

RESUMEN

Poder predecir el confort térmico durante el uso de indumentaria de protección es muy relevante especialmente en el caso de la cabeza, ya que es una de las partes más sensibles del cuerpo al calor. Los elementos de protección frente a impactos (cascos entre otros) incorporan un aislamiento adicional que dificulta la disipación de calor en la cabeza. Este hecho tiene especial importancia cuando el estrés térmico afecta negativamente a la función cognitiva y a la salud.

Los maniqués térmicos permiten analizar de manera sistemática las propiedades de transferencia de calor y humedad de la indumentaria de protección. Habitualmente funcionan en modo estacionario siguiendo los valores de consigna para flujo de calor o temperatura superficial definidos por el usuario. Los maniqués que representan partes del cuerpo de manera separada suponen una alternativa al alza frente a los maniqués de cuerpo completo ya que debido a su mayor división en zonas independientes, permiten determinar con mayor nivel de detalle las propiedades térmicas de la ropa e indumentaria de protección. Sin embargo, aunque esta metodología permite realizar estudios comparativos entre diferentes productos y proporciona información de alto valor para la industria, no permite inferir la respuesta fisiológica del usuario cuando utiliza la prenda.

En la actualidad existen modelos matemáticos que permiten predecir el estado fisiológico del cuerpo humano y el confort percibido. No obstante, a pesar de que estos modelos son capaces de predecir la respuesta fisiológica humana en detalle, presentan algunas limitaciones cuando se trata de simular los complejos procesos de transferencia de calor y humedad que ocurren al nivel de la superficie de la piel cuando está cubierta con ropa. En este caso, un maniqué térmico podría cuantificar el intercambio real de calor que se produce con el ambiente térmico cuando se viste una determinada prenda y el ambiente térmico es complejo. Algunas experiencias previas en las que un maniqué de cuerpo completo o un cilindro que lo representa han sido acoplados con un modelo de la fisiología humana han demostrado que estos sistemas pueden evaluar de manera precisa el impacto de la ropa y de otros factores ambientales en la respuesta fisiológica humana. Sin embargo, el acoplamiento de un maniqué que representa únicamente una parte del cuerpo con un modelo de la fisiología humana no ha sido llevado a cabo hasta ahora. Por lo tanto, el objetivo de este trabajo ha sido desarrollar una nueva metodología para evaluar cascos y equipos de protección para la cabeza basándose en el acoplamiento de un maniqué térmico de cabeza con un modelo fisiológico. Esta metodología permitiría representar el efecto real de la ropa en la transferencia de calor y humedad en la cabeza entre la superficie de la piel y el ambiente y su impacto en la respuesta térmica del usuario.

Un maniquí térmico de cabeza con una división en nueve zonas independientes especialmente diseñado para un detallado análisis térmico de cascos y equipos de protección para la cabeza ha sido evaluado para ser acoplado con un modelo de la fisiología humana. Un análisis inicial de la precisión en la medida del flujo de calor mostró la necesidad de reajustar el maniquí para un correcto funcionamiento en el sistema acoplado. Una vez ajustado, las medidas de este maniquí fueron consistentes con resultados anteriormente publicados realizados con un maniquí en menos seccionado con algunas excepciones atribuidas a diferencias en la geometría en situaciones de convección pura y combinada con radiación. El mayor nivel de detalle en la investigación de la transferencia de calor en las diferentes zonas de la cabeza introdujo información adicional sobre la contribución en particular de las distintas características de diseño del casco al intercambio de calor global.

El maniquí térmico de cabeza fue evaluado en los escenarios más extremos identificados para la fisiología humana para determinar las posibles limitaciones durante la simulación de la respuesta térmica de la cabeza. Se pudo identificar cuatro partes independientemente controladas en el sistema acoplado, frente, cráneo, cara y cuello que presentaron áreas y coeficientes de transferencia de calor similares. En el caso de simular una distribución heterogénea de temperatura en la superficie del maniquí de cabeza, los gradientes generados entre las diferentes partes causaron un intercambio de calor lateral no controlado que podría comprometer potencialmente la precisión en la predicción de la temperatura de la piel en la frente y la cara. La capacidad pasiva de calentamiento y enfriamiento del maniquí de cabeza no supuso ninguna limitación para simular los cambios súbitos de temperatura de la piel observados en la fisiología humana. Sin embargo, cuando el control PI del maniquí moduló los procesos de calentamiento y enfriamiento con los parámetros definidos por el fabricante, el tiempo necesario para alcanzar la temperatura de consigna fue mayor que el tiempo de reacción observado en la fisiología humana.

Las predicciones de temperatura obtenidas con el modelo de la fisiología humana previsto para formar parte del sistema acoplado fueron validadas a nivel global y local mediante la comparación con datos humanos experimentales recogidos en escenarios representando un amplio rango de condiciones térmicas. En general, el modelo mostró buena precisión para la predicción de la temperatura interna y la temperatura media de la piel. Sin embargo, la precisión observada fue menor para la predicción de la temperatura de la frente y del muslo, probablemente debido a una descripción incompleta de las circunstancias de la medida o debido a una sobrestimación del enfriamiento debido a la evaporación del sudor.

Finalmente, el maniquí térmico de cabeza y el modelo de la fisiología humana fueron acoplados y por tanto, la partes del cuerpo correspondientes a la cabeza fueron vestidas y expuesta al ambiente térmico en la realidad mientras que el resto del cuerpo fue simulado de manera virtual. El principio para el acoplamiento consistió en un lazo de realimentación en tiempo real en el cual el modelo proporcionaba las temperaturas de la piel y las tasas de sudoración para cada parte de la cabeza representada en el maniquí y éste reaccionaba proporcionando los flujos de calor correspondientes. La comparación de las predicciones del sistema acoplado con datos humanos experimentales en escenarios representando diferentes combinaciones de temperatura ambiente y actividad física mostraron concordancia en el caso de la temperatura rectal y media de la piel de manera similar a las predicciones que el modelo mostró por sí solo. No obstante, se observó una mayor discrepancia en la predicción de la temperatura de la frente si se comparaba las simulaciones obtenidas con el modelo por sí solo y con el sistema acoplado en escenarios en los que los participantes realizaban actividad

física ambientes moderados o cálidos. En estos casos, el principal mecanismo de enfriamiento de la piel sería la evaporación del sudor. Se observó que la temperatura de la piel simulada con el sistema acoplado solía estar por encima de la temperatura simulada con el modelo solamente en ambientes moderados y cálidos pero su concordancia con los datos humanos experimentales dependía del caso específico que era simulado. La representación de la evaporación del sudor humano en el sistema acoplado podría estar condicionada por una menor eficiencia en la evaporación y los procesos de mojado y secado que tienen lugar en la superficie del maniquí de cabeza y en la tela que lo cubre para distribuir el sudor. Este trabajo ha generado una avanzada metodología para evaluar cascos y otros elementos de protección para la cabeza mediante la predicción de la respuesta termofisiológica del usuario. La industria se podrá beneficiar de este sistema para avanzar en el desarrollo de nuevos productos que proporcionen mayor confort térmico y que por lo tanto sean mejor aceptados por los usuarios.