fehlberg method with error control. In the thermal response of the human body, the evolution of both air speed and skin temperature are presented, while, in the biomechanical response of the human body, the evolution of the vibration of the ground and the vibration of the different sections of the human body are presented. In the first situation, the air speed fluctuation frequency of 0.4 Hz is analyzed, while in the second situation, ground surface vibration frequencies of 100 and 1000 Hz are analyzed. According to the obtained results, it is possible to verify that the Runge-Kutta-Fehlberg method can solve systems of equations with low frequencies of air velocity fluctuations, as well as systems of equations with high frequencies of vibration of the ground surface.

Keywords: Thermal response and biomechanics of the human body, Integral energy and mass balance equations, Newton's equation, Runge-Kutta-Fehlberg method.

PACS no. 43.40.At

1 Introdução

Os ocupantes em ambientes interiores de edifícios, veículos, entre outros, estão sujeitos a vários fatores que afetam o conforto, nomeadamente, o conforto térmico, qualidade do ar interior, ruído, vibrações, entre outros. No conjunto de diversificados autores que apresentam estudos sobre este assunto, Silva (2002) [1], refere, entre muitos, fatores de conforto que afetam os ocupantes em ambientes interiores. No estudo apresentado neste trabalho, serão abordados conceitos de conforto térmico, nomeadamente na componente térmica do corpo humano e conceitos de vibração, nomeadamente na componente biomecânica do corpo humano.

Assim sendo, as componentes térmica e biomecânica, requerem o desenvolvimento da geometria do corpo humano, a qual foi desenvolvida utilizando equações empíricas, em coordenadas cilíndricas e esféricas. Mais pormenores sobre este tema podem ser consultados em Conceição e Awbi (2021) [2] e Conceição *et al.* (2018) [3].

Na resposta térmica e biomecânica do corpo humano apresentada neste trabalho, é utilizado o método de Runge-Kutta-Fehlberg, com controlo de erros, sendo o mesmo aplicado em Conceição e Awbi (2021) [2] e Conceição *et al.* (2018) [3].

O modelo numérico térmico do corpo humano calcula o valor da temperatura do corpo humano. Este tipo de informação, para além de ser utilizado na avaliação do nível de conforto térmico, em regime permanente, é igualmente utilizado na avaliação do nível de resfriamento local, em regime transitório. Na componente térmica do corpo humano é considerada a resposta térmica humana, desenvolvida utilizando equações integrais de balanço de energia e massa, o sistema de termoregulação, baseado em equações empíricas, e a resposta térmica do vestuário, desenvolvida utilizando equações integrais de balanço de energia e massa. Mais pormenores podem ser consultados em Conceição e Awbi (2021) [2] e Conceição *et al.* (2018) [3].

Na componente biomecânica do corpo humano, foi desenvolvida e apresentada por vários autores uma diversidade de trabalhos considerando o corpo humano dividido em vários elementos. Em Grieve e Goldman (1988) [4] foram considerados a cabeça, parte superior do tronco, braços-ombros, tórax-abdómen, coluna vertebral, ancas e pernas e por Bruel e Kjaer (1989) [5] foram analisados a cabeça, olhos, braços, antebraços, mãos, tórax, abdómen, coluna vertebral, coxas, pernas e pés. Por outro lado, Wu *et al.* (1999) [6] e Wu *et al.* (1999) [7] utilizaram modelos de assento humano e de suspensão de assento humano para analisar as vibrações do corpo humano, Kubo *et al.* (2001) [8] analisaram o modelo de vibração para humanos e AlShabi *et al.* (2016) [9] estudaram o efeito das vibrações mecânicas no corpo humano.

O modelo numérico biomecânico calcula o deslocamento, a velocidade e a aceleração a que cada elemento do corpo está submetido. O deslocamento, recorrendo a um software de espectro de potência, é utilizado para avaliar as frequências de vibração dominantes.

Na componente biomecânica, este estudo apresenta uma continuação de trabalhos anteriores, nomeadamente, Conceição e Lúcio (2004) [10] e de Conceição et al. (2020) [11]. Em Conceição e Lúcio (2004) [10], o modelo biomecânico calcula a aceleração, a velocidade e o deslocamento nas diferentes secções do corpo humano e avalia o desempenho de Runge-Kutta-Fehlberg, quando o corpo humano foi dividido em 42 elementos e quando o corpo está sujeito a estímulos locais na zona dos pés. Em Conceição et al. (2020) [11] são analisadas a resposta térmica/biomecânica humana, a validação e três aplicações. Na resposta térmica humana, a geometria humana e a distribuição da temperatura humana são avaliadas. Nos testes de validação foi feita a comparação entre as frequências de vibração de ressonância calculadas, do modelo biomecânico do corpo humano, e medidas, apresentadas em bibliografia especializada. Para avaliar esta comparação é feito um teste numérico, quando um ocupante em pé é submetido a um estímulo nos pés. A vibração e o espectro de potência foram calculados. De acordo com os resultados obtidos, foi possível verificar que, de uma forma geral, os resultados obtidos estão de acordo com os valores sugeridos apresentados na bibliografia. Nas três aplicações foi avaliada a influência da vibração periódica e aleatória nas vibrações mecânicas humanas. De acordo com os resultados obtidos verifica-se que a amplitude das vibrações é mais atenuada nas secções superiores do corpo humano quando é aplicada a vibração periódica ao nível do chão do que quando é aplicada a vibração aleatória. A amplitude das vibrações é mais atenuada nas partes inferiores do corpo humano quando é aplicada a vibração aleatória ao nível do piso do que quando é aplicada a vibração periódica ao nível do piso.

No presente estudo, a resposta térmica do corpo humano, apresenta as evoluções, quer da velocidade do ar, quer da temperatura da pele enquanto que a resposta biomecânica do corpo humano apresenta as evoluções da vibração do chão e da vibração das diferentes secções do corpo humano. Na primeira situação é analisada uma frequência de flutuação da velocidade do ar, de 0.4 Hz. Na segunda situação, são analisadas frequências de flutuações da superfície do chão, de 100 e 1000 Hz.

2 Modelo Numérico e Metodologia

Nesta secção serão apresentados os dois modelos, térmico e biomecânico, bem como a metodologia utilizada nas componentes térmica e biomecânica.

2.1 Resposta Térmica do Corpo Humano

O modelo numérico da resposta térmica humana considera o corpo humano dividido em 24 elementos cilíndricos (34 quando são considerados também os dedos) e 1 esférico, sendo cada um dividido em 4 partes (núcleo, músculo, gordura e pele), subdivididos em diversas camadas e ainda podendo ser protegidos das influências externas através de algumas camadas de roupas. No caso da pele, a mesma é dividida em 100 camadas.

O modelo numérico da componente térmica utilizado é dividido em duas partes: resposta térmica do corpo humano e resposta térmica da pele. O primeiro modelo calcula a distribuição da temperatura do corpo humano, enquanto o segundo modelo, com informação calculada pelo primeiro modelo, calcula as flutuações da temperatura verificadas nas diferentes camadas da pele (incluindo os termo-receptores de calor e frio).

O sistema térmico humano e da pele considera as equações integrais do balanço de energia, para os tecidos do corpo humano e para a roupa, e as equações integrais do balanço de massa para o sangue e a água transpirada na superfície da pele e nas camadas da roupa.

2.2 Resposta Biomecânica do Corpo Humano

O modelo numérico biomecânico é dividido em 42 elementos (cabeça, globo ocular, maxilar, coluna vertebral, parede torácica, massa torácica e abdominal, ombros, braços, mãos, dedos, ancas, coxas, pernas e pés). Cada elemento é representado pelos seus elementos de massa equivalente, elásticos e de amortecimento.

O modelo numérico biomecânico é desenvolvido com base na equação de Newton aplicada em cada elemento. O sistema de equações integrais de segunda ordem obtido, que considera as forças elásticas e de amortecimento, é convertido num sistema de equações integrais de primeira ordem.

2.3 Metodologia

Na resposta térmica do corpo humano, são apresentadas as evoluções, quer da velocidade do ar, quer da temperatura da pele, enquanto, na resposta biomecânica do corpo humano, são apresentados as evoluções da vibração do chão e da vibração das diferentes seções do corpo humano. Na primeira situação é analisada uma frequência de flutuação da velocidade do ar, de 0.4 Hz. Na segunda situação são analisadas frequências de vibração da superfície do chão, de 100 e 1000 Hz.

3 Apresentação de Resultados e Discussão

3.1 Resposta Térmica do Corpo Humano

Na Figura 1 é apresentada a evolução do valor da velocidade do ar a que a pele está sujeita, enquanto na Figura 2 é apresentada a evolução do valor da temperatura da superfície da pele (T_{sup}), temperatura dos termo-recetores de frio (T_{cold}) e temperatura dos termo-recetores de calor (T_{warm}).

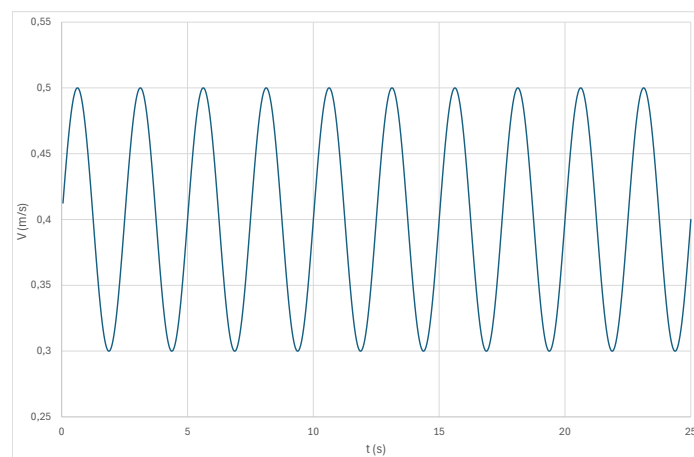


Figura 1 – Evolução do valor da velocidade do ar a que a pele está sujeita.

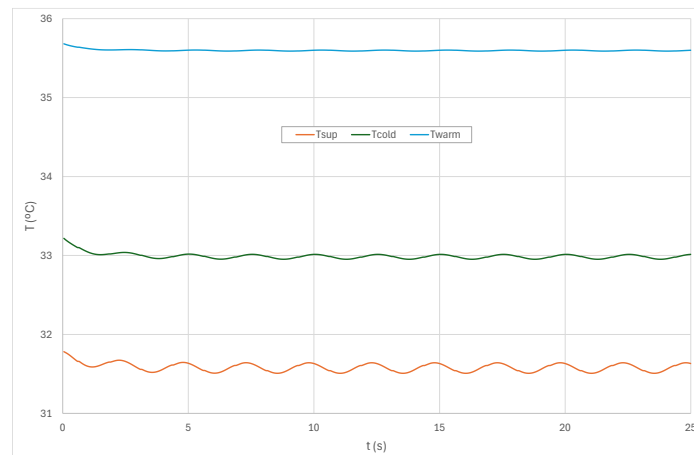


Figura 2 – Evolução do valor da temperatura da superfície da pele (T_{sup}), temperatura dos termorreceptores de frio (T_{cold}) e temperatura dos termorreceptores de calor (T_{warm}).

A resolução do sistema térmico, a que o corpo humano está sujeito, considera duas fases distintas: numa primeira fase, em regime permanente, o sistema considera uma velocidade do ar constante com um valor de 0.4 m/s. Numa segunda parte, em regime transitório, o sistema considera uma velocidade do ar sinusoidal.

De acordo com os resultados obtidos, é possível verificar que a transição do regime permanente para o regime transitório provoca um arrefecimento adicional. No entanto, o sistema térmico humano consegue compensar este arrefecimento. O impacto do arrefecimento, provocado pela flutuação da velocidade do ar, na superfície da pele é maior do que o impacto do arrefecimento na zona dos termorreceptores de frio. Por outro lado, o impacto do arrefecimento, provocado pela flutuação da velocidade do ar, na zona dos termorreceptores de frio é maior do que o impacto do arrefecimento na zona dos termorreceptores de frio.

3.2 Resposta Biomecânica do Corpo Humano

Na Figura 3 pode ser observado a evolução da deslocação do chão, para uma frequência de vibração de 100 Hz. Na Figura 4, são apresentadas as evoluções da deslocação dos pés (Figura a), da deslocação das coxas e das pernas (Figura b), da deslocação da cabeça (Figura c) e da deslocação do peito, abdómen, ombros, braços e mãos (Figura d), para uma frequência de vibração de 100 Hz.

Na Figura 5 pode ser observado a evolução da deslocação do chão, para uma frequência de vibração de 1000 Hz. Na Figura 6 são apresentadas as evoluções da deslocação dos pés (Figura a), da deslocação das coxas e das pernas (Figura b), da deslocação da cabeça (Figura c) e da deslocação do peito, abdómen, ombros, braços e mãos (Figura d), para uma frequência de vibração de 1000 Hz.

A deslocação do chão, quer com uma frequência de vibração de 100 Hz, quer com uma frequência de vibração de 1000 Hz, garante deslocações principalmente, por ordem decrescente, nos pés, pernas e coxas. Estas vibrações, atenuadas principalmente através da coluna, são mais reduzidas nas zonas superiores do corpo humano.

As vibrações na zona inferior do corpo estão em consonância com as vibrações no chão, enquanto que as vibrações na zona superior do corpo não estão em consonância com as vibrações no chão. Na zona superior do corpo existe um impacto mais intenso inicialmente e, ao longo de tempo, as vibrações vão sendo atenuadas.

As vibrações com frequências de 100 Hz apresentam maiores amplitudes do que as vibrações com frequências de 1000 Hz. Para vibrações com frequências de 1000 Hz apresentam, na zona superior do corpo, um impacto mais intenso inicialmente e, ao longo de tempo, as vibrações vão sendo atenuadas.

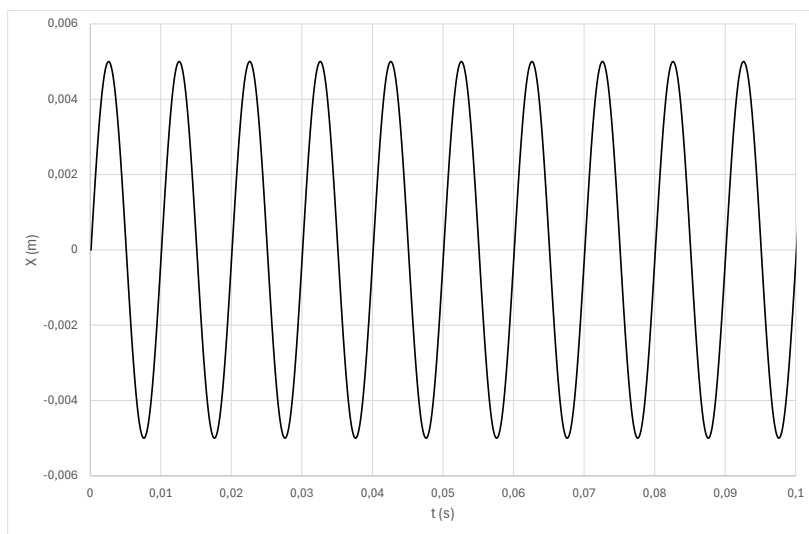


Figura 3 – Evolução da deslocação do chão, para uma frequência de vibração de 100 Hz.

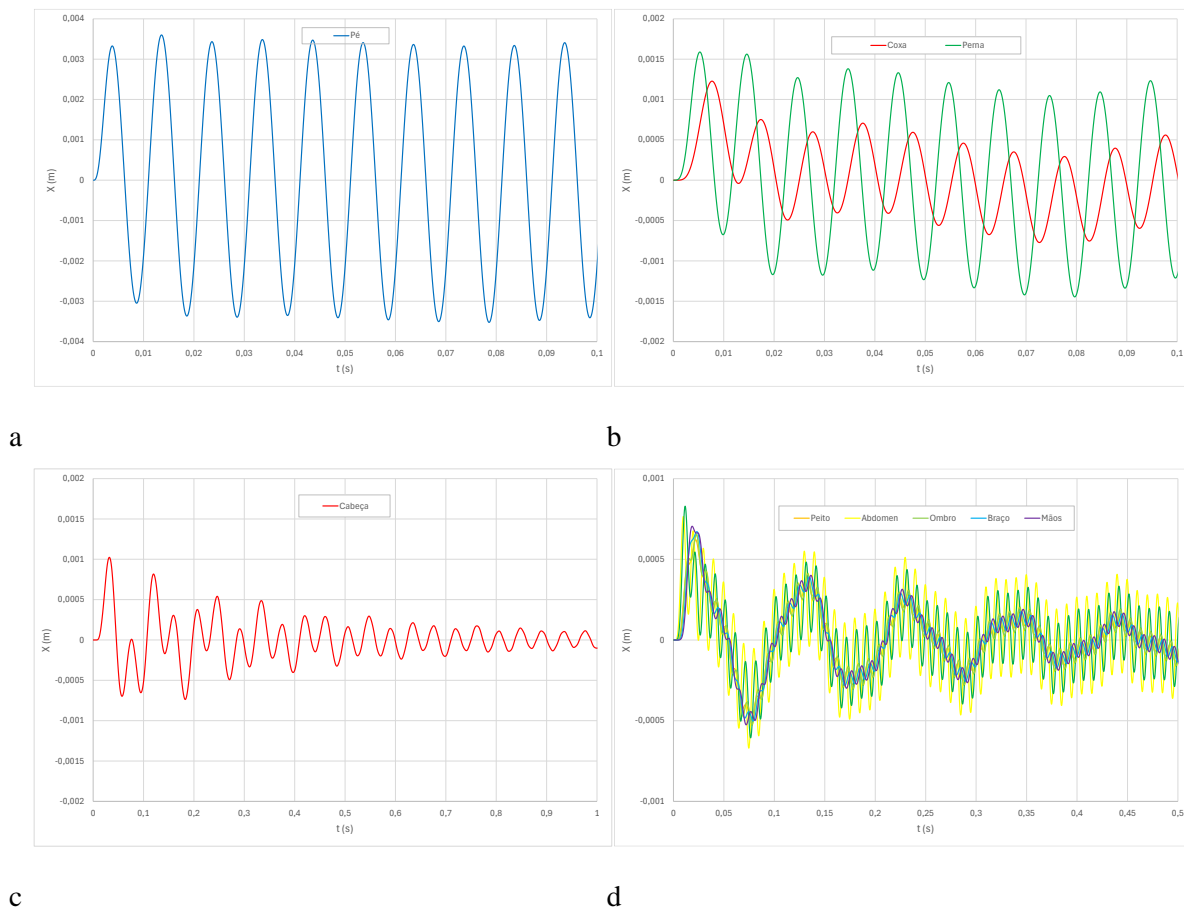


Figura 4 – Evolução da deslocação dos pés (a), das coxas e das pernas (b), da cabeça (c) e do peito, abdómen, ombros, braços e mãos (d), para uma frequência de vibração de 100 Hz.

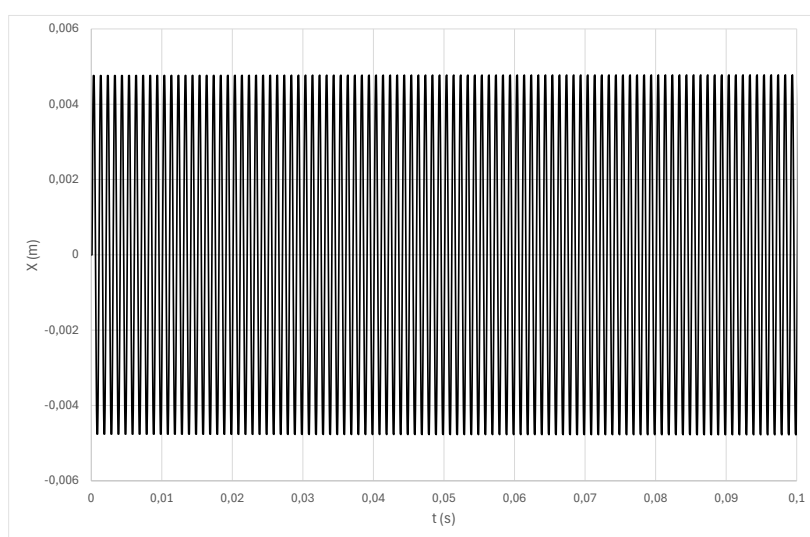
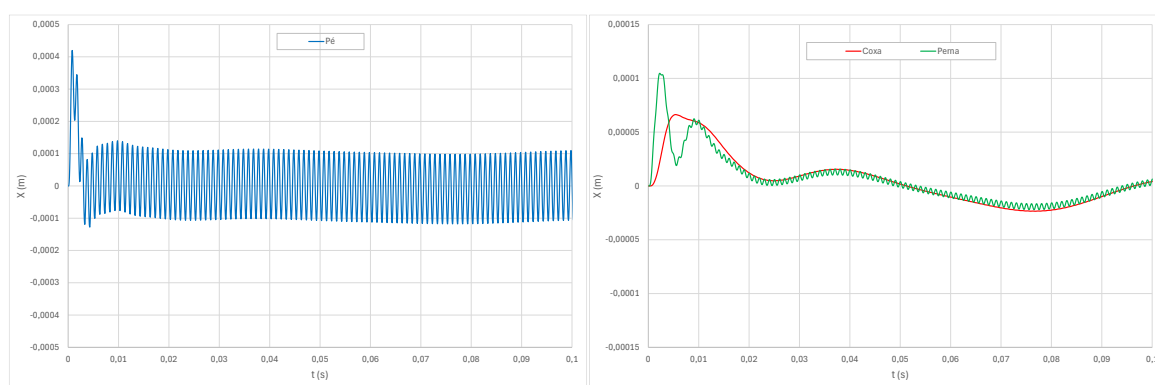
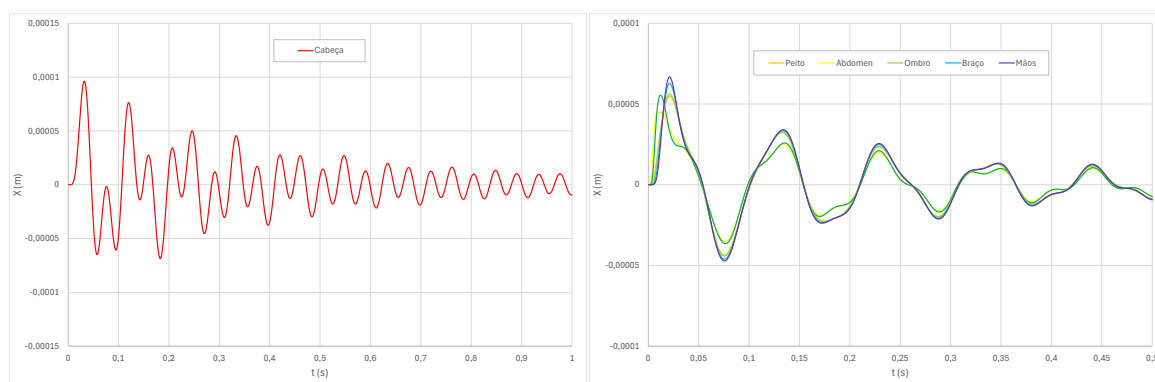


Figura 5 – Evolução da deslocação do chão, para uma frequência de vibração de 1000 Hz.



a

b



c

d

Figura 6 – Evolução da deslocação dos pés (a), das coxas e das pernas (b), da cabeça (c) e do peito, abdómen, ombros, braços e mãos (d), para uma frequência de vibração de 1000 Hz.

Neste estudo, para vibrações com frequências de 100 Hz e 1000 Hz, à semelhança do que se verificou no estudo térmico do corpo humano, o método de Runge-Kutta Felberg, com controlo de erro, é capaz de resolver sistemas de equações integrais, quer do sistema Biomecânico do corpo, para frequências mais elevadas (100 a 1000 Hz), quer do sistema térmico do corpo humano, para frequências mais baixas (0.4 Hz).

Conclusões

Neste estudo é desenvolvido e aplicado um modelo numérico que simula a resposta térmico-biomecânica do corpo humano. Um sinal de flutuação da velocidade do ar e dois sinais de vibração aleatórios diferentes do piso são simulados.

Na resposta térmica do corpo humano, é possível verificar que a transição do regime permanente para o regime transitório provoca um arrefecimento adicional. No entanto, o sistema térmico humano consegue compensar este arrefecimento. O impacto no arrefecimento na superfície da pele, provocado pela flutuação da velocidade do ar, é maior do que o impacto no arrefecimento na zona dos termo-recetores de frio. Por outro lado, o impacto no arrefecimento na zona dos termo-recetores de frio é maior do que o impacto no arrefecimento na zona dos termo-recetores de calor.

As vibrações na zona inferior do corpo estão em consonância com as vibrações no chão, enquanto que as vibrações na zona superior do corpo não estão em consonância com as vibrações no chão. Na zona superior do corpo existe um impacte mais intenso inicialmente e, ao longo de tempo, as vibrações vão sendo atenuadas. As vibrações com frequências de 100 Hz apresentam maiores amplitudes do que as vibrações com frequências de 1000 Hz. Para vibrações com frequências de 1000 Hz apresentam, na zona superior do corpo, um impacte mais intenso inicialmente e, ao longo de tempo, as vibrações vão sendo atenuadas.

Neste estudo, para vibrações com frequências de 100 Hz e 1000 Hz, à semelhança do que se verificou no estudo térmico do corpo humano, para flutuações da velocidade do ar com frequências de 0.4 Hz, o método de Runge-Kutta Felberg, com controlo de erro, é capaz de resolver sistemas de equações integrais, quer do sistema biomecânico do corpo, para frequências mais elevadas (100 a 1000 Hz), quer do sistema térmico do corpo humano, para frequências mais baixas (0.4 Hz).

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer o apoio do projeto (SAICT-ALG/39586/2018), DOI: 10.54499/SAICT-ALG/39586/2018, financiado pelo Programa Operacional Regional do Algarve, através do Fundo Europeu de Desenvolvimento Regional (FERER), e a Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Os autores também gostariam de agradecer ao projeto (UIDB/50022/2020), DOI: 54499/UIDB/50022/2020, financiado pela Fundação para a Ciência e a Tecnologia (FCT).

Referências

- [1] M. C. G. Silva, “Measurements of Comfort in vehicles,” *Meas. Sci. Technol.*, vol. 13, pp. 41–60, 2002.

- [2] E. Z. E. Conceição and H. B. Awbi, Evaluation of the integral effect of thermal comfort, air quality and draught risk for desks equipped with personalized ventilation systems, *Energies*, 2021, 14(11), 3235.
- [3] E. Z. E. Conceição, J.P.Farinho and M. M. J. R. Lúcio, Numerical and experimental study of personalized ventilation installed in a double occupation desk placed nearby a window subjected to solar radiation, *International Journal of Ventilation*, 2018, 17(3), pp. 166–186
- [4] H. E. Grieve and D. E. Goldman, *Effect on Sock and Vibration on Man*, Third Edit. McGraw-Hill, 1988.
- [5] B. & Kjaer, “Human Vibration,” Naerum, Denmark, 1989.
- [6] S. R. and P. E. B. X. Wu, “Study of Human-Seat Interactions for Dynamic Seating Comfort Analysis, in Human Factors in Audio Interior System, Driving and Vehicle Seating,” *Soc. Automot. Eng.*, pp. 137–146, 1999.
- [7] S. R. and P. E. B. X. Wu, “Dynamic Performance of Suspension Seats Under vehicular Vibration and Shock Excitations, in Human Factors in Audio Interior System, Driving and Vehicle Seating,” *Soc. Automot. Eng.*, pp. 147–159, 1999.
- [8] M. Kubo, F. Terauchi, H. Aoki, and Y. Matsuoka, “An investigation into a synthetic vibration model for humans: An investigation into a mechanical vibration human model constructed according to the relations between the physical, psychological and physiological reactions of humans exposed to vibration,” *Int. J. Ind. Ergon.*, 2001, doi: 10.1016/S0169-8141(00)00052-4.
- [9] M. AlShabi, W. Araydah, H. ElShatarat, M. Othman, M. B. Younis, and S. A. Gadsden, “Effect of Mechanical Vibrations on Human Body,” *World J. Mech.*, 2016, doi: 10.4236/wjm.2016.69022.
- [10] E. Z. E. Conceição and M. J. R. Lucio, “Human body biomechanical and thermal response models,” in *INTER-NOISE and NOISE - Congress and Conference Proceedings*, 2004, vol. 2004, no. 3, pp. 3678–3684.
- [11] E. Z. E. Conceição, M^a I. L. Conceição and M^a M. J. R. Lúcio "Development of an Integrated Numerical Model of the Thermo-Physiological and Biomechanical Human System Applied in Occupied Spaces", INTER-NOISE 2020 e-congress – 49th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering, Advances in Noise and Vibrations Control Technology, Seoul, South Korea, 23-26 August 2020.