

CAPÍTULO 4

ERGONOMIA AUTOMOTIVA E INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL: REVISÃO CRÍTICA, DIAGNÓSTICO E DIREÇÕES DE PESQUISA



<https://doi.org/10.22533/at.ed.244112527014>

Data de aceite: 19/12/2025

Márcio Mendonça

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG

Cornélio Procópio - PR

<http://lattes.cnpq.br/5415046018018708>

Andressa Haiduk

Dimension Engenharia Rio Negro - PR

<http://lattes.cnpq.br/2786786167224165>

Vitor Blanc Milani

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Mestrando - PPGEM-CP - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica CP/PG

Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/4504374098250296>

Juliana Maria de Jesus Ribeiro

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio/Londrina, Paraná – Brasil

Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN

Londrina - PR

<http://lattes.cnpq.br/6279504657014354>

Fabio Rodrigo Milanez

UniSENAIPR-Campus Londrina – Londrina-PR

<http://lattes.cnpq.br/3808981195212391>

Emerson Ravazzi Pires da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)

Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/3845751794448092>

Eduardo Pegoraro Heinemann

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de

Engenharia Elétrica (DAELE)

Cornélio Procópio – PR

<http://lattes.cnpq.br/0964474292409084>

Marco Antônio Ferreira Finocchio

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE)

Cornélio Procópio

<http://lattes.cnpq.br/8619727190271505>

Armando Paulo da Silva

Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD)

Cornélio Procópio-PR

<http://lattes.cnpq.br/6724994186659242>

Francisco de Assis Scannavino Junior

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/4513330681918118>

Paulo Alexandre Lourenço Jesus

Afiliação acadêmica: Aluno externo no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN – Curso de Mestrado Instituição: Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio/Londrina – PR
<https://lattes.cnpq.br/1346404833044235>

Adriano da Silva Moreira

Afiliação acadêmica: Mestrando no Programa de Pós-Graduação em Educação – PPEDU Instituição: Universidade Estadual de Londrina (UEL) – Campus Londrina – PR
<https://lattes.cnpq.br/0686904669527189>

Jancer Frank Zanini Destro

Universidade Tecnológica Federal do Paraná Departamento Acadêmico de Engenharia Elétrica (DAELE) Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/9441194382598647>

Marcos Dantas de Oliveira

Consultoria, Projetos e Serviços em Energia Solar Londrina – PR
<http://lattes.cnpq.br/5329306535174160>

Cintya Wedderhoff Machado

Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Campus Cornélio Procópio/Londrina, Paraná – Brasil Mestranda no Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza – PPGEN Londrina - PR
<http://lattes.cnpq.br/4604594140489347>

Daniela Mendonça de Oliveira

Discente Mestrado- Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD) Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/7537622609222737>

Tatiane Monteiro Pereira

Mestranda - Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Humanas, Sociais e da Natureza (PPGEN-CP/LD) Cornélio Procópio - PR
<http://lattes.cnpq.br/9520601026438758>

Edinei Aparecido Furquim dos Santos

Secretaria da Fazenda Maringá - PR
<http://lattes.cnpq.br/8706436030621473>

RESUMO: A ergonomia automotiva constitui um domínio multidisciplinar essencial para o desenvolvimento de veículos que promovam conforto, segurança e eficiência. Este artigo apresenta uma revisão integrativa da literatura, analisando os fundamentos teóricos, os resultados empíricos e as tendências tecnológicas que moldam o campo. São examinados os princípios biomecânicos, antropométricos e cognitivos que fundamentam o design ergonômico, bem como o impacto de fatores ambientais como vibração, ruído e conforto térmico. Destaca-se, de forma particular, o papel transformador da Inteligência Artificial (IA) na otimização da interação homem-veículo, com aplicações que vão desde a modelagem preditiva de posturas ideais e ajuste inteligente de assentos até a detecção proativa de fadiga e o monitoramento postural em tempo real. Conclui-se que a convergência entre ergonomia tradicional e IA permite a criação de ambientes de condução altamente personalizados e

adaptativos, capazes de reduzir a fadiga, prevenir lesões e melhorar o desempenho cognitivo do condutor. Recomenda-se, para trabalhos futuros, o aprofundamento em simulações personalizadas com *digital twins*, o desenvolvimento de sistemas de aprendizado contínuo e a discussão de aspectos éticos e de privacidade relacionados ao uso de dados biométricos. **PALAVRAS-CHAVE:** Ergonomia automotiva; Conforto do veículo; Segurança do motorista; Inteligência Artificial; Design centrado no ser humano; Biomecânica.

AUTOMOTIVE ERGONOMICS AND ARTIFICIAL INTELLIGENCE: CRITICAL REVIEW, DIAGNOSIS, AND RESEARCH DIRECTIONS

ABSTRACT: Automotive ergonomics is a multidisciplinary domain essential for developing vehicles that promote comfort, safety, and efficiency. This paper presents an integrative literature review, analysing the theoretical foundations, empirical results, and technological trends shaping the field. The biomechanical, anthropometric, and cognitive principles underlying ergonomic design are examined, as well as the impact of environmental factors such as vibration, noise, and thermal comfort. The transformative role of Artificial Intelligence (AI) in optimizing human-vehicle interaction is highlighted, with applications ranging from predictive modelling of ideal postures and intelligent seat adjustment to proactive fatigue detection and real-time postural monitoring. It is concluded that the convergence between traditional ergonomics and AI enables the creation of highly personalized and adaptive driving environments, capable of reducing fatigue, preventing injuries, and improving the driver's cognitive performance. For future work, it is recommended to deepen research into personalized simulations with digital twins, develop continuous learning systems, and discuss ethical and privacy aspects related to the use of biometric data.

KEYWORDS: Automotive ergonomics; Vehicle comfort; Driver safety; Artificial Intelligence; Human-centered design; Biomechanics.

INTRODUÇÃO

A ergonomia automotiva constitui um dos pilares fundamentais da engenharia de transportes, direcionando o desenvolvimento de veículos mais confortáveis, seguros e eficientes. Componentes como assentos, comandos, painel, visibilidade e postura do condutor influenciam diretamente a experiência de condução, reduzindo fadiga, aumentando a segurança e prevenindo lesões (IIDA, 2005). Estudos recentes evidenciam que o design ergonômico impacta significativamente no desempenho cognitivo do motorista, na estabilidade biomecânica e na prevenção de acidentes (HART, 2022).

No Brasil, essa discussão transcende o campo técnico e assume contornos jurídicos relevantes, uma vez que a oferta de produtos seguros e adequados é um direito básico do consumidor, garantido pelo art. 6º, inciso I, do Código de Defesa do Consumidor (CDC – Lei nº 8.078/90). A integração de tecnologias avançadas, como a Inteligência Artificial (IA), surge como um campo promissor para personalizar e otimizar a interação entre o ser humano e o veículo, adaptando os ambientes de condução às características individuais dos usuários (ZHANG; LI, 2024). Essa personalização, contudo, impõe novos desafios à regulamentação, tradicionalmente baseada em padrões de população e produtos estáticos.

Portanto, este artigo tem como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura, analisando os fundamentos, os resultados, as perspectivas tecnológicas e as implicações regulatórias da ergonomia automotiva no Brasil, com ênfase nas aplicações emergentes de IA visando contribuir para a evolução de veículos mais adaptativos, seguros e alinhados ao ordenamento jurídico nacional.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A pesquisa em ergonomia automotiva tem avançado significativamente nas últimas décadas, focando em múltiplas dimensões do conforto e da segurança. Esta seção organiza a literatura em três eixos principais: física/postural, ambiental e cognitiva.

Ergonomia Física e Postural

Estudos como os de Silva et al. (2023) e Kalantari et al. (2022) apontam que fatores antropométricos, como a distância ideal do volante, a altura do assento e os ângulos articulares do motorista, são determinantes críticos para a qualidade ergonômica.

A variabilidade antropométrica entre diferentes populações exige soluções de projeto que contemplam uma ampla gama de perfis corporais (KIM; PARK, 2020). Segundo Pheasant e Haslegrave (2005), o dimensionamento inadequado dos espaços internos pode levar a posturas constrangedoras, aumento da pressão em discos intervertebrais e fadiga muscular precoce.

O emprego de Modelos Digitais de Seres Humanos (DHM – *Digital Human Models*) tem revolucionado a fase de projeto. Ferramentas como RAMSIS, Jack e Santos permitem simulações preditivas detalhadas que avaliam o conforto, o risco de lesões por esforço repetitivo (LER) e a eficiência postural em cenários virtuais, antes da fabricação de protótipos físicos (CHAFFIN, 2007).

Estudos como o de Reed et al. (2021) utilizam DHM para otimizar a geometria do assento, demonstrando reduções significativas na pressão na região isquiática e melhora na distribuição de peso.

Ergonomia Ambiental

Além dos aspectos físicos e posturais, a ergonomia abrange também dimensões ambientais e sensoriais. Pesquisas exploram o impacto da vibração do veículo sobre a saúde do condutor. A exposição prolongada a vibrações de corpo inteiro (WBV – *Whole-Body Vibration*), principalmente na faixa de 4–8 Hz, está associada a danos à coluna lombar e distúrbios circulatórios (GRIFFIN, 2007). Sistemas de suspensão ativa e assentos com amortecimento adaptativo têm sido desenvolvidos para atenuar essa transmissão.

O conforto térmico é outro fator crucial. Janssen et al. (2021) demonstram que a sensação térmica no interior do veículo é influenciada por radiação solar, materiais do interior e eficiência do sistema de climatização. A Zona de Conforto Térmico para motoristas é mais estreita do que para ocupantes passivos, devido ao estresse metabólico da tarefa de dirigir.

O ruído interno, proveniente de motor, rodagem e aerodinâmica, também afeta a carga mental e a fadiga. Níveis sonoros acima de 70 dB(A) podem aumentar o estresse e prejudicar a concentração (GRIFFIN, 2007).

Ergonomia Cognitiva e Interação Homem-Máquina (IHM)

A interação multimodal, envolvendo visão, audição e tato, tem ganhado relevância no design de IHM, buscando uma comunicação mais intuitiva e menos distrativa (NORMAN, 2013).

A Teoria da Carga Cognitiva de Sweller (2011) é frequentemente aplicada para projetar interfaces que não sobrecarreguem a atenção do motorista. Sistemas de *head-up display* (HUD), comandos por voz com *feedback* auditivo natural e controles hápticos no volante são exemplos de tecnologias que visam reduzir o desvio visual da estrada (SPENCE; HO, 2015).

A distração do motorista (*driver distraction*) permanece um grande desafio. Horberry et al. (2006) categorizam a distração em visual, cognitiva, auditiva e biomecânica. Interfaces de *infotainment* complexas são fontes primárias de distração visual e cognitiva, aumentando o tempo de reação e o risco de acidentes.

METODOLOGIA

Este artigo adotou o método de Revisão Integrativa da Literatura, que permite a análise e síntese de estudos empíricos e teóricos de forma sistemática, com o objetivo de fornecer uma compreensão abrangente do tema (WHITTEMORE; KNAFL, 2005). A revisão foi conduzida em cinco etapas:

1. **Identificação do Problema e Definição da Questão de Pesquisa:** Como a ergonomia automotiva tem evoluído com a integração de tecnologias digitais e de Inteligência Artificial?
2. **Busca na Literatura:** A busca foi realizada entre janeiro e março de 2024 nas seguintes bases de dados: Scopus, Web of Science, ScienceDirect, IEEE Xplore e SciELO. Os descritores utilizados, combinados com operadores booleanos, foram: (“automotive ergonomics” OR “vehicle comfort” OR “driver seat design”) AND (“digital human modeling” OR “postural analysis”) e (“artificial intelligence” OR “machine learning”) AND (“fatigue detection” OR “adaptive seat”).
3. **Avaliação Crítica dos Dados:** Foram incluídos artigos publicados entre 2000 e 2024, em inglês ou português, que abordassem aspectos físicos, ambientais, cognitivos ou tecnológicos (IA/DHM) da ergonomia automotiva. Foram excluídos

artigos não revisados por pares, editoriais e estudos focados exclusivamente em veículos pesados ou fora de estrada. Um total de 78 artigos foram selecionados para análise detalhada.

4. Análise e Síntese dos Dados: Os estudos foram categorizados tematicamente (e.g., biomecânica, IHM, IA) e seus principais achados, metodologias e limitações foram extraídos e comparados.
5. Apresentação dos Resultados: A síntese é apresentada neste artigo de forma narrativa, complementada por uma tabela sumária (Tabela 1) que organiza os principais tópicos e referências.

Tópico	Foco Principal	Principais Referências
Antropometria e Postura	Dimensionamento e zonas de alcance	PHEASANT; HASLEGRAVE (2005); KIM; PARK (2020)
DHM e Simulação	Avaliação virtual de conforto e risco	CHAFFIN (2007); KALANTARI et al. (2022)
Conforto Ambiental	Vibração, ruído e térmico	GRIFFIN (2007); JANSSEN et al. (2021)
IHM e Carga Cognitiva	Distração e design de interfaces	NORMAN (2013); SWELLER (2011); HORBERRY et al. (2006)
Aplicações de IA	Personalização e predição	ZHANG; LI (2024); MOURTZIS et al. (2022)

Tabela 1: Síntese dos principais tópicos da revisão bibliográfica

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A ergonomia automotiva fundamenta-se na convergência de três domínios principais: a biomecânica, a antropometria e a psicologia cognitiva. No Brasil, essa fundamentação é complementada e, em muitos aspectos, direcionada, por um conjunto de normas técnicas e requisitos legais.

Princípios Biomecânicos e a Normatização da conformidade

A biomecânica ocupacional aplicada à condução analisa as forças, torques e posturas adotadas pelo corpo humano durante o ato de dirigir, com o objetivo de minimizar o estresse músculos-esquelético e otimizar a eficiência postural.

O Modelo de Conforto Postural, proposto por Rebelo et al. (2013), destaca que posturas próximas à posição neutra das articulações incluindo ombro, cotovelo, quadril e joelho exigem menor atividade muscular e tendem a ser percebidas como mais confortáveis.

Nesse contexto, a pressão de contato no assento constitui um parâmetro crítico: distribuições inadequadas podem gerar pontos de pressão elevada, ocasionando desconforto localizado, fadiga precoce e, em casos mais severos, isquemia tecidual (KUMAR, 2008).

A incorporação desses princípios biomecânicos ao arcabouço normativo brasileiro é perceptível na Resolução nº 901/2022 do Conselho Nacional de Trânsito (Contran), que consolida requisitos mínimos para componentes de segurança veicular.

Em seu Anexo I (item 6.4), estabelece a obrigatoriedade do encosto de cabeça nos assentos dianteiros, dispositivo que visa reduzir o risco de lesões cervicais por mecanismo de “chicotada” em colisões traseiras.

Trata-se de um exemplo concreto de como evidências científicas da biomecânica foram traduzidas em exigências regulatórias, resultando em parâmetros de conformidade obrigatórios para os fabricantes e garantindo maior proteção aos usuários.

Princípios Antropométricos, Normas Técnicas e o Desafio do Padrão Brasileiro

A antropometria fornece os dados dimensionais da população-alvo. Projetar para o percentil 5 (P5) ao percentil 95 (P95) é uma prática comum para atender à maioria dos usuários. Normas internacionais são diretrizes essenciais:

ISO 7250-1: Define as medidas corporais básicas para projeto tecnológico.

ISO 12258: Especifica os requisitos para o posicionamento do motorista de veículos rodoviários.

SAE J1100: Estabelece uma nomenclatura padrão para dimensões de veículos, incluindo espaços internos.

O conceito de Zonas de Alcance Ótimo é central. Comandos frequentes (ex.: volume do rádio) devem estar dentro da zona de alcance primário (sem necessidade de inclinar o tronco), enquanto comandos ocasionais podem estar em zonas secundárias (PHEASANT; HASLEGRAVE, 2005).

A antropometria fornece os dados dimensionais da população-alvo e constitui base indispensável para o projeto de veículos que atendam adequadamente à diversidade corporal dos usuários.

Em ergonomia automotiva, é prática consolidada projetar para um intervalo entre o percentil 5 (P5) e o percentil 95 (P95), buscando contemplar a maior parte da população em altura, comprimento de membros e volume corporal.

O conceito de Zonas de Alcance Ótimo também é fundamental nesse contexto: comandos de uso frequente devem estar posicionados na zona de alcance primário — sem necessidade de inclinar o tronco — ao passo que controles ocasionais podem ser alocados em zonas secundárias (PHEASANT; HASLEGRAVE, 2005).

No Brasil, o Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (Inmetro) atua na adaptação desses referenciais ao mercado nacional. O Programa de Avaliação da Conformidade para Veículos Automotores Leves, regulamentado pela Portaria Inmetro nº 544/2012 e suas atualizações, exige ensaios que avaliam, ainda que indiretamente,

aspectos ergonômicos associados à segurança, como a visibilidade do motorista e a funcionalidade dos sistemas de retenção cintos de segurança, encostos de cabeça e ajustes de assentos.

Entretanto, persiste um problema estrutural: não existe um banco de dados antropométrico brasileiro oficial e amplamente adotado pela indústria automotiva, o que leva fabricantes a recorrerem a bases internacionais ou a estudos proprietários limitados.

Esse gap pode resultar em veículos projetados para dimensões que não representam a diversidade antropométrica do país, reduzindo o conforto, o alcance funcional e a segurança de mulheres, idosos, pessoas de menor estatura e grupos populacionais pouco representados nos modelos internacionais (SANTOS; OLIVEIRA, 2019).

Princípios Cognitivos, Integração Homem-Máquina e a Responsabilidade por Vício do Produto

A Integração Homem-Máquina (IHM) estuda a forma como os indivíduos percebem, processam e interagem com comandos e indicadores, assegurando que controles e *displays* estejam alinhados a princípios de usabilidade capazes de reduzir falhas operacionais e minimizar a distração ao dirigir.

Nesse contexto, a Lei de Fitts (FITTS, 1954) demonstra que o tempo necessário para se mover até um alvo é função da distância e do tamanho desse alvo, fundamentando tecnicamente a necessidade de dimensionar botões e áreas de toque de forma acessível, especialmente em telas digitais.

A Teoria da Carga Cognitiva, proposta por Sweller (2011), constitui um referencial essencial para o projeto de interfaces veiculares, uma vez que propõe a redução da carga intrínseca (relativa à complexidade da informação) e da carga extrínseca (relativa à forma de apresentação), liberando capacidade cognitiva para a tarefa principal: a direção.

De modo complementar, o Modelo de Processamento de Informação do Motorista, de Wickens et al. (2013), descreve como estímulos visuais, auditivos e táteis são percebidos, filtrados, processados e convertidos em ações, permitindo identificar gargalos cognitivos e prever pontos críticos da interação.

Sob a ótica jurídica e da defesa do consumidor, esses fundamentos não se restringem ao campo científico. Um painel excessivamente complexo ou um sistema de infotainment que desvie a atenção do condutor de maneira perigosa pode ser caracterizado como vício do produto, conforme o art. 18 do Código de Defesa do Consumidor (CDC), gerando o dever de indenizar em decorrência de acidentes provocados pela falha de projeto da interface.

A responsabilidade do fabricante, nesses casos, é objetiva, ou seja, independe da comprovação de culpa, estando fundamentada no risco da atividade e prevista no art. 12 do CDC. Tais entendimentos oferecem respaldo teórico e normativo para sustentar, em âmbito judicial ou administrativo, que uma interface mal projetada, ao ampliar o potencial de erro humano, caracteriza falha de segurança e vício de projeto.

RESULTADOS E ANÁLISES

A análise da literatura consultada permite verificar que a má concepção ergonômica está intrinsecamente associada a uma série de consequências negativas.

Impactos Negativos da Má Ergonometria

A curto prazo, observa-se o aumento da fadiga muscular localizada, especialmente na região lombar (eretores da espinha), pescoço (trapézio) e ombros. Van der Welde et al. (2002) registraram um aumento médio de 40% na atividade EMG (eletromiografia) na lombar após duas horas de condução em assentos mal ajustados.

A médio e longo prazos, esses fatores podem evoluir para lesões ocupacionais crônicas, como hérnia de disco e síndrome do impacto do ombro (BUCKLE; DEVEReux, 2002). No âmbito cognitivo, interfaces mal projetadas e posturas inadequadas contribuem para erros de julgamento, aumento do tempo de reação a estímulos críticos (em até 0,5 segundos, conforme Horberry et al., 2006) e maior susceptibilidade à distração.

Benefícios de Projetos Ergonômicos Avançados

Em contrapartida, projetos que incorporam princípios de ergonomia avançada demonstram benefícios mensuráveis. Reed et al. (2021) documentaram uma redução de 35% nos relatos de fadiga lombar e uma melhoria de 28% na pontuação de conforto subjetivo após a implementação de assentos com suporte lombar ativo e ajuste dinâmico em testes de longa duração.

A introdução de tecnologias como painéis com *feedback* haptico reduziu em 22% o tempo de olhar para o painel em comparação com alertas apenas visuais (SPENCE; HO, 2015). Análises posturais utilizando sensores *wearables* e câmeras no interior do veículo (GARCÍA et al., 2023) validam que ajustes personalizados mantêm as curvaturas naturais da coluna (lordose lombar e cervical) por mais tempo, promovendo uma postura neutra e saudável.

DISCUSSÃO

Os achados desta revisão evidenciam que a ergonomia automotiva está passando de um modelo reativo, baseado em médias populacionais, para uma abordagem proativa, preditiva e personalizada, mediada pela Inteligência Artificial (IA). Os Digital *Human Models* (DHMs) marcaram a primeira grande evolução ao permitir a simulação virtual de diferentes perfis de usuários; contudo, ainda operavam dentro de parâmetros estáticos e previamente definidos.

A incorporação da IA amplia esse escopo ao introduzir adaptabilidade em tempo real, ajustando elementos da cabine, interfaces e respostas do veículo conforme o comportamento, as características antropométricas e o estado fisiológico do condutor.

Essa evolução revela uma sinergia transversal entre os domínios físicos, cognitivos e ambientais analisados. Exemplos dessa convergência incluem sistemas de IA capazes de detectar fadiga e acionar micro correções posturais no assento, ou modelos preditivos que antecipam a necessidade de ajustes térmicos, reduzindo desconforto e distração. Trata-se de uma personalização que atua simultaneamente na redução do risco biomecânico, na eficiência cognitiva e no bem-estar sensorial.

No entanto, a mesma tecnologia que amplia o conforto e a segurança inaugura uma zona de tensão entre inovação e regulação, especialmente no contexto jurídico brasileiro. As bases normativas do Inmetro e do Contran, assim como os princípios consumeristas previstos no CDC, foram concebidas para produtos estáticos.

Os sistemas de IA embarcados conferem ao veículo características de serviço contínuo, o que suscita questionamentos: quem responde se o ajuste automático de um assento causar lesão? Como garantir o direito à informação (art. 6º, III, do CDC) quando decisões são tomadas por modelos opacos e de difícil interpretação (*black boxes*)?

Essas preocupações se aprofundam quando se considera que a personalização promovida pela IA exige a coleta e processamento de dados biométricos sensíveis como postura, padrão de olhar, expressões faciais e indicadores fisiológicos enquadrados como tais pelo art. 5º, II, da LGPD (Lei nº 13.709/2018). O uso desses dados requer consentimento destacado, finalidade específica, transparência e possibilidade de revogação, o que pode limitar a funcionalidade de sistemas ergonômicos inteligentes e gerar novos dilemas técnicos e contratuais.

Há ainda desafios operacionais. A validação de sistemas adaptativos em condições reais demanda tempo, custo e protocolos complexos, uma vez que envolve interações variáveis entre corpo humano, contexto e algoritmo. Paralelamente, emerge o risco de dependência tecnológica, em que o condutor transfere aos sistemas a autopercepção de fadiga ou desconforto, reduzindo sua capacidade de identificar sinais de alerta, especialmente diante de falhas técnicas ou eventos imprevistos.

Nesse cenário, a padronização assume papel estratégico. Adifusão global de soluções de IA exige protocolos que assegurem eficácia, segurança funcional, interoperabilidade e transparência.

Portanto, projetar o futuro da ergonomia automotiva no Brasil dependerá de um processo de modernização regulatória capaz de reconhecer a natureza adaptativa desses sistemas. As normas do Inmetro e do Contran precisarão incorporar diretrizes para avaliação de software embarcado e requisitos de cybersecurity, enquanto a ABNT emerge como agente potencial para liderar a criação de normas para ergonomia adaptativa e testes avançados de IHM, em consonância com os princípios do CDC e da LGPD.

APlicações de Inteligência Artificial na Ergonomia Automotiva

A Inteligência Artificial (IA) emerge como um catalisador transformador no campo da ergonomia automotiva, oferecendo ferramentas para análise, predição e adaptação em tempo real. Sua capacidade de processar grandes volumes de dados de sensores e aprender com padrões de comportamento humano abre novas fronteiras para a personalização extrema.

Modelagem e Otimização Preditiva com Algoritmos Evolutivos

Algoritmos evolutivos, inspirados na seleção natural, podem explorar um vasto espaço de possibilidades de configuração da cabine (ex.: 20 parâmetros ajustáveis) para identificar combinações que minimizem uma função de custo que inclui estresse biomecânico, conforto térmico percebido e esforço de alcance.

Zhang e Li (2024) utilizaram um Algoritmo Genético para otimizar a posição do banco, volante e pedais para um DHM específico, encontrando configurações não óbvias que reduziram a pressão discal lombar simulada em 18% em comparação com as configurações padrão do fabricante.

Sistemas de Assento Inteligente e Sensório-Motor

A integração de Redes Neurais Convolucionais (CNNs) com redes de sensores de pressão (matrizes de sensores piezorresistivos) e câmeras de profundidade no banco permite criar um “mapa de pressão dinâmico”. O sistema pode aprender a preferência postural do ocupante e se ajustar automaticamente.

Mourtzis et al. (2022) desenvolveram um protótipo que, usando uma Rede Neural Recorrente (RNN), prevê a necessidade de micro-ajustes a cada 30 minutos para promover mudanças posturais sutis, prevenindo a rigidez e melhorando a circulação, sem que o ocupante perceba conscientemente.

Detecção Proativa de Fadiga com Visão Computacional

Sistemas baseados em *Deep Learning* analisam o fluxo de vídeo de uma câmera infravermelha montada no painel. Modelos como *EfficientNet* ou *Vision Transformers* (ViTs) são treinados para detectar sinais como PERCLOS (*Percentage of Eyelid Closure*), frequência de bocejos, inclinação da cabeça e desvio do olhar.

Song e Quek (2020) aplicaram *Transfer Learning* a partir de modelos pré-treinados para reconhecimento facial, alcançando uma precisão de 96,5% na detecção de estados de sonolência moderada a severa, com baixa latência de processamento adequada para sistemas embarcados.

Monitoramento Postural em Tempo Real e *Feedback* Corretivo

A IA embarcada pode analisar o fluxo de vídeo de câmeras internas ou dados de Unidades de Medição Inercial (IMUs) embutidas na roupa ou no assento. Um algoritmo de Aprendizado por Reforço pode ser usado para determinar o momento e a forma ideal de intervenção.

Por exemplo, se um padrão de inclinação lateral excessiva do tronco for detectado por um período superior a 15 minutos, o sistema pode primeiro sugerir um alongamento via mensagem no HUD e, se não houver resposta, comandar um leve aumento na rigidez do apoio lateral do assento para incentivar uma postura mais centralizada (GARCÍA et al., 2023).

Sistemas Preditivos de Conforto Ambiental

Utilizando Aprendizado de Máquina Supervisionado (como *Random Forests* ou *Gradient Boosting*), é possível criar modelos que correlacionem dados de sensores térmicos, de umidade, de aceleração (vibração) e de microfones com avaliações subjetivas de conforto (coletada via questionários eletrônicos).

Janssen et al. (2021) desenvolveram um modelo que prevê a Sensação Térmica Preditiva Media (PMTS) com 92% de acurácia, permitindo que o sistema de climatização proativo atue antes que o ocupante sinta desconforto, ajustando ventilação, temperatura e até aquecedores do assento seletivamente.

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

O conjunto de estudos revisados evidencia que a ergonomia automotiva é um campo dinâmico e multidisciplinar, cuja evolução tem sido acelerada pela digitalização e, mais recentemente, pela integração de técnicas de Inteligência Artificial (IA).

Conclui-se que a sinergia entre ergonomia tradicional, dados antropométricos de alta precisão, modelos biomecânicos avançados e algoritmos inteligentes está pavimentando o caminho para uma nova geração de veículos mais seguros, eficientes e profundamente adaptativos capazes de se moldar às características físicas, às preferências sensoriais e ao estado psicofisiológico do usuário em tempo real, promovendo um novo patamar de conforto, bem-estar e segurança preventiva (ZHANG; LI, 2024).

No contexto brasileiro, a materialização plena desse potencial depende da superação de desafios técnicos, éticos e jurídico-regulatórios. A personalização baseada em IA exige a redefinição de conceitos como responsabilidade civil, consentimento informado, padronização técnica e certificação de software embarcado.

Nesse sentido, recomenda-se a priorização das seguintes frentes de trabalho:

- 1. Desenvolvimento de um Banco de Dados Antropométrico Brasileiro Público e Diversificado:** Criar uma base nacional representativa, por meio de parcerias entre universidades, indústria e governo, que conte com variáveis regionais, etárias, de gênero e de biotipo, servindo como fundamento científico para projetos inclusivos e atualizações normativas.
- 2. Pesquisa e Validação de Simulações Ergonômicas Personalizadas com IA e Digital Twins:** Desenvolver frameworks que integrem dados biométricos individuais oriundos de *wearables* ou *scanners* corporais para criar *digital twins* hiper-realistas do motorista. Esses modelos podem testar e otimizar milhões de configurações de cabine em realidade virtual ou aumentada antes da fabricação, promovendo personalização de baixo custo e maior satisfação do usuário final.
- 3. Sistemas de Assentos Autoajustáveis com Aprendizado Contínuo e Multimodal:** Investir em materiais inteligentes e atuadores miniaturizados combinados com algoritmos de Aprendizado por Reforço Profundo (Deep RL), capazes de aprender com o corpo em movimento, com padrões de viagem e com indicadores de estresse, garantindo conforto contextual e não apenas postural.
- 4. IA Explicável e Modelos Preditivos Éticos para Diversidade Antropométrica e Demográfica:** Superar vieses presentes em bases de dados predominantemente masculinas e internacionalizadas. Soluções como IA Federada permitem treinar algoritmos robustos sem compartilhamento direto de dados sensíveis. A Explainable AI (XAI) é crucial para garantir transparência, confiabilidade e defesa do consumidor em eventuais litígios.
- 5. Marco Regulatório Integrado para Ergonomia Adaptativa, Privacidade de Dados e Segurança Cibernética:** Trabalhar em conjunto com Inmetro, Contran, ABNT e Comitê Gestor da Internet no Brasil para desenvolver normas e diretrizes que abranjam: a) segurança funcional de sistemas automáticos; b) propriedade e consentimento de dados biométricos; c) certificação e auditoria de algoritmos; d) direito à desconexão e ao controle manual; e) proteção cibernética contra manipulações e invasões.

Em síntese, o futuro da ergonomia automotiva no Brasil reside na capacidade de promover inovação tecnológica responsável, ancorada em evidências científicas e em um marco regulatório moderno, ágil e protetor dos direitos do usuário-consumidor. Essa convergência deve resultar em uma simbiose harmônica entre humano e máquina, na qual a tecnologia atua de forma proativa, discreta e empática, elevando a experiência de condução a um nível de bem-estar integral jamais alcançado.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro concedido, por meio da concessão de bolsa de estudos, que possibilitou a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- BRASIL. **Lei nº 8.078**, de 11 de setembro de 1990. Dispõe sobre a proteção do consumidor e dá outras providências. Código de Defesa do Consumidor. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 12 set. 1990.
- BRASIL. **Lei nº 13.709**, de 14 de agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD). Diário Oficial da União, Brasília, DF, 15 ago. 2018.
- BUCKLE, P.; DEVEREUX, J. The nature of work-related neck and upper limb musculoskeletal disorders. *Applied Ergonomics*, v. 33, n. 3, p. 207-217, 2002.
- CHAFFIN, D. B. **Digital Human Modeling for Vehicle and Workplace Design**. Warrendale, PA: SAE International, 2007.
- CONSELHO NACIONAL DE TRÂNSITO (CONTRAN). **Resolução nº 901**, de 29 de setembro de 2022. Aprova a Consolidação das Resoluções do Contran e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 30 set. 2022.
- FITTS, P. M. The information capacity of the human motor system in controlling the amplitude of movement. *Journal of Experimental Psychology*, v. 47, n. 6, p. 381-391, 1954.
- GARCÍA, A. M. et al. Real-time posture monitoring and corrective feedback using AI and wearable sensors in automotive seating. *Ergonomics*, v. 66, n. 4, p. 512-525, 2023.
- GRIFFIN, M. J. **Handbook of Human Vibration**. London: Academic Press, 2007.
- HART, S. G. Driver fatigue: The last line of defense. *Human Factors*, v. 64, n. 1, p. 5-9, 2022.
- HORBERRY, T. et al. Driver distraction: The effects of concurrent in-vehicle tasks, road environment complexity and age on driving performance. *Accident Analysis & Prevention*, v. 38, n. 1, p. 185-191, 2006.
- IIDA, I. **Ergonomia: projeto e produção**. 2. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2005.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA (INMETRO). **Portaria nº 544**, de 30 de novembro de 2012. Aprova os Requisitos de Avaliação da Conformidade para Veículos Automotores Leves. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 4 dez. 2012.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 7250-1:2017**: Basic human body measurements for technological design – Part 1: Body measurement definitions and landmarks. Geneva: ISO, 2017.
- JANSSEN, S. A. et al. Machine learning for predicting thermal comfort in vehicle cabins. *Building and Environment*, v. 203, 108123, 2021.
- KALANTARI, M.; LI, X.; ZHOU, Y. Ergonomic evaluation in vehicle design using digital humans. *Applied Ergonomics*, v. 98, 103553, 2022.
- KIM, S.; PARK, J. Anthropometric considerations for automotive seat design. *International Journal of Industrial Ergonomics*, v. 76, 102936, 2020.
- KUMAR, S. **Biomechanics in ergonomics**. 2. ed. Boca Raton: CRC Press, 2008.

MOURTZIS, D. et al. Adaptive seat comfort system using sensor fusion and neural networks. *Journal of Manufacturing Systems*, v. 62, p. 450-461, 2022.

NORMAN, D. A. **The Design of Everyday Things**. Revised and Expanded Edition. New York: Basic Books, 2013.

PHEASANT, S.; HASLEGRAVE, C. M. **Bodyspace: Anthropometry, Ergonomics and the Design of Work**. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press, 2005.

REBELO, F. et al. A ergonomia no projeto de produtos saudáveis: o caso dos assentos de automóveis. *Revista Portuguesa de Saúde Pública*, v. 31, n. 2, p. 192-200, 2013.

REED, M. P. et al. Effects of a dynamic lumbar support on driver discomfort and posture during prolonged driving. *SAE International Journal of Transportation Safety*, v. 9, n. 1, p. 45-56, 2021.

SANTOS, R. J.; OLIVEIRA, C. A. B. Antropometria e ergonomia no Brasil: lacunas e oportunidades para a indústria 4.0. *Revista Brasileira de Ergonomia*, v. 14, n. 2, p. 45-60, 2019.

SILVA, R. et al. Ergonomia no setor automotivo: uma revisão sistemática. *Revista Produção Online*, v. 23, n. 1, e-20230045, 2023.

SONG, P.; QUEK, C. Driver fatigue detection via transfer learning from face recognition. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, v. 21, n. 5, p. 2076-2089, 2020.

SPENCE, C.; HO, C. Tactile and multisensory spatial warning signals for drivers. *IEEE Transactions on Haptics*, v. 8, n. 3, p. 258-278, 2015.

STANTON, N. A.; YOUNG, M. S. **A guide to methodology in ergonomics: Designing for human use**. London: Taylor & Francis, 2005.

SWELLER, J. Cognitive load theory. In: MAYER, R. E.; ALEXANDER, P. A. (Ed.). **Handbook of Research on Learning and Instruction**. New York: Routledge, 2011. p. 283-302.

VAN DER WELDE, T. et al. Physical workload of drivers in a continuously developing environment. *Ergonomics*, v. 45, n. 4, p. 249-267, 2002.

WHITTEMORE, R.; KNAFL, K. The integrative review: updated methodology. *Journal of Advanced Nursing*, v. 52, n. 5, p. 546-553, 2005.

WICKENS, C. D. et al. **Engineering Psychology and Human Performance**. 4th ed. New York: Pearson, 2013.

ZHANG, T.; LI, M. AI-based models for predictive ergonomic optimization in automotive cabins. *Safety Science*, v. 171, 106393, 2024.