ReGeo ISSN: 2177-3246

ANÁLISE DOS FATORES HUMANOS E DA NEUROERGONOMIA COGNITIVA EM AMBIENTES CONSTRUÍDOS E SISTEMAS OPERACIONAIS CRÍTICOS

ANALYSIS OF HUMAN FACTORS AND COGNITIVE NEUROERGONOMICS IN BUILT ENVIRONMENTS AND CRITICAL OPERATIONAL SYSTEMS

ANÁLISIS DE LOS FACTORES HUMANOS Y DE LA NEUROERGONOMÍA COGNITIVA EN ENTORNOS CONSTRUIDOS Y SISTEMAS OPERATIVOS CRÍTICOS

https://doi.org/10.56238/revgeov17n10-178

Data de submissão: 24/09/2026 **Data de publicação:** 24/10/2026

Adriana de Souza Nascimento
Pós-Doutora - Programa de Pós Graduação em Arquitetura e Urbanismo - PPGAU (UFPB)
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: adriananascimento.eng@gmail.com
Orcid: 0000-0002-6255-6763
Lattes: http://lattes.cnpq.br/0870774214310347

Miguel Otávio Barreto Campelo de Melo
Doutor em Engenharia de Produção
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: mobcmelo@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-2741-8111
Lattes: http://lattes.cnpq.br/6574752686951382

Nelson Torro Alves
Doutor em Psicobiologia
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: nelsontorro@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3678-5762
Lattes: http://lattes.cnpq.br/8037098495288980

Erivaldo Lopes de Souza
Doutorando - PPGECAM (UFPB)
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: elopesouza@gmail.com
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7098-9438
Lattes: http://lattes.cnpq.br/2508230134490458

Angelina Dias Leão Costa
Doutora em Engenharia Civil
Instituição: Universidade Federal da Paraíba (UFPB)
E-mail: angelinadlcosta@yahoo.com.br
Orcid: https://orcid.org/0000-0002-9920-0533
Lattes: http://lattes.cnpq.br/0858389049571757

RESUMO
Os estudos em ergonomia e fatores humanos no trabalho estão cada vez mais relacionados à interação entre pessoas, ambientes físicos e tarefas operacionais complexas. É analisada a percepção sob a

perspectiva da neuroergonomia cognitiva em ambientes construídos examinando as relações entre espaço e a cognição e em sistemas operacionais críticos, incluindo centros de controle de tráfego aéreo e de controle de energia elétrica. O estudo envolveu 27 participantes na Espanha, Portugal e Brasil. As medições foram realizadas utilizando um aparelho portátil de eletroencefalografia (EEG) para monitorar seis variáveis relacionadas a estados cognitivos: Interesse; Concentração; Estímulo; Estresse; Relaxamento e Atenção. Os estudos demonstram o potencial do EEG como ferramenta para investigar processos neuroergonômicos cognitivos e emocionais, contribuindo para o desenvolvimento de ambientes mais inclusivos e com mais segurança operacional.

Palavras-chave: Fatores Humanos. Neuroergonomia Cognitiva. Eletroencefalografia (EEG).

ABSTRACT

Studies on ergonomics and human factors in the workplace are increasingly focused on the interaction between people, physical environments, and complex operational tasks. Perception is analyzed from the perspective of cognitive neuroergonomics in built environments—examining the relationship between space and cognition—and in critical operational systems, such as air traffic control and electric power control centers. The study involved 27 participants across Spain, Portugal, and Brazil. Measurements were taken using a portable electroencephalography (EEG) device to monitor six variables related to cognitive states: interest, concentration, arousal, stress, relaxation, and attention. Studies demonstrate the potential of EEG as a tool for investigating cognitive and emotional neuroergonomic processes, contributing to the development of environments that are more inclusive and offer greater operational safety.

Keywords: Human Factors. Cognitive Neuroergonomics. Electroencephalography (EEG).

RESUMEN

Los estudios sobre ergonomía y factores humanos en el trabajo están cada vez más relacionados con la interacción entre personas, entornos físicos y tareas operativas complejas. Se analiza la percepción desde la perspectiva de la neuroergonomía cognitiva en entornos construidos —examinando las relaciones entre el espacio y la cognición y en sistemas operativos críticos, incluidos los centros de control de tráfico aéreo y de control de energía eléctrica. El estudio contó con la participación de 27 personas en España, Portugal y Brasil. Las mediciones se realizaron utilizando un dispositivo portátil de electroencefalografía (EEG) para monitorear seis variables relacionadas con estados cognitivos: interés, concentración, estímulo, estrés, relajación y atención. Los estudios demuestran el potencial del EEG como herramienta para investigar procesos neuroergonómicos cognitivos y emocionales, contribuyendo al desarrollo de entornos más inclusivos y con mayor seguridad operacional

Palabras clave: Factores Humanos. Neuroergonomía Cognitiva. Electroencefalografía (EEG).

1 INTRODUÇÃO

As transformações tecnológicas e organizacionais ocorridas nas últimas décadas têm modificado significativamente a relação entre trabalhadores, tecnologias, tarefas e ambientes de trabalho. A crescente automação, digitalização e complexificação dos sistemas sociotécnicos tem deslocado parte das demandas tradicionalmente associadas ao esforço físico para atividades que envolvem monitoramento contínuo, processamento de informações, atenção, tomada de decisão e gerenciamento de situações imprevistas. Nesse contexto, compreender a interação entre pessoas, tecnologias, tarefas e ambientes torna-se fundamental para a investigação dos fatores humanos envolvidos no trabalho, especialmente em atividades nas quais as demandas cognitivas assumem papel central.

A Ergonomia e os Fatores Humanos têm ampliado seu campo de investigação ao considerar, além das características físicas e organizacionais do trabalho, os processos cognitivos envolvidos na interação entre indivíduos, tecnologias e ambientes. Nesse contexto, a Neuroergonomia Cognitiva constitui uma abordagem interdisciplinar que integra conhecimentos das Neurociências, Ergonomia, Engenharia e Fatores Humanos para compreender os mecanismos cognitivos envolvidos na interação humana com tecnologias, tarefas e ambientes de trabalho. A abordagem neuroergonômica possibilita investigar processos relacionados à atenção, memória, resolução de problemas e desempenho humano, especialmente diante das transformações decorrentes da incorporação de novas tecnologias aos sistemas de trabalho. Essa perspectiva amplia a investigação para além de condições experimentais estritamente controladas, permitindo considerar o funcionamento humano em situações próximas às condições reais de interação com sistemas complexos (Cañas *et al*., 2022).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Entre os aspectos relevantes para a compreensão do desempenho humano encontra-se a carga de trabalho mental e física. Em contextos nos quais as demandas cognitivas são elevadas, os indivíduos precisam processar grandes volumes de informações, manter níveis adequados de atenção e tomar decisões em intervalos reduzidos de tempo. A carga mental pode, portanto, constituir um importante fator relacionado ao desempenho, especialmente em atividades que envolvem supervisão, monitoramento e tomada de decisão. Salles (2008) destaca a relevância da análise das demandas associadas ao trabalho e de seus efeitos sobre o indivíduo, considerando a interação entre características da tarefa e capacidades humanas. Nessa perspectiva, a investigação dos estados cognitivos torna-se particularmente relevante em atividades nas quais alterações na atenção, fadiga, carga mental ou capacidade de processamento podem repercutir sobre a execução das tarefas.

Essa questão assume especial relevância nos Ambientes Operacionais Críticos, caracterizados pela elevada complexidade sociotécnica, intensa interação humano-tecnologia e consequências potencialmente significativas decorrentes de falhas operacionais. Os Centros de Operação e Controle de Energia Elétrica e os Centros de Controle de Tráfego Aéreo constituem exemplos desses ambientes, nos quais atividades de monitoramento contínuo, detecção de anomalias, coordenação e tomada de decisão ocorrem sob condições de elevada pressão temporal e baixa tolerância ao erro (Mohammadian *et al*., 2022; Ji *et al.,* 2025). Nesses contextos, tanto a sobrecarga quanto a subcarga cognitiva podem comprometer o desempenho humano e aumentar o risco de falhas operacionais, com potenciais impactos econômicos, sociais e de segurança (Almukhtar *et al*., 2024).

Os setores de energia elétrica e de tráfego aéreo dependem, portanto, de operadores capazes de monitorar sistemas altamente automatizados, processar grandes volumes de informação e tomar decisões em tempo real. Nas últimas décadas, a crescente digitalização e automação desses ambientes reduziram parte das exigências físicas do trabalho, mas ampliaram demandas relacionadas à supervisão, diagnóstico, antecipação e gerenciamento de situações anormais (Gualtieri *et al*., 2024; Luzzani *et al*., 2025). Em operadores de centros de controle, a carga mental apresenta-se particularmente relevante em atividades de supervisão e resposta a condições anormais, sendo a atenção sustentada e a memória de trabalho algumas das funções cognitivas sensíveis às demandas da atividade (Ghalenoei *et al*., 2021). Nesses sistemas, é importante destacar que uma interface homem-computador (IHC) confusa pode levar a interpretações errôneas e induzir erros durante a tomada de decisões (Cañas *et al.*, 2020; Cacioppo *et al.*, 2012).

Nesse cenário, a Neuroergonomia Cognitiva tem incorporado medidas neurofisiológicas como recursos para investigar estados mentais relacionados à carga de trabalho, fadiga cognitiva, atenção e desempenho operacional (Cañas *et al*., 2019; Ayaz *et al*., 2020). Entre essas medidas, o eletroencefalograma (EEG) apresenta potencial para investigar processos cognitivos em situações próximas às condições naturais de atividade, especialmente com o desenvolvimento de sistemas portáteis que possibilitam maior mobilidade durante a coleta. Estudos sobre Neuroergonomia destacam justamente a importância de aproximar a investigação neurofisiológica das condições reais de trabalho, considerando tanto as possibilidades quanto as limitações metodológicas das medidas realizadas fora do laboratório (Wascher *et al.,* 2021).

A utilização de EEG portátil, entretanto, não se restringe aos sistemas operacionais críticos. A perspectiva neuroergonômica também pode ser aplicada à investigação da relação entre indivíduos e ambientes construídos, considerando que os espaços nos quais as atividades humanas são realizadas constituem parte do contexto de interação pessoa–ambiente. Nesse campo de investigação, a

aproximação entre arquitetura, neurociência e fatores humanos tem possibilitado examinar como características dos ambientes podem estar relacionadas à percepção, experiência, cognição e respostas afetivas dos indivíduos (Parasuraman, 2011; Mehta *et al.*,2013). Estudos de neuroarquitetura, por exemplo, têm empregado EEG e outras técnicas neurofisiológicas para investigar a atividade cerebral durante a experiência de espaços arquitetônicos, inclusive em situações nas quais os participantes exploram os ambientes de maneira ativa.

As características ambientais também podem participar da experiência dos indivíduos em espaços construídos. Temperatura, iluminação, acústica e qualidade do ar, por exemplo, relacionam-se a aspectos do bem-estar e do desempenho cognitivo (Kim, 2025; Wang *et al.* 2024, 2022). Da mesma forma, elementos como iluminação, cor, forma, proporção e acessibilidade podem participar da experiência espacial e relacionar-se a estados mentais associados à atenção, ao estresse, ao relaxamento e à carga cognitiva (Villarouco *et al.,* 2021, De Paiva, 2028, 2019). Estudos recentes também têm investigado relações entre características dos ambientes e processos como concentração, criatividade e eficiência no trabalho (Chen *et al*., 2025; Cho *et al.*, 2025). Assim, compreender a experiência humana no ambiente construído requer considerar não apenas avaliações subjetivas, mas também possibilidades de mensuração de respostas fisiológicas e neurofisiológicas.

O emprego da EEG tem contribuído para ampliar essa investigação, possibilitando o registro da atividade cerebral durante experiências espaciais e situações próximas às condições cotidianas. (Karakaş *et al.*, 2020, Karandinou *et al*.,2017), por exemplo, investigaram a atividade cerebral de participantes durante deslocamentos por espaços urbanos utilizando EEG portátil, buscando relacionar características do ambiente físico a padrões de atividade cerebral. Outros estudos também demonstraram a possibilidade de utilização de EEG móvel durante a exploração de espaços arquitetônicos, aproximando a investigação neurofisiológica das condições naturais de percepção e interação com o ambiente (Vartanian *et al*., 2017). Nesse sentido, a utilização de dispositivos móveis pode favorecer maior validade ecológica das investigações, embora também envolva desafios relacionados à qualidade do sinal, à variabilidade individual e à interpretação das métricas neurofisiológicas.

A aproximação entre ambientes construídos e sistemas operacionais críticos permite, portanto, considerar diferentes configurações de interação entre pessoa, ambiente, tarefa e tecnologia. Embora esses contextos apresentem características distintas, ambos envolvem indivíduos inseridos em ambientes específicos, realizando atividades que demandam diferentes combinações de atenção, processamento de informações, percepção e tomada de decisão. Nos sistemas operacionais críticos, essas demandas estão associadas principalmente ao monitoramento, supervisão e gerenciamento de

situações que exigem elevada confiabilidade operacional. Nos ambientes construídos, por sua vez, aspectos espaciais e sensoriais podem participar da experiência, da percepção e das respostas humanas durante a realização de atividades. A perspectiva dos Fatores Humanos e da Neuroergonomia Cognitiva permite, assim, investigar o indivíduo em interação com diferentes configurações ambientais e sociotécnicas.

No contexto dos Centros de Operação e Controle de Energia Elétrica, os operadores atuam diante de sistemas compostos por painéis, monitores e interfaces que apresentam grande quantidade de informações relacionadas ao funcionamento da rede elétrica. O operador ocupa posição central no processo de supervisão e tomada de decisão, necessitando interpretar informações provenientes de diferentes fontes, identificar alterações no sistema e responder às demandas operacionais. A complexidade desses ambientes torna relevante a investigação das relações entre as características da atividade, as demandas cognitivas e as respostas humanas.

De maneira semelhante, os Centros de Controle de Tráfego Aéreo constituem ambientes nos quais os operadores supervisionam e coordenam o movimento de aeronaves, buscando garantir a segurança, eficiência e regularidade do tráfego aéreo. Entre suas atividades estão o monitoramento das aeronaves, a comunicação com pilotos, o gerenciamento do tráfego em solo, a coordenação das rotas de voo e a prevenção de conflitos. Essas atividades requerem atenção contínua, processamento de informações e tomada de decisão em condições nas quais a precisão e a temporalidade das respostas são relevantes.

Apesar dos avanços na investigação dos fatores humanos, da Neuroergonomia Cognitiva e da utilização de EEG em situações reais ou próximas às condições naturais, ainda permanece relevante compreender como diferentes configurações ambientais e de atividade podem ser investigadas por meio de medidas neurofisiológicas em contextos distintos. A literatura demonstra, de um lado, o potencial do EEG móvel para estudos de trabalho e avaliação de ambientes e, de outro, sua aplicação na investigação da experiência em espaços arquitetônicos. Entretanto, a articulação desses diferentes contextos sob uma perspectiva comum de Fatores Humanos e Neuroergonomia Cognitiva ainda demanda investigações que considerem as especificidades das atividades e dos ambientes analisados.

Diante desse contexto, o problema central desta pesquisa consiste em compreender como a abordagem da Neuroergonomia Cognitiva, por meio da utilização de eletroencefalografia portátil, pode contribuir para a investigação das respostas humanas em diferentes configurações ambientais e de atividade, contemplando ambientes construídos e sistemas operacionais críticos.

A partir desse problema, estabelecem-se as seguintes questões norteadoras: (1) quais padrões podem ser observados nas métricas disponibilizadas pelo sistema EmotivPRO nos diferentes contextos

investigados? (2) quais associações podem ser identificadas entre essas métricas durante as atividades realizadas nos diferentes ambientes? e (3) quais possibilidades e limitações podem ser observadas na utilização da EEG portátil como recurso de investigação dos fatores humanos e da Neuroergonomia Cognitiva em diferentes configurações de interação pessoa–ambiente–tarefa–tecnologia?

Diante disso, o presente estudo teve como objetivo investigar, sob a perspectiva dos Fatores Humanos e da Neuroergonomia Cognitiva, respostas neurofisiológicas associadas a diferentes experiências de interação pessoa–ambiente, por meio da utilização de eletroencefalografia portátil em ambientes construídos e sistemas operacionais críticos.

Especificamente, busca-se: (i) analisar as métricas disponibilizadas pelo sistema EmotivPRO relacionadas à atenção, concentração/engajamento, estímulo/excitação, interesse, relaxamento e estresse nos diferentes contextos investigados; (ii) examinar as associações entre essas métricas e suas possíveis relações com as características das atividades e dos ambientes; e (iii) discutir o potencial e as limitações da utilização da EEG portátil como recurso de investigação dos fatores humanos e da Neuroergonomia Cognitiva em diferentes configurações de trabalho e interação humano-ambiente.

3 METODOLOGIA

Para responder a essas questões, o estudo reúne dados de 27 participantes investigados em diferentes contextos na Espanha, em Portugal e no Brasil, contemplando ambientes construídos e sistemas operacionais críticos relacionados ao controle de tráfego aéreo e à operação e controle de energia elétrica. As avaliações foram realizadas com equipamento portátil de eletroencefalografia, utilizando métricas disponibilizadas pelo sistema EmotivPRO relacionadas a estados cognitivos e afetivos. A articulação desses diferentes contextos possibilita discutir, de maneira exploratória, o potencial da abordagem neuroergonômica para a compreensão das respostas humanas diante de distintas configurações ambientais, tecnológicas e operacionais.

As definições das métricas analisadas neste estudo foram as seguintes:

1- Atenção: a capacidade do indivíduo de manter o foco em uma tarefa e ignorar distrações;

2- Concentração (Engajamento): mede o nível de imersão do indivíduo no que está fazendo ou vivenciando;

3- Excitação: uma medida da estimulação mental do indivíduo;

4- Interesse: mede o grau em que um indivíduo gosta ou não de algo;

5- Relaxamento: a capacidade do indivíduo de se desconectar e alcançar um estado mental de calma;

6- Estresse: o nível de conforto do indivíduo em relação ao desafio que está enfrentando no momento;

O manuscrito reúne dois estudos empíricos desenvolvidos sob a perspectiva dos Fatores Humanos e da Neuroergonomia Cognitiva, realizados em diferentes configurações de interação pessoa–ambiente–tarefa–tecnologia. O Estudo 1 investigou a interação com o ambiente construído em uma Biblioteca Central, contemplando diferentes condições espaciais e de acessibilidade. O Estudo 2 contemplou ambientes operacionais críticos, envolvendo participantes vinculados a Centros de Controle de Tráfego Aéreo (ATC) e Centros de Controle e Operação de Energia Elétrica.

Embora os dois estudos tenham utilizado eletroencefalografia (EEG) móvel e métricas disponibilizadas pelo sistema EmotivPRO, eles apresentam delineamentos, contextos experimentais, participantes e procedimentos éticos específicos. Assim, os estudos são descritos nas subseções a seguir.

Trata-se de uma investigação empírica desenvolvida no campo dos Fatores Humanos e da Neuroergonomia Cognitiva, abrangendo dois contextos de interação entre pessoas, ambientes, tarefas e tecnologias: o ambiente construído e os sistemas operacionais críticos. O primeiro compreendeu a interação de participantes com diferentes condições de mobilidade com os espaços e recursos de acessibilidade de uma Biblioteca Central. O segundo contemplou atividades relacionadas ao controle de tráfego aéreo (*Air Traffic Control* — ATC) e ao controle e à operação de energia elétrica, considerando as demandas da atividade humana em ambientes operacionais complexos. Em ambos os contextos, foram utilizados registros de eletroencefalografia (EEG) móvel e métricas disponibilizadas pelo *software* EmotivPRO para explorar padrões e associações relacionados à interação dos participantes com os ambientes e às atividades investigadas. Nos procedimentos relacionados ao controle de tráfego aéreo, foi utilizado o *software ATC-labAdvanced* (Fothergill *et al*., 2009) como recurso para a realização das atividades experimentais.

3.1 AMOSTRA

Participaram da investigação 27 indivíduos, distribuídos entre dois contextos de pesquisa: participantes envolvidos na investigação sobre o ambiente construído e participantes vinculados a centros de controle de tráfego aéreo e de controle e operação de energia elétrica. No contexto do ambiente construído. A composição desse grupo contemplou participantes com diferentes condições de mobilidade, permitindo explorar experiências distintas de interação com o ambiente e seus recursos de acessibilidade.

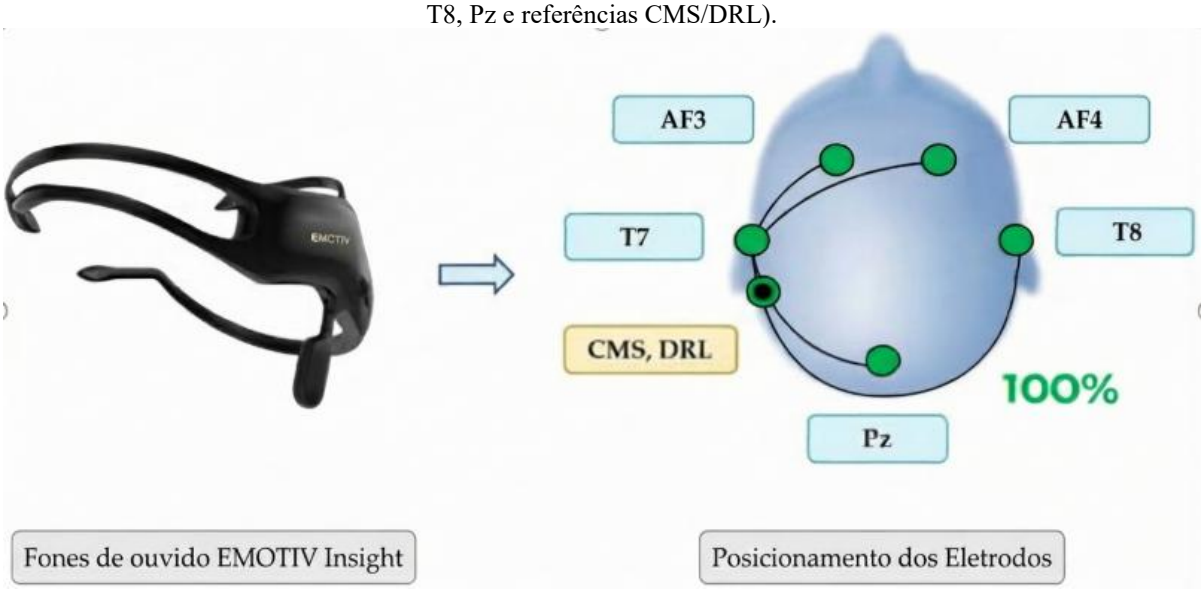
Os participantes vinculados aos centros de controle foram recrutados por meio de convites institucionais e contatos com os respectivos centros, com participação voluntária. Esse grupo abrangeu profissionais de contextos operacionais relacionados ao controle de tráfego aéreo e ao controle e à operação de energia elétrica, em localidades de Granada, na Espanha; Lisboa e Porto, em Portugal; e João Pessoa e Recife, no Brasil.

3.2 INSTRUMENTO DE COLETA

A atividade eletroencefalográfica foi registrada por meio do *headset* móvel *Emotiv Insight*, composto por cinco canais posicionados em AF3, AF4, T7, T8 e Pz, de acordo com o sistema internacional 10-20 de posicionamento de eletrodos. O equipamento apresenta taxa nominal de amostragem de 128 Hz, conforme as especificações do fabricante. O dispositivo foi utilizado nos dois contextos investigados: na interação dos participantes com o ambiente construído e nas atividades relacionadas aos centros de controle de tráfego aéreo e de controle e operação de energia elétrica.

As Figuras 1 e 2 mostram as funções de Canal do Sensor e Localização Cerebral do EEG Emotiv.

Figura 1. EEG Emotiv Insight - Sistema internacional 10-20 de posicionamento de eletrodos (AF3, AF4, T7, T8, Pz e referências CMS/DRL).

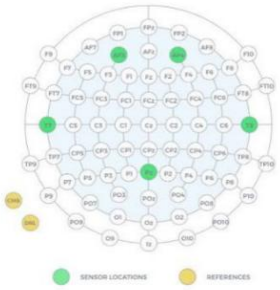


Fonte: Emotiv, 2029

O registro e o acompanhamento da qualidade dos sinais foram realizados com o software *EmotivPRO*, que disponibiliza seis métricas de performance: Atenção *(At),* Engajamento *(En),* Excitação *(Ex),* Interesse, *(In),* Relaxamento *(Re)* e Estresse *(St)*. Essas métricas foram consideradas

índices algorítmicos gerados pelo sistema, relacionados a aspectos de atenção, engajamento, excitação, interesse, relaxamento e estresse.

Figure 2. Funções de Canal do Sensor e Localização Cerebral do EEG Emotiv



Canal do Sensor	Função
AF3	Atenção
AF4	Julgamento
T7	Memória Verbal
T8	Memória Emocional
O	Processamento Visual

Fonte: Elaboração própria

Nas atividades relacionadas ao controle de tráfego aéreo, utilizou-se também o *software Air Traffic Control ATC-labAdvanced*, descrito por Fothergill *et al*. (2009), como recurso para a realização das atividades experimentais. Esse instrumento foi específico desse contexto, enquanto o equipamento *Emotiv Insight* e o *software EmotivPRO* foram utilizados nos diferentes contextos investigados.

3.3 TIPOS E PROCEDIMENTOS DE COLETA DE DADOS

No contexto do ambiente construído, os procedimentos de coleta foram orientados pela técnica *walkthrough*, utilizada na avaliação de ambientes construídos para examinar a interação entre usuários e espaço (Rheingantz *et al*., 2009). Antes do percurso pela Biblioteca Central, cada participante realizou dois registros de eletroencefalografia (EEG) em condição de repouso, com duração de cinco minutos cada: um com os olhos abertos, mantendo a fixação em um ponto visual, e outro com os olhos fechados, em repouso silencioso. Em seguida, foi realizada a calibração do equipamento, com duração aproximada de cinco a dez minutos. A utilização dessas condições de repouso permite estabelecer uma linha de base para diferenciação entre padrões cerebrais espontâneos e respostas neurofisiológicas associadas a estímulos ambientais (Wang *et al*., 2024, 2022). Posteriormente, iniciou-se o registro contínuo durante um percurso livre pelo ambiente, adaptado às condições de mobilidade de cada participante e às características dos espaços e recursos de acessibilidade disponíveis.

Nos contextos operacionais críticos, os registros de EEG foram realizados durante atividades relacionadas ao controle de tráfego aéreo e ao controle e à operação de energia elétrica, respeitando as particularidades de cada ambiente. No contexto de tráfego aéreo, utilizou-se o software de simulação *ATC-labAdvanced* (Fothergill *et al*., 2009) para a realização das atividades previstas no protocolo de pesquisa. No setor elétrico, as medições foram realizadas em ambiente operacional real, em dois

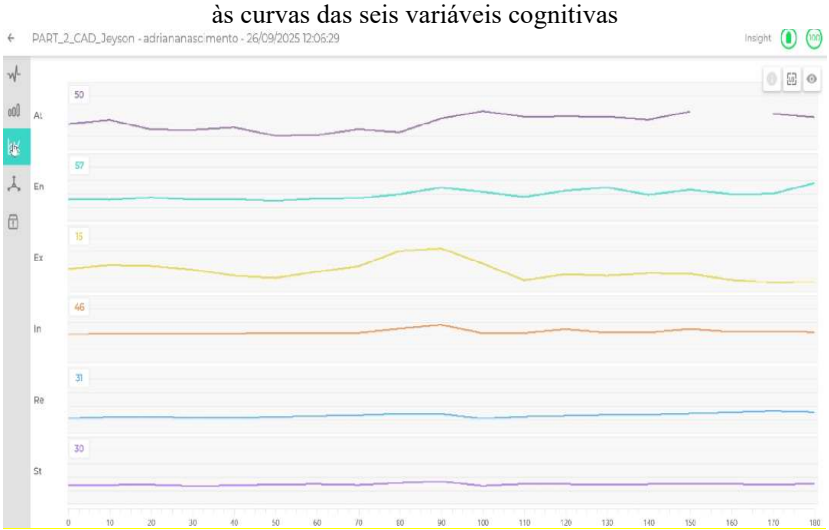
momentos: antes e após o turno de trabalho. Em ambos os contextos, a atividade eletroencefalográfica foi registrada com o equipamento *Emotiv Insight*, e os sinais foram acompanhados por meio do *software EmotivPRO*.

A participação na investigação foi voluntária, e todos os 27 participantes assinaram o Termo de Consentimento Livre e Esclarecido (TCLE). A investigação foi aprovada pelo Comitê de Ética em Pesquisa com Seres Humanos, sob Parecer nº 7.812.771. e sob Parecer nº 3.354.144, associado ao Certificado de Apresentação para Apreciação Ética (CAAE) nº 08034018.6.0000.5188.

3.4 PROCEDIMENTOS DE ANÁLISE DE DADOS

Os dados provenientes dos registros de eletroencefalografia (EEG) foram processados por meio do software EmotivPRO e organizados para análise, considerando as seis métricas disponibilizadas pelo sistema. Os valores dessas métricas são apresentados na saida do Emotiv 5 em uma escala numérica que varia de 0 a 100. Esses indicadores são obtidos por meio do processamento matemático de sinais eletroencefalográficos, incluindo técnicas de análise espectral. Esse procedimento possibilita identificar a potência espectral das principais bandas de frequência cerebral associadas a diferentes estados cognitivos. A Figura 3 mostra os gráficos das medições típicas de EEG correspondentes às curvas das seis variáveis cognitivas.

Figura 3. Gráficos dos valores médios das medições típicas de EEG correspondentes às curvas das seis variáveis cognitivas



Fonte: Elaboração própria

No contexto do ambiente construído, os dados exportados pelo *EmotivPRO* foram inicialmente organizados em planilhas do *Microsoft Excel* e, posteriormente, analisados no *software* estatístico R. As associações entre as seis métricas foram examinadas por meio do coeficiente de correlação de

Spearman. Também foram investigadas as associações entre o tempo de percurso e cada uma das métricas. Considerando a estrutura de medidas repetidas, foram empregados modelos lineares mistos para incorporar a dependência entre observações do mesmo participante e a variabilidade interindividual.

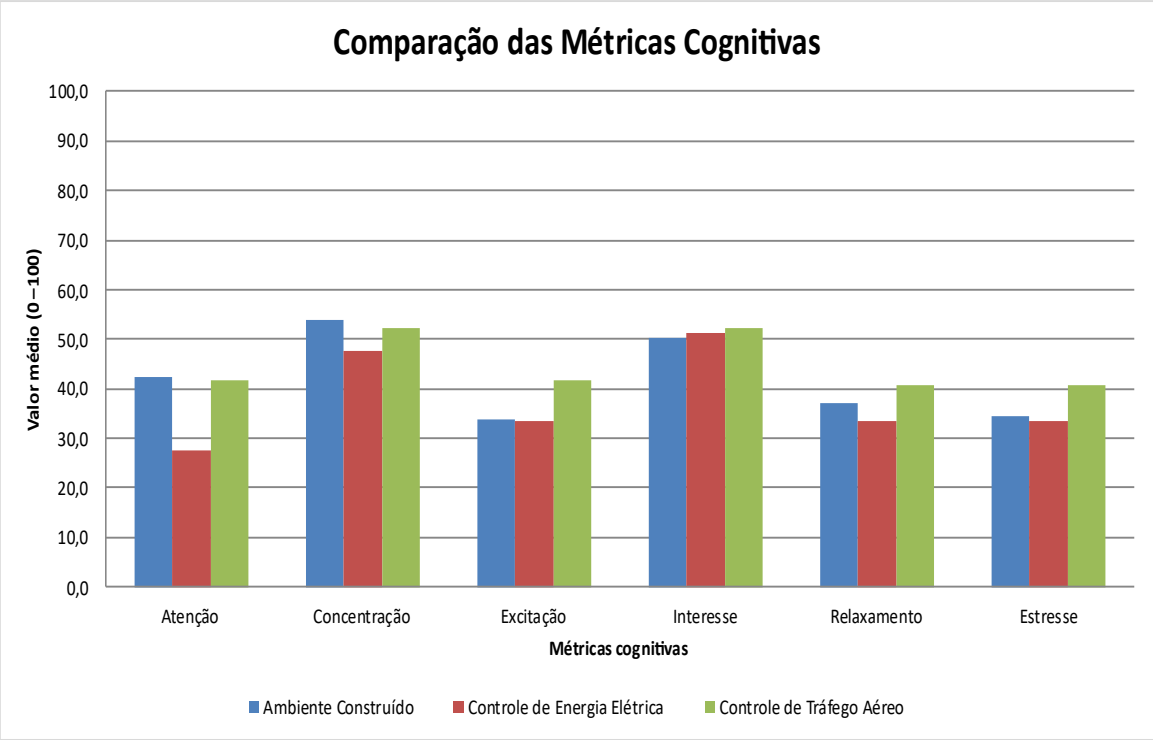
Nos contextos operacionais críticos, a análise considerou as especificidades das atividades e dos procedimentos de coleta. No controle de tráfego aéreo, foram considerados os registros obtidos durante atividades realizadas em ambiente de simulação. No setor elétrico, foram considerados os registros obtidos antes e após o turno de trabalho. A interpretação dos indicadores levou em conta as particularidades dos contextos investigados e a natureza algorítmica das métricas disponibilizadas pelo EmotivPRO, que foram tratadas como indicadores exploratórios, sem interpretação clínica ou diagnóstica.

Os valores dessas métricas são apresentados na saida do Emotiv 5 em uma escala numérica que varia de 0 a 100. Esses indicadores são obtidos por meio do processamento matemático de sinais eletroencefalográficos, incluindo técnicas de análise espectral. Esse procedimento possibilita identificar a potência espectral das principais bandas de frequência cerebral associadas a diferentes estados cognitivos

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na Figura 4 são apresentadas as medições típicas obtidas com o EEG, incluindo as métricas cognitivas dos operadores dos Centros de Operação de Energia e Tráfego Aéreo e a avaliação do ambiente construído. Os gráficos mostram os valores médios de intensidade para as seis variáveis cognitivas: Atenção, Concentração (Engajamento), Excitação, Interesse, Relaxamento e Estresse. Os valores são expressos em uma escala de 1 a 100, permitindo a comparação entre as variáveis cognitivas.

Figura 4. Medições obtidas com o EEG, incluindo as métricas cognitivas dos operadores dos Centros de Operação de Energia e Tráfego Aéreo e a avaliação do ambiente construído



Fonte: Elaboração Própria

Ao analisar a Figura 4, observa-se que, para as métricas da variável cognitiva, os valores registrados nos Centros de Controle de Tráfego Aéreo são consistentemente superiores aos observados nos Centros de Energia Elétrica, com destaque para a Atenção, que apresentou um aumento de 50%, e o Estresse, com 32%. Em relação ao ambiente construído, os valores para a variável Concentração são mais elevados do que os observados nos Centros de Energia Elétrica e de Controle de Tráfego Aéreo.

Os resultados estatísticos indicaram que a experiência do ambiente construído é processada de maneira integrada no sistema neurocognitivo. As métricas analisadas não se comportaram de forma independente, sugerindo que o cérebro responde ao ambiente arquitetônico por meio de um conjunto articulado de processos cognitivos e afetivos. As variáveis Interesse, Estresse e Relaxamento apresentaram padrões de associação que indicam a atuação combinada de mecanismos de ativação e regulação emocional durante a experiência espacial.

A Tabela 1 apresenta a matriz de correlação de Spearman para as métricas registradas ao longo do percurso realizado pelos participantes durante a interação com o ambiente construído.

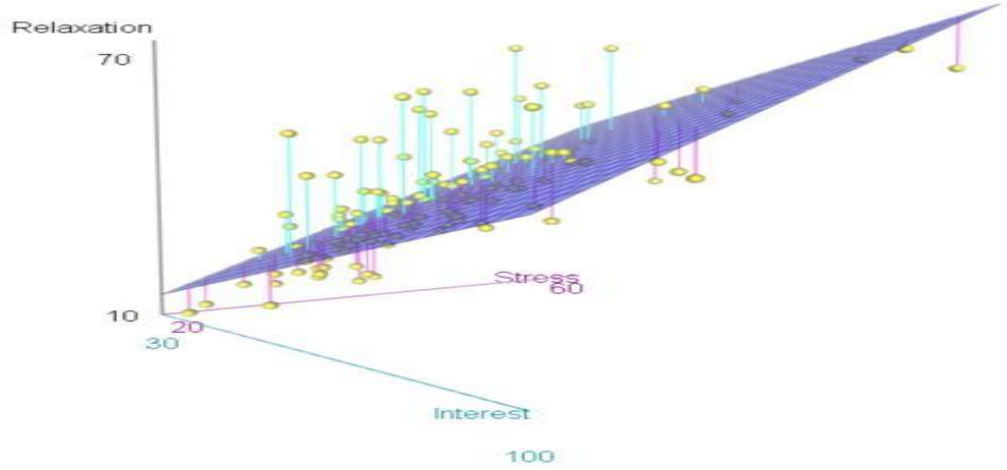
Tabela 1. Correlação de Spearman das variáveis cognitivas da análise neuroergonômica do ambiente construído

Variável	Atenção	Concentração	Excitação	Interesse	Relaxamento	Estresse
Atenção	1,00***	-	-	-	-	-
Concentração	-0,02	1,00***	-	-	-	-
Excitação	0,17	-0,23**	1,00***	-	-	-
Interesse	0,19	0,17*	0,47***	1,00***	-	-
Relaxamento	0,06	0,21**	0,25**	0,72***	1,00***	-
Estresse	-0,07	-0,03	0,38***	0,57***	0,72***	1,00***

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 5 apresenta a relação tridimensional entre as métricas de Interesse, Estresse e Relaxamento, que se destacaram como as variáveis mais fortemente associadas nas análises anteriores.

Figura 5. Relação tridimensional entre os dados estatísticos entre as métricas de interesse, estresse e relaxamento na análise do ambiente construído



Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 2 apresenta a matriz de correlação de Spearman para as métricas registradas neuroergonômica Centros de Operação e Controle de Energia e de Tráfego Aéreo

.

Tabela 2. Correlação de Spearman das variáveis cognitivas da análise neuroergonômica Centros de Operação e Controle de Energia e de Tráfego Aéreo

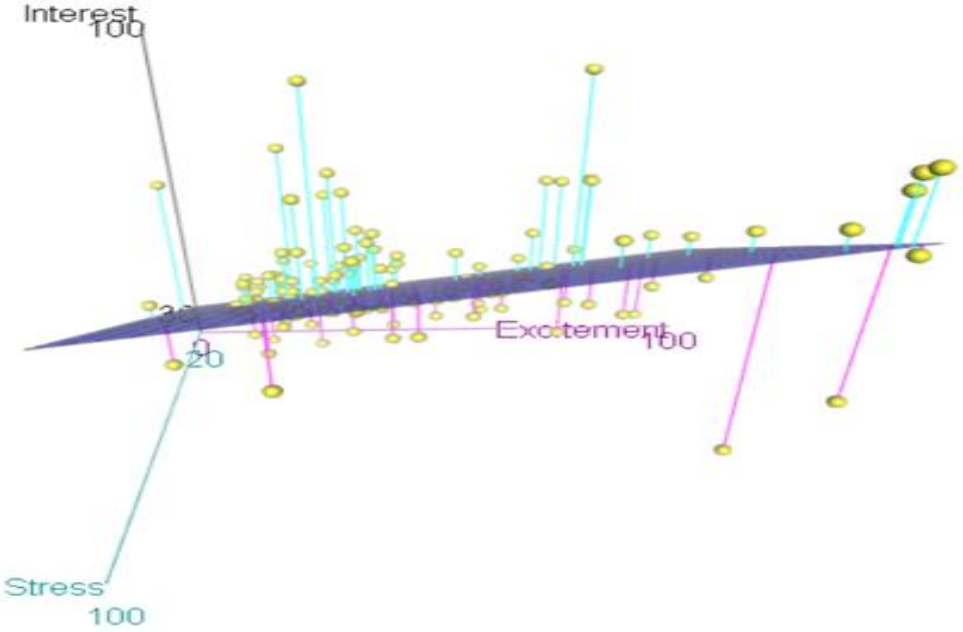
Variável	Atenção	Concentração	Excitação	Estresse	Relaxamento	Interesse
Atenção	1,00***	-	-	-	-	-
Concentração	0,29**	1,00***	-	-	-	-
Excitação	-0,070	0,02	1,00***	-	-	-
Estresse	-0,34***	0,08	0,36***	1,00***	-	-
Relaxamento	-0,27**	-0,08	0,33***	0,46***	1,00***	-

Interesse	-0,18	0,03	0,50***	0,59***	0,50***	1,00***

Fonte: Elaboração Própria

A Figura 6 apresenta a relação tridimensional entre as métricas de Interesse, Estresse e Excitação, que se destacaram como as variáveis mais fortemente associadas nas análises apresentadas na Tabela 2, em Centros de Operação e Controle de Energia Elétrica e de Tráfego Aéreo.

Figura 6. Relação tridimensional entre os dados estatísticos das métricas de Interesse, Estresse e Excitação em Centros de Operação e Controle de Energia Elétrica e de Tráfego Aéreo



Fonte: Elaboração Própria

5 CONCLUSÃO

Os valores das variáveis cognitivas entre operadores de centros de controle de tráfego aéreo são mais elevados do que entre operadores de centros de controle de energia elétrica; a variável Atenção destaca-se com um aumento de 50%, e a variável Estresse, com um aumento de 32%. Quanto aos resultados obtidos nos centros de controle de energia elétrica, observou-se um aumento nos valores médios medidos antes do início da jornada de trabalho e após o turno de seis horas — especificamente, um aumento de 17% na Atenção e de 11% na Concentração, juntamente com uma redução de 4% no nível absoluto da variável Estresse. Observou-se uma correlação, nos centros de operação e controle, entre dois pares de métricas: Estresse, Excitação e Interesse.

Durante a percepção na experiência de um ambiente construído oresultados demonstram a viabilidade do uso de EEG para acompanhar mudanças relativas em métricas derivadas da atividade eletroencefalográfica em condições reais de uso. A abordagem permite observar a variação das respostas ao longo do percurso, complementando estudos realizados em condições mais controladas.

Observou-se uma forte associação positiva entre Interesse e Relaxamento nessa experiência do ambiente construído, indicando que ambientes percebidos como interessantes também tendem a promover estados de conforto emocional. Em termos de interpretação, quanto maior o interesse despertado pelo ambiente, maior o nível de relaxamento registrado pelos participantes. A correlação positiva entre Relaxamento e Estresse sugere a ocorrência de um processo de corregulação emocional na experiência do ambiente construído, no qual a ativação fisiológica desencadeada por estímulos espaciais ocorre simultaneamente a mecanismos de regulação e acomodação neurocognitiva ao longo do percurso.

Este trabalho contribuirá efetivamente para o desenvolvimento de uma nova metodologia de trabalho para operadores de centros de controle de tráfego aéreo e de energia elétrica, tendo o potencial de impactar diretamente a segurança, o bem-estar e a eficiência dos operadores.

Os resultados indicaram que a experiência do ambiente construído é processada de forma integrada no sistema neurocognitivo, destacando a ação conjunta de mecanismos cognitivos e emocionais durante a interação entre o usuário e o espaço.

A conclusão de um artigo deve sintetizar os principais achados do estudo de forma sucinta, destacando as contribuições significativas para o campo de pesquisa. Deve reiterar os objetivos do estudo e resumir as descobertas mais importantes, enfatizando sua relevância e implicação prática ou teórica.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho teve o apoio do Conselho Nacional Científico e Tecnológico (CNPq), Brazil. Teve a contribuição do Bolsista CNPq Mestrando Aldecyano Gomes

REFERÊNCIAS

ALMUKHTAR, A.; CADDICK, V.; NAIK, R.; GOBLE, M.; MYLONAS, G.; DARZI, A.; ORIHUELA-ESPINA, F.; LEFF, D. R. Objective assessment of cognitive workload in surgery: a systematic review. **Annals of Surgery**, v. 281, n. 6, p. 942–951, 2024. DOI: https://doi.org/10.1097/SLA.0000000000006370.

AYAZ, H.; DEHAIS, F. (ed.). **Neuroergonomics: principles and practice**. Cham: Springer, 2020. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-34784-0.

CACIOPPO, J. T.; TASSINARY, L. G.; BERNSTON, G. G. Neuroergonomics. In: **Handbook of psychophysiology**. Cambridge: Cambridge University Press, 2012. DOI: https://doi.org/10.1017/CBO9780511546396.

CAÑAS, J. J. COMETA: an air traffic controller's mental workload model for calculating and predicting demand and capacity balancing. In: **Human mental workload: models and applications**. Cham: Springer, 2019. p. 85–104. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-32423-0_6.

CAÑAS, J. J. AI and ethics when human beings collaborate with AI agents. **Frontiers in Psychology**, v. 13, art. 836650, 2022. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2022.836650.

CAÑAS, J. J. et al. Fundamental frequency as an alternative method for assessing mental fatigue. In: **International Symposium on Human Mental Workload: Models and Applications**, 2020. Anais [...]. Cham: Springer, 2020. p. 58–75. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-62302-9_4.

CHEN, J.; ZHU, H.; CHENG, Y.; YIN, H.; YI, M.; SHEN, D.; ZHANG, Z.; WU, J. Restorative effects and perception of nature-themed artworks in indoor environments: an empirical study based on VR+EEG. **Frontiers in Psychology**, v. 16, art. 1571176, 2025. DOI: https://doi.org/10.3389/fpsyg.2025.1571176.

CHO, J. E.; PARK, N. H.; JUN, H. J. Unveiling the effect of visual openness on engagement and creativity through electroencephalograms. **Journal of Asian Architecture and Building Engineering**, v. 25, n. 4, p. 3130–3142, 2026. DOI: https://doi.org/10.1080/13467581.2025.2526192.

DE PAIVA, A. Neuroscience for architecture: how building design can influence behaviors and performance. **Journal of Civil Engineering and Architecture**, v. 12, n. 2, p. 132–138, 2018. DOI: https://doi.org/10.17265/1934-7359/2018.02.007.

DE PAIVA, A.; JEDON, R. Short- and long-term effects of architecture on the brain: toward theoretical formalization. **Frontiers of Architectural Research**, v. 8, n. 4, p. 564–571, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.07.004.

EMOTIV. **Emotiv Insight**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: https://www.emotiv.com/pt/insight. Acesso em: 5 jun. 2026.

FOTHERGILL, S.; [demais autores a confirmar]. An air traffic control simulator with realism and control. **Behavior Research Methods**, v. 41, p. 118–127, 2009. DOI: https://doi.org/10.3758/BRM.41.1.118.

GHALENOEI, M.; MORTAZAVI, S. M. J.; MAZLOUMI, A.; PAKPOUR, A. H. Impact of workload on cognitive performance of control room operators. **Cognition, Technology & Work**, v. 24, p. 195–207, 2022. DOI: https://doi.org/10.1007/s10111-021-00679-8.

GUALTIERI, L.; FRABONI, F.; BRENDEL, H. et al. Updating design guidelines for cognitive ergonomics in human-centred collaborative robotics applications: an expert survey. **Applied Ergonomics**, v. 119, art. 104309, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.apergo.2024.104309.

JI, Z.; XIE, X.; JIANG, E. et al. Integrating DRN-RF with computer vision for detection of control room operator's mental fatigue. **PLOS ONE**, v. 20, n. 2, art. e0315125, 2025. DOI: https://doi.org/10.1371/journal.pone.0315125.

KARAKAŞ, T.; YILDIZ, D. Exploring the influence of the built environment on human experience through a neuroscience approach: a systematic review. **Frontiers of Architectural Research**, v. 9, n. 1, p. 236–247, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.foar.2019.10.005.

KARANDINOU, A.; TURNER, L. Architecture and neuroscience: what can the EEG recording of brain activity reveal about a walk-through everyday space? **International Journal of Parallel, Emergent and Distributed Systems**, v. 32, p. S54–S65, 2017. DOI: https://doi.org/10.1080/17445760.2017.1390089.

KIM, S. Cognitive efficiency in VR simulated natural indoor environments examined through EEG and affective responses. **Scientific Reports**, v. 15, art. 33398, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-18629-z.

LUZZANI, G.; POGLIANO, M.; BURAIOLI, I.; COLAVINCENZO, M.; MARTORANA, S.; GUGLIERI, G.; DEMARCHI, D. ECG, respiration, fNIRS, and eye tracking for stress and mental workload monitoring in human-machine interaction. **IEEE Access**, v. 13, p. 122726–122741, 2025. DOI: https://doi.org/10.1109/ACCESS.2025.3588384.

MEHTA, R. K.; PARASURAMAN, R. Neuroergonomics: a review of applications to physical and cognitive work. **Frontiers in Human Neuroscience**, v. 7, art. 889, 2013. DOI: https://doi.org/10.3389/fnhum.2013.00889.

MOHAMMADIAN, M.; PARSAEI, H.; MOKARAMI, H.; KAZEMI, R. Cognitive demands and mental workload: a field study of the mining control room operators. **Heliyon**, v. 8, n. 8, art. e10274, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2022.e10274.

PARASURAMAN, R. Neuroergonomics: brain, cognition, and performance at work. **Current Directions in Psychological Science**, v. 20, n. 3, p. 181–186, 2011. DOI: https://doi.org/10.1177/0963721411409176.

RHEINGANTZ, G. **Observando a qualidade do lugar: procedimentos para a avaliação pós-ocupação**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, Faculdade de Arquitetura e Urbanismo, PROARQ, 2009.

SALLES, P. F. **A contribuição da ergonomia cognitiva na análise das atividades do operador de sala de controle**. 2008. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2008.

VARTANIAN, O.; COBURN, A.; CHATTERJEE, A. Buildings, beauty, and the brain: a neuroscience of architectural experience. **Journal of Cognitive Neuroscience**, v. 29, n. 9, p. 1521–1531, 2017. DOI: https://doi.org/10.1162/jocn_a_01146.

VILLAROUCO, V.; FERRER, N.; PAIVA, M. **Neuroarchitecture: neuroscience in the built environment**. Rio de Janeiro: Rio Books, 2021.

WANG, Y.; DUAN, W.; DONG, D.; DING, L.; LEI, X. A test-retest resting, and cognitive state EEG dataset during multiple subject-driven states. **Scientific Data**, v. 9, art. 566, 2022. DOI: https://doi.org/10.1038/s41597-022-01607-9.

WANG, Z. Y.; CHO, J. Y.; HONG, Y. K. Brain and subjective responses to indoor environments related to concentration and creativity. **Sensors**, v. 24, n. 23, art. 7838, 2024. DOI: https://doi.org/10.3390/s24237838.

WASCHER, E.; REISER, J.; RINKENAUER, G.; LARRÁ, M.; DREGER, F. A.; SCHNEIDER, D.; KARTHAUS, M.; GETZMANN, S.; GUTBERLET, M.; ARNAU, S. Neuroergonomics on the go: an evaluation of the potential of mobile EEG for workplace assessment and design. **Human Factors**, v. 65, n. 1, p. 86–106, 2023. DOI: https://doi.org/10.1177/00187208211007707.