V. xx N. x ANO 202x

REVISTA CADERNOS CAJUÍNA

eXXX

Revista Interdisciplinar

APLICABILIDADE DO SISTEMA *BRAIN4CARE* NA AVALIAÇÃO DA COMPLACÊNCIA INTRACRANIANA EM MULHERES.

Applicability of the Brain4Care System in assessing intracranial compliance in women.

Aplicabilidad del sistema Brain4Care en la evaluación de la distensibilidad intracraneal en mujeres.

DOI:
Submitted on: xx.xx.202x | Accepted on: xx.xx.202x | Published on: xx.xx.202x

Nathália Andrade de Sousa[1]
Maria Luiza Oliveira Costa[2]
Brunna Luiza Serafim Dantas[3]
Thais Almeida Rodrigues[4]
Andresa de Cássia Martini[5]

RESUMO: A monitorização da pressão intracraniana (PIC) constitui um pilar fundamental no manejo de pacientes com doenças neurológicas. Entretanto, os métodos invasivos, embora considerados padrão-ouro, estão associados a riscos relevantes, como infecções e complicações hemorrágicas, o que limita sua utilização, especialmente em contextos ambulatoriais. Nesse contexto, técnicas não invasivas emergem como alternativas promissoras para a avaliação da dinâmica intracraniana de forma mais segura e acessível. Assim, o presente estudo teve como objetivo avaliar a aplicabilidade da monitorização não invasiva da PIC, com ênfase no sistema *Brain4Care,* na análise da complacência intracraniana em mulheres. Trata-se de uma revisão narrativa estruturada com buscas realizadas nas bases *PubMed* e *Google Acadêmico*, no período de 2015 a 2025, utilizando descritores previamente definidos. A seleção dos estudos ocorreu em duas etapas, com revisão independente por três pesquisadores, e os dados foram organizados em categorias temáticas para análise qualitativa. Os achados evidenciaram diferentes

ISSN: 2448-0916

métodos não invasivos, incluindo ultrassonografia da bainha do nervo óptico, *Doppler transcraniano*, técnicas de imagem e sensores subcutâneos, destacando-se o sistema *Brain4Care* pela segurança, portabilidade e potencial para monitoramento contínuo. Em mulheres, observou-se redução da complacência intracraniana, evidenciada pelo aumento da razão P2/P1 e do tempo até o pico da onda. Conclui-se que a monitorização não invasiva da PIC representa um avanço relevante no neurointensivismo, com potencial para ampliar o diagnóstico precoce e o acompanhamento clínico, embora ainda sejam necessários estudos adicionais para validação e maior aplicabilidade na prática clínica.
Palavras-chave: intracraniano, pressão, mulher, monitorização não invasiva.

ABSTRACT: Intracranial pressure (ICP) monitoring is a fundamental pillar in the management of patients with neurological diseases. However, invasive methods, although considered the gold standard, are associated with significant risks, such as infections and hemorrhagic complications, which limit their use, especially in outpatient settings and in specific populations, such as women. In this context, noninvasive techniques have emerged as promising alternatives for assessing intracranial dynamics in a safer and more accessible manner. Therefore, this study aimed to evaluate the applicability of noninvasive ICP monitoring, with emphasis on the Brain4Care system, in the analysis of intracranial compliance in women. This is a structured narrative review with searches conducted in the PubMed and Google Scholar databases, covering the period from 2015 to 2025, using previously defined descriptors. Study selection was carried out in two stages, with independent review by three researchers, and the extracted data were organized into thematic categories for qualitative analysis. The findings identified several noninvasive methods, including optic nerve sheath ultrasound, transcranial Doppler, imaging techniques, and subcutaneous sensors, with the Brain4Care system standing out due to its safety, portability, and potential for continuous monitoring. In women, reduced intracranial compliance was observed, evidenced by an increased P2/P1 ratio and time to

ISSN: 2448-0916

peak. It is concluded that noninvasive ICP monitoring represents a relevant advancement in neurocritical care, with potential to improve early diagnosis and clinical follow-up, although further studies are required for clinical validation and broader applicability in practice.

Keywords: intracranial, pressure, women, non-invasive monitoring.

RESUMEN: La monitorización de la presión intracraneal (PIC) es un pilar fundamental en el manejo de pacientes con enfermedades neurológicas. Sin embargo, los métodos invasivos, aunque considerados el estándar de oro, se asocian a riesgos significativos, como infecciones y complicaciones hemorrágicas, lo que limita su uso, especialmente en entornos ambulatorios. En este contexto, las técnicas no invasivas emergen como alternativas prometedoras para evaluar la dinámica intracraneal de una manera más segura y accesible. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo evaluar la aplicabilidad de la monitorización no invasiva de la PIC, con énfasis en el sistema Brain4Care, en el análisis de la distensibilidad intracraneal en mujeres. Se trata de una revisión narrativa estructurada con búsquedas realizadas en las bases de datos PubMed y Google Scholar, desde 2015 hasta 2025, utilizando descriptores previamente definidos. La selección de estudios se realizó en dos etapas, con revisión independiente por tres investigadores, y los datos se organizaron en categorías temáticas para el análisis cualitativo. Los hallazgos destacaron diferentes métodos no invasivos, incluyendo ecografía de la vaina del nervio óptico, Doppler transcraneal, técnicas de imagen y sensores subcutáneos, sobresaliendo el sistema Brain4Care por su seguridad, portabilidad y potencial para la monitorización continua. En mujeres, se observó una reducción de la distensibilidad intracraneal, evidenciada por un aumento en la relación P2/P1 y el tiempo hasta el pico de la onda. Se concluye que la monitorización no invasiva de la PIC representa un avance significativo en la neurocuidados intensivos, con el potencial de ampliar el diagnóstico precoz y el

ISSN: 2448-0916

seguimiento clínico, aunque aún se necesitan más estudios para su validación y mayor aplicabilidad en la práctica clínica.

Palabras clave: presión intracraneal, mujeres, monitorización no invasiva.

1. INTRODUÇÃO

O conteúdo intracraniano é composto por tecido cerebral, sangue e líquido cefalorraquidiano (LCR) (Kawoos *et al.*, 2015). O equilíbrio entre esses componentes é essencial para a manutenção da homeostase cerebral. A pressão intracraniana (PIC) é um parâmetro fisiológico essencial, regulado pela interação entre o volume do cérebro, do sangue e do LCR, conforme descrito na doutrina de Monro-Kellie (Canac *et al.*, 2020; Kawoos *et al.*, 2015). Alterações nesse equilíbrio podem levar à elevação da PIC, com risco de isquemia cerebral, herniação encefálica e outras complicações neurológicas graves (Canac *et al.*, 2020)

Nesse contexto, o tema assume relevância científica, uma vez que o monitoramento contínuo da PIC é crucial especialmente em pacientes com risco aumentado de hipertensão intracraniana (HIC), como aqueles com trauma cranioencefálico, tumores cerebrais, hidrocefalia ou hipertensão intracraniana idiopática (HII) (Harary; Dolmans; Gormley, 2018; Kawoos *et al.*, 2015).

A hipertensão intracraniana idiopática (HII) é uma condição multifatorial, sem causa estrutural identificável, que afeta principalmente mulheres jovens (< 45 anos), sendo rara em homens (Wakerley; Tan; Ting, 2015). Sua incidência geral é de cerca de 2/100.000, mas aumenta significativamente em mulheres obesas. Assim, devido ao aumento progressivo da obesidade no mundo, nesse contexto, o tema assume relevância científica, configurando-se como objeto central da presente investigação.

Fatores como distúrbios hormonais, alterações na absorção do LCR, rigidez arterial e distúrbios da complacência intracraniana contribuem para sua fisiopatologia,

ISSN: 2448-0916

tornando as mulheres um grupo de especial interesse no contexto da monitorização da PIC (Alves *et al.*, 2022)

Embora a monitorização invasiva seja considerada o padrão-ouro pela sua acurácia, seu uso é limitado por riscos como infecção, hemorragia e a necessidade de internação em unidade de terapia intensiva (Canac *et al.*, 2020; Harary; Dolmans; Gormley, 2018). Com o avanço tecnológico, métodos não invasivos, como o Brain4Care, têm se tornado alternativa, oferecendo vias mais seguras e viáveis, especialmente para o acompanhamento ambulatorial e o rastreio em populações de risco, uma vez que a identificação precoce de HII traz melhores desfechos clínicos (Ocamoto *et al.*, 2024; Rossi *et al.*, 2022).

Apesar dos avanços descritos na literatura quanto à monitorização não invasiva da pressão intracraniana, ainda persiste uma lacuna científica relevante no que se refere à validação clínica e à consolidação desses métodos na prática assistencial (Canac *et al.*, 2020; Ocamoto *et al.*, 2024). Os estudos analisados evidenciam limitações importantes, como menor acurácia em comparação ao padrão-ouro invasivo, dependência do operador e variabilidade relacionada ao posicionamento dos dispositivos, especialmente no caso do sistema Brain4Care (Canac *et al.*, 2020; Ocamoto *et al.*, 2024).

Além disso, observa-se escassez de estudos robustos e padronizados, sobretudo com foco específico na população feminina, considerando suas particularidades fisiológicas e hormonais (Ocamoto *et al.*, 2024). A predominância de revisões e estudos observacionais, aliada à limitada disponibilidade de evidências com alto nível metodológico, reforça a necessidade de investigações adicionais que validem esses métodos, ampliem sua reprodutibilidade e definam com maior precisão seu papel na prática clínica, especialmente no acompanhamento ambulatorial e no manejo da hipertensão intracraniana idiopática.

O objetivo deste artigo é analisar a aplicabilidade da monitorização não invasiva da pressão intracraniana por meio do sistema Brain4Care na avaliação da complacência

ISSN: 2448-0916

intracraniana em mulheres, considerando suas particularidades fisiológicas e hormonais, com foco na Hipertensão Intracraniana Idiopática (HII) (Canac *et al.*, 2020; Ocamoto *et al.*, 2024).

2. METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma revisão narrativa estruturada acerca da monitorização não invasiva da pressão intracraniana (PIC). A busca foi realizada nas bases de dados *Google Acadêmico* e *PubMed*, contemplando estudos publicados no período de 2015 a 2025, considerando a atualidade e relevância científica do tema.

A estratégia de busca foi conduzida por meio da combinação de descritores e palavras-chave relacionados ao tema, utilizando o operador booleano "AND". Foram empregados os seguintes termos: "intracranial pressure", "women" e "noninvasive monitoring", os quais estão em conformidade com os descritores padronizados do DeCS/MeSH, correspondendo, respectivamente, a pressão intracraniana, mulheres e monitorização não invasiva

As buscas foram realizadas em de fevereiro de 2025. Inicialmente, foram selecionados 85 estudos a partir dos descritores utilizados. Após a aplicação dos critérios de elegibilidade, que incluíram artigos publicados entre 2015 e 2025, com disponibilidade de texto completo e pertinência temática à monitorização da PIC, foram excluídos estudos que não atendiam aos critérios estabelecidos, incluindo duplicidade, indisponibilidade do texto completo e ausência de relação direta com o tema.

O processo de seleção dos estudos ocorreu em duas etapas. Na primeira etapa, foi realizada a leitura dos títulos e resumos. Na segunda etapa, procedeu-se à leitura na íntegra dos estudos potencialmente relevantes. Ao final do processo, foram incluídos 12 estudos para compor a análise desta revisão.

A seleção dos estudos foi realizada por três revisores independentes, com o objetivo de garantir maior rigor metodológico. A extração dos dados foi conduzida por

meio de formulários padronizados, contemplando as seguintes variáveis: título do artigo, periódico, ano de publicação, autores, recorte espacial, objetivo, metodologia, desenvolvimento e principais achados. A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, com organização dos resultados em categorias temáticas, permitindo a síntese crítica dos achados relacionados à monitorização não invasiva da pressão intracraniana, com ênfase nas particularidades da população feminina.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 FISIOPATOLOGIA DA HIPERTENSÃO INTRACRANIANA

A fisiopatologia da hipertensão intracraniana (HIC) é amplamente sustentada pela doutrina de Monro-Kellie, posteriormente refinada por Harvey Cushing, a qual estabelece que o volume intracraniano é rigidamente composto por três elementos: tecido cerebral, sangue e líquido cefalorraquidiano (LCR). Conforme descrito por Harary, Dolmans e Gormley (2018), esse modelo pressupõe que o tecido cerebral é essencialmente incompressível, de modo que a estabilidade da pressão intracraniana (PIC) depende de um equilíbrio dinâmico entre o fluxo sanguíneo e a dinâmica do LCR. Essa concepção é consistente com revisões mais recentes que reforçam a ideia de que a manutenção da homeostase intracraniana está diretamente relacionada à capacidade de redistribuição volumétrica entre esses compartimentos.

No entanto, embora esse modelo clássico forneça a base teórica, estudos contemporâneos demonstram que sua aplicação clínica é limitada pela complexidade dos mecanismos compensatórios. Roldan *et al.* (2023) evidenciam que pequenas variações volumétricas podem resultar em aumentos desproporcionais da PIC quando os mecanismos compensatórios são excedidos, destacando a natureza não linear da complacência intracraniana. Essa observação complementa e, em certa medida, tensiona o modelo de Monro-Kellie, ao sugerir que a capacidade adaptativa do sistema é mais restrita do que inicialmente proposto, especialmente em condições patológicas.

ISSN: 2448-0916

Adicionalmente, revisões como a de Canac *et al.* (2020) reforçam que a HIC deve ser compreendida como um processo dinâmico, no qual múltiplos fatores — incluindo alterações hemodinâmicas, distúrbios do LCR e modificações estruturais — interagem simultaneamente. Essa perspectiva converge com Harary, Dolmans e Gormley (2018), mas amplia o entendimento ao destacar que a falha compensatória não ocorre de forma isolada, sendo resultado de interações sistêmicas complexas.

No que diz respeito à classificação etiológica, há consenso entre Alves *et al.* (2022) e Wakerley, Tan e Ting (2015) de que a hipertensão intracraniana idiopática (HII) representa uma condição na qual há elevação da PIC sem causa estrutural identificável. Em contraste, a hipertensão intracraniana secundária decorre de etiologias definidas, como massas expansivas, hemorragias ou edema cerebral. Essa distinção é coerente com a literatura mais ampla, que reconhece a introdução de um "quarto componente" patológico como fator de ruptura do equilíbrio intracraniano, ultrapassando os limites compensatórios previamente descritos.

Outro ponto de convergência entre os estudos refere-se à existência de variações fisiológicas da PIC. Harary, Dolmans e Gormley (2018) descrevem flutuações relacionadas à postura, atividade cerebral e alterações cardiovasculares e respiratórias. Contudo, ao estabelecer que elevações sustentadas por mais de cinco minutos possuem relevância clínica, os autores introduzem um critério temporal que é fundamental para diferenciar adaptações fisiológicas de estados patológicos. Essa delimitação é particularmente relevante quando analisada em conjunto com estudos de monitorização contínua, que demonstram a importância da análise dinâmica da PIC ao longo do tempo, e não apenas de medidas pontuais.

Do ponto de vista fisiopatológico, os mecanismos de lesão associados à HIC são bem estabelecidos, porém abordados de forma complementar na literatura. Canac *et al.* (2020) enfatizam a redução da pressão de perfusão cerebral (PPC) como principal via para isquemia cerebral, a partir da relação PPC = PAM – PIC. Já Harary, Dolmans e Gormley

ISSN: 2448-0916

(2018) destacam a herniação encefálica como consequência extrema da elevação pressórica, resultante de gradientes de pressão entre compartimentos intracranianos e o canal medular. Essa diferença de enfoque não representa divergência, mas sim uma ampliação do entendimento, evidenciando que a HIC pode levar tanto a comprometimento hemodinâmico quanto a deslocamentos estruturais críticos.

Dessa forma, a análise integrada dos estudos revela uma forte convergência conceitual, porém com diferentes níveis de aprofundamento. Enquanto alguns autores priorizam a descrição estrutural e fisiológica do sistema intracraniano, outros enfatizam sua dinâmica, limites compensatórios e consequências clínicas. Essa complementaridade reforça que a hipertensão intracraniana deve ser compreendida como um fenômeno multifatorial e progressivo, no qual pequenas alterações podem desencadear cascatas fisiopatológicas relevantes. Nesse contexto, a literatura sustenta de maneira consistente a necessidade da monitorização contínua da PIC, especialmente diante da incapacidade de métodos estáticos captarem a complexidade dessas alterações ao longo do tempo.

3.2 HIPERTENSÃO INTRACRANIANA IDIOPÁTICA (HII)

A hipertensão intracraniana idiopática (HII), também denominada Síndrome do Pseudotumor Cerebral, é definida como a elevação da pressão intracraniana na ausência de lesões estruturais ou causas identificáveis, apesar de mimetizar clinicamente processos expansivos intracranianos (Wakerley; Tan; Ting, 2015). Essa definição é amplamente consistente entre os estudos analisados, não havendo divergências conceituais relevantes.

Do ponto de vista epidemiológico, há forte concordância entre Alves *et al*. (2022) e Wakerley, Tan e Ting (2015), que identificam maior prevalência da HII em mulheres obesas com menos de 45 anos. Essa associação é reiterada em revisões recentes, que destacam a obesidade como um dos principais fatores de risco modificáveis, reforçando a hipótese de participação metabólica na fisiopatologia da doença. Ainda assim, a presença

de casos fora desse perfil epidemiológico sugere que outros fatores, possivelmente hormonais e genéticos, também desempenham papel relevante.

No que se refere à fisiopatologia, ambos os estudos convergem ao reconhecer sua natureza ainda não completamente elucidada. Alves *et al.* (2022) destacam a hipertensão venosa intracraniana e o aumento da resistência ao fluxo do LCR como mecanismos principais. Por outro lado, Wakerley, Tan e Ting (2015) aprofundam essa análise ao descreverem um ciclo patológico envolvendo estenose do seio transverso, congestão venosa e redução da reabsorção do LCR. Essa abordagem acrescenta um elemento importante: a possibilidade de perpetuação da doença por retroalimentação, o que não é explicitamente discutido em outros estudos.

Clinicamente, há alta concordância entre os autores. Wakerley, Tan e Ting (2015) relatam cefaleia em mais de 90% dos casos, enquanto Alves *et al.* (2022) destacam a elevada frequência de alterações visuais. Essa complementaridade reforça que a HII apresenta manifestações tanto sistêmicas quanto neurológicas específicas, sendo o papiledema o principal achado clínico. A convergência entre os estudos nesse aspecto fortalece a consistência dos critérios clínicos descritos na literatura.

No diagnóstico, observa-se uma evolução conceitual mais evidente. Alves et al. (2022) apresentam critérios mais objetivos e estruturados, enquanto Wakerley, Tan e Ting (2015) introduzem maior flexibilidade diagnóstica ao considerar cenários sem papiledema. Essa ampliação aumenta a sensibilidade diagnóstica, porém pode reduzir a especificidade, o que evidencia um dilema clínico importante: o equilíbrio entre diagnóstico precoce e risco de superdiagnóstico.

Dessa forma, a comparação entre os estudos demonstra que, embora exista consenso quanto às características clínicas e epidemiológicas da HII, persistem lacunas significativas na compreensão de sua fisiopatologia e na padronização diagnóstica. A

ISSN: 2448-0916

heterogeneidade das abordagens reflete a complexidade da doença e reforça a necessidade de estudos mais robustos, especialmente aqueles que integrem aspectos clínicos, hemodinâmicos e de monitorização da pressão intracraniana.

3.3 ALTERAÇÕES DA PRESSÃO INTRACRANIANA EM MULHERES

A análise das alterações da pressão intracraniana (PIC) em mulheres evidencia uma convergência consistente na literatura quanto ao papel de fatores demográficos e metabólicos. Wakerley, Tan e Ting (2015) identificam como principais fatores de risco para hipertensão intracraniana idiopática (HII) o sexo feminino, idade inferior a 45 anos e obesidade. Essa associação é amplamente reconhecida e sugere uma interação entre fatores hormonais e metabólicos, embora os mecanismos subjacentes ainda não estejam completamente elucidados.

Complementando essa perspectiva epidemiológica, Ocamoto *et al*. (2024) introduzem uma abordagem mais fisiológica ao analisar a relação entre envelhecimento e dinâmica intracraniana. Os autores demonstram que o aumento do volume de líquido cefalorraquidiano (LCR) com a idade está associado à redução da complacência cerebral e, consequentemente, à elevação da PIC. Esse achado amplia o entendimento ao indicar que, além dos fatores clássicos como obesidade, alterações estruturais relacionadas ao envelhecimento também desempenham papel relevante. Ademais, o mesmo estudo evidencia que o índice de aumento (IA), utilizado como marcador indireto de rigidez arterial, não apenas cresce com a idade, mas apresenta valores mais elevados em mulheres. Essa observação sugere uma possível predisposição feminina a alterações hemodinâmicas que impactam diretamente a complacência intracraniana, estabelecendo um elo entre fatores vasculares e a fisiopatologia da HII.

No contexto de condições neurológicas associadas, Rossi *et al*. (2022) investigam a relação entre enxaqueca distúrbio mais prevalente em mulheres e alterações da PIC. Os autores identificam que a enxaqueca crônica pode estar associada a alterações

ISSN: 2448-0916

intracranianas, especialmente pela maior prevalência de estenose do seio transverso, reconhecida como marcador de hipertensão intracraniana. No entanto, ao analisarem a morfologia da onda da PIC por método não invasivo, não observaram diferenças significativas na razão P2/P1 entre mulheres com e sem migrânea. Esse achado introduz um ponto crítico relevante: embora haja indícios estruturais e clínicos que sugiram associação entre enxaqueca e alterações da PIC, essa relação não se traduz necessariamente em mudanças detectáveis nos parâmetros de complacência intracraniana. Tal discrepância evidencia possíveis limitações dos métodos não invasivos ou, alternativamente, sugere que os mecanismos envolvidos na enxaqueca e na HIC não são completamente sobreponíveis.

No que se refere ao período gestacional, Alves *et al.* (2022) descrevem um conjunto de alterações hormonais e fisiológicas — como hiperestrogenemia, estado pró-trombótico, aumento do volume sanguíneo, débito cardíaco e retenção hidrossalina — que potencialmente contribuem para a elevação da PIC. Entretanto, os autores ressaltam que essas alterações não se associam a repercussões significativas na pressão do LCR, o que sugere a existência de mecanismos compensatórios eficazes durante a gestação. Essa observação é particularmente relevante quando comparada a outros contextos fisiopatológicos, nos quais alterações hemodinâmicas semelhantes resultariam em descompensação intracraniana.

Além disso, Alves *et al.* (2022) demonstram que a gestação não está relacionada à piora do prognóstico da HII nem a desfechos perinatais adversos, o que contrasta com a expectativa teórica de agravamento devido às alterações fisiológicas gestacionais. Esse dado reforça a complexidade da regulação da PIC em mulheres e sugere que fatores hormonais podem exercer efeitos moduladores ainda não completamente compreendidos. O principal risco identificado está associado ao trabalho de parto, especialmente ao esforço expulsivo, que pode elevar transitoriamente a PIC. Nesse

contexto, o parto instrumentado surge como estratégia para mitigar esse risco, embora o parto vaginal não seja contraindicado.

Dessa forma, a integração dos estudos evidencia que as alterações da PIC em mulheres resultam de uma interação multifatorial entre idade, fatores hormonais, condições neurológicas e estados fisiológicos específicos, como a gestação. Enquanto alguns estudos enfatizam aspectos estruturais e hemodinâmicos (Ocamoto *et al.,* 2024), outros exploram associações clínicas (Rossi *et al.,* 2022) e condições específicas (Alves *et al.,* 2022). Apesar dessa diversidade de abordagens, há convergência quanto à maior vulnerabilidade feminina a alterações da complacência intracraniana. No entanto, as discrepâncias observadas — especialmente na correlação entre achados estruturais e parâmetros funcionais — reforçam a necessidade de investigações adicionais, particularmente com métodos de monitorização mais sensíveis e padronizados, capazes de integrar essas diferentes dimensões na prática clínica.

3.4 MÉTODOS NÃO INVASIVOS DE MONITORIZAÇÃO DA PRESSÃO INTRACRANIANA.

A monitorização da pressão intracraniana (PIC) na hipertensão intracraniana idiopática (HII) é amplamente reconhecida como elemento central no acompanhamento clínico, especialmente diante do caráter imprevisível da doença. Wakerley, Tan e Ting (2015) destacam que a HII pode apresentar evolução variável, alternando entre estabilização, progressão e recorrências frequentemente associadas ao ganho de peso. Além disso, os autores enfatizam que alterações na dinâmica do líquido cefalorraquidiano (LCR) podem persistir mesmo na ausência de sintomas clínicos, contribuindo para complicações tardias, como comprometimento do nervo óptico e alterações estruturais da base do crânio, incluindo fístulas liquóricas. Essa perspectiva reforça que a monitorização da PIC não deve ser restrita a contextos agudos, mas também incorporada ao seguimento longitudinal, permitindo avaliar a progressão da doença e a resposta a intervenções terapêuticas.

ISSN: 2448-0916

Nesse cenário, a monitorização invasiva permanece como o padrão-ouro, sendo descrita por Harary, Dolmans e Gormley (2018) e Kawoos *et al*. (2015) como o método mais preciso, capaz de fornecer medições diretas da PIC e possibilitar intervenções imediatas, como a drenagem de LCR. Contudo, ambos os estudos convergem ao destacar limitações importantes, incluindo risco de infecção, complicações hemorrágicas, necessidade de anestesia e restrição ao ambiente hospitalar, especialmente em unidades de terapia intensiva. Essa dualidade — alta acurácia versus elevada morbidade — evidencia um dilema clínico relevante, particularmente em condições crônicas como a HII, nas quais o monitoramento prolongado é desejável.

Diante dessas limitações, Canac *et al.* (2020) e Rossi *et al.* (2022) apontam a crescente relevância dos métodos não invasivos, que emergem como alternativas mais seguras e acessíveis. Esses métodos incluem ultrassonografia da bainha do nervo óptico (ONSD), Doppler transcraniano (DTC), técnicas de imagem, timpanometria, sensores subcutâneos e dispositivos baseados na análise da morfologia da onda da PIC, como o sistema *Brain4Care*. Embora esses métodos apresentem menor acurácia quando comparados ao padrão invasivo, sua principal vantagem reside na possibilidade de monitoramento contínuo e repetido, o que os torna particularmente úteis em contextos ambulatoriais, no rastreamento de pacientes e em cenários com recursos limitados. Essa relação entre acessibilidade e precisão evidencia uma mudança de paradigma, na qual a utilidade clínica não depende exclusivamente da exatidão absoluta, mas também da aplicabilidade prática.

A análise comparativa dos métodos evidencia diferenças importantes quanto ao tipo de informação fornecida. Conforme descrito por Canac *et al.* (2020) e Harary, Dolmans e Gormley (2018), o Doppler transcraniano é utilizado principalmente para avaliar alterações no fluxo sanguíneo cerebral, sendo particularmente útil em casos de vasoespasmo. Já a ultrassonografia da bainha do nervo óptico baseia-se na comunicação entre o espaço subaracnóideo do nervo óptico e o intracraniano, permitindo inferir

aumentos da PIC. Por outro lado, métodos de imagem, como tomografia computadorizada e ressonância magnética, fornecem evidências indiretas por meio da identificação de alterações estruturais decorrentes da hipertensão intracraniana. Sensores telemétricos subcutâneos, por sua vez, são mais utilizados em contextos específicos, como em pacientes com derivação ventriculoperitoneal ou hipertensão intracraniana crônica.

Nesse contexto, o sistema *Brain4Care* se destaca por introduzir uma abordagem funcional baseada na análise da morfologia da onda da PIC. Ocamoto *et al.* (2024) demonstram que parâmetros como a razão P2/P1 e o tempo até o pico (TTP) refletem indiretamente a complacência intracraniana, sendo influenciados por variáveis como idade e sexo. Diferentemente de outros métodos não invasivos que inferem a PIC de forma indireta estrutural ou hemodinâmica, o *Brain4Care* propõe uma avaliação dinâmica da resposta intracraniana ao pulso arterial. No entanto, os autores também ressaltam limitações importantes, como a variabilidade dos dados relacionada ao posicionamento do sensor e à dependência do operador, o que pode comprometer a reprodutibilidade das medições.

A escolha do método mais adequado, portanto, não é trivial e deve considerar múltiplos fatores. Kawoos *et al.* (2015) e Ocamoto *et al.* (2024) destacam que critérios como precisão, confiabilidade, custo e segurança do paciente são determinantes nessa decisão. No caso específico do *Brain4Care*, a correta localização do transdutor é fundamental para garantir a acurácia dos dados, evidenciando que, mesmo em métodos não invasivos, fatores técnicos podem influenciar significativamente os resultados. Além disso, em situações agudas, como trauma cranioencefálico, elevações focais da PIC podem exigir intervenções imediatas, sobretudo quando há discordância entre os valores obtidos e o quadro clínico, o que reforça a limitação dos métodos não invasivos como substitutos do padrão-ouro.

Por fim, tanto Kawoos *et al.* (2015) quanto Ocamoto *et al*. (2024) destacam que complicações como infecção, hemorragia e posicionamento inadequado de sensores

podem impactar diretamente a acurácia das medições, influenciando a escolha da tecnologia. Dessa forma, a literatura analisada converge ao indicar que os métodos não invasivos não substituem a monitorização invasiva, mas atuam como ferramentas complementares. A principal contribuição destes métodos reside na ampliação do acesso ao monitoramento da PIC, especialmente em contextos onde o uso do método invasivo não é viável, reforçando seu papel estratégico no acompanhamento clínico e na detecção precoce de alterações intracranianas.

3.5 SISTEMA *BRAIN4CARE*

O sistema *Brain4Care* representa uma abordagem inovadora na monitorização não invasiva da pressão intracraniana (PIC), baseando-se na detecção de expansões cranianas pulsáteis em escala micrométrica, decorrentes das variações da PIC ao longo do ciclo cardíaco. Conforme descrito por Ocamoto *et al.* (2024), essa mensuração é realizada por meio de um sensor capaz de identificar deformações sutis do crânio, enquanto Rossi *et al.* (2022) complementam ao detalhar o posicionamento do dispositivo na região frontolateral, otimizando a captação dessas variações. A convergência entre esses estudos reforça a consistência metodológica do sistema, ao mesmo tempo em que evidencia sua dependência de aspectos técnicos, como o correto posicionamento do sensor.

A transformação desses sinais mecânicos em dados interpretáveis ocorre por meio do registro da forma de onda do pulso da PIC, inicialmente em formato analógico e posteriormente convertida em sinais digitais para análise detalhada (Ocamoto *et al.,* 2024). Essa etapa destaca uma diferença fundamental em relação aos métodos invasivos: enquanto estes fornecem valores absolutos de pressão, o *Brain4Care* prioriza a análise morfológica da onda, introduzindo uma abordagem funcional da dinâmica intracraniana.

A interpretação dessa morfologia baseia-se principalmente nos picos P1, P2 e P3. De acordo com Ocamoto *et al*. (2024) e Rossi *et al.* (2022), o pico P1 está diretamente relacionado ao pulso arterial sistólico, refletindo a transmissão imediata da pressão

vascular. Em contrapartida, os picos P2 e P3 estão associados a variações no volume sanguíneo cerebral e aos mecanismos compensatórios intracranianos. No entanto, apenas P1 e P2 possuem relevância clínica direta na avaliação da complacência, uma vez que o pico P3 não é utilizado no cálculo da PIC. Essa distinção evidencia que o sistema não se limita à mensuração da pressão, mas busca interpretar a resposta do sistema intracraniano às variações hemodinâmicas.

Nesse contexto, parâmetros derivados como a razão P2/P1 e o tempo até o pico (TTP) assumem papel central. Ocamoto *et al.* (2024) demonstram que o aumento da razão P2/P1 está associado à redução da complacência intracraniana, frequentemente relacionada ao aumento da rigidez arterial. Essa abordagem permite inferir alterações funcionais antes mesmo de mudanças estruturais evidentes, o que representa uma vantagem potencial em termos de detecção precoce. No entanto, essa inferência indireta também constitui uma limitação, uma vez que não corresponde a uma medida absoluta da PIC, diferentemente dos métodos invasivos.

A influência de fatores biológicos, como idade e sexo, é amplamente destacada por Ocamoto *et al.* (2024). Os autores observam que o envelhecimento está associado à redução do volume cerebral e aumento do volume de LCR, resultando em menor complacência intracraniana. Além disso, evidenciam que mulheres apresentam cérebros aproximadamente 9% mais rígidos, o que pode estar relacionado à diminuição dos hormônios sexuais após a menopausa. Essa rigidez aumentada se reflete diretamente nos parâmetros analisados pelo *Brain4Care*, como o aumento da razão P2/P1 e alterações no TTP. Dessa forma, o dispositivo não apenas capta alterações da PIC, mas também reflete diferenças fisiológicas entre grupos populacionais, o que amplia sua aplicabilidade, mas também exige cautela na interpretação dos dados.

Ainda nesse sentido, o aumento da rigidez arterial descrito por Ocamoto *et al.* (2024) está associado à redução do pico P1 e ao aumento relativo do P2, modificando a morfologia da onda. Estudos citados no próprio trabalho indicam que mulheres tendem a

ISSN: 2448-0916

apresentar valores mais elevados da razão P2/P1, sugerindo menor complacência intracraniana com o envelhecimento. Essa consistência entre achados reforça a utilidade do método na avaliação de alterações sutis da dinâmica intracraniana, embora também evidencie a necessidade de parâmetros de referência ajustados por idade e sexo.

Em comparação com métodos invasivos, o *Brain4Care* apresenta vantagens claras em termos de segurança, uma vez que não envolve risco de infecção ou hemorragia (Ocamoto *et al.,* 2024). Além disso, sua capacidade de analisar continuamente a morfologia da onda permite uma avaliação dinâmica da complacência intracraniana. No entanto, é fundamental destacar que o método fornece uma avaliação indireta da PIC, focando na interpretação da forma de onda, o que limita sua substituição como padrão-ouro.

A literatura também enfatiza aspectos práticos relacionados à aplicabilidade clínica. Canac *et al.* (2020) e Ocamoto *et al.* (2024) destacam que dispositivos não invasivos, como o *Brain4Care*, apresentam maior flexibilidade de uso, podendo ser aplicados em ambientes ambulatoriais devido à sua portabilidade. Essa característica representa uma vantagem significativa em comparação com métodos invasivos, especialmente no acompanhamento de condições crônicas. Contudo, Ocamoto *et al.* (2024) ressaltam que a acurácia do método depende diretamente do treinamento do operador e do correto posicionamento do sensor, o que pode introduzir variabilidade nos resultados.

A análise crítica da literatura evidencia ainda limitações importantes no impacto clínico da monitorização da PIC. Torres, Paiva e Amorim (2023) não observaram diferenças significativas em desfechos como mortalidade ou tempo de internação em pacientes com traumatismo cranioencefálico submetidos à monitorização da PIC, quando comparados àqueles avaliados apenas por critérios clínico-radiológicos. Em paralelo, Harary, Dolmans e Gormley (2018) destacam que benefícios mais evidentes da monitorização invasiva podem estar restritos a subgrupos específicos, como pacientes

ISSN: 2448-0916

idosos. Esses achados reforçam que, embora a monitorização seja uma ferramenta importante, seu impacto clínico pode variar conforme o contexto e a população estudada.

Dessa forma, os estudos convergem ao indicar que métodos não invasivos, como o *Brain4Care*, não substituem a monitorização invasiva, mas atuam como ferramentas complementares (Fig 1). Sua principal contribuição reside na possibilidade de detecção precoce de alterações intracranianas e no acompanhamento ambulatorial de pacientes com fatores de risco ou condições crônicas. No entanto, limitações como dependência do operador, necessidade de treinamento especializado e restrições de implementação em larga escala ainda representam barreiras para sua incorporação rotineira na prática clínica (Canac *et al*., 2020; Ocamoto *et al*., 2024).

Figura 1: Comparação entre o Sistema *Brain4Care* e Métodos Invasivos de monitorização da PIC

Característica	Sistema *Brain4Care* (Não Invasivo)	Métodos Invasivos (Padrão-Ouro)
Princípio de Funcionamento	Detecção de expansões cranianas pulsáteis em escala micrométrica por meio de sensor frontolateral.	Medição direta da pressão intracraniana por meio de sensores inseridos cirurgicamente.
Tipo de Dado Fornecido	Análise funcional e morfológica da onda da PIC (abordagem dinâmica).	Valores absolutos de pressão intracraniana.
Parâmetros Avaliados	Razão P2/P1 e tempo até o pico (TTP), que refletem a complacência intracraniana.	Nível quantitativo da pressão intracraniana (PIC).
Segurança e Riscos	Alta segurança; ausência de riscos de infecção ou complicações hemorrágicas.	Associado a riscos relevantes de infecção, hemorragia e complicações cirúrgicas.
Ambiente de Aplicação	Portátil; aplicável em contextos ambulatoriais e para monitoramento contínuo/repetido.	Restrito ao ambiente hospitalar, geralmente em Unidades de Terapia Intensiva (UTI).

ISSN: 2448-0916

Capacidade de Intervenção	Ferramenta complementar para diagnóstico precoce e seguimento clínico.	Permite intervenções terapêuticas imediatas, como a drenagem de líquido cefalorraquidiano (LCR).
Principais Limitações	Dependência do operador e do correto posicionamento do sensor para garantir a acurácia.	Alta morbidade, necessidade de anestesia e limitações para acompanhamento prolongado.

Fonte: Autores, 2026.

4. CONCLUSÃO

As evidências analisadas demonstram que a monitorização da pressão intracraniana é fundamental no manejo da hipertensão intracraniana idiopática, especialmente diante de sua evolução variável, risco de recorrência e possibilidade de complicações neurológicas decorrentes de alterações persistentes na dinâmica do líquido cefalorraquidiano. Nesse contexto, a utilização de métodos não invasivos surge como uma alternativa relevante, sobretudo pela maior segurança, viabilidade de monitoramento contínuo e potencial aplicação em ambientes ambulatoriais, contribuindo para o acompanhamento clínico e a detecção precoce de alterações na complacência intracraniana.

Dentre os métodos disponíveis, o sistema *Brain4Care* destaca-se por permitir a análise da morfologia da onda da pressão intracraniana, possibilitando a obtenção de parâmetros como a razão P2/P1 e o tempo até o pico, que refletem indiretamente a complacência intracraniana. Observou-se que fatores como idade e sexo influenciam esses parâmetros, com destaque para mulheres, que apresentam menor complacência intracraniana, especialmente em contextos como envelhecimento, alterações hormonais e hipertensão intracraniana idiopática. Apesar das limitações relacionadas à acurácia, dependência do operador, custo e necessidade de capacitação técnica, os métodos não invasivos não substituem o padrão-ouro invasivo, mas atuam como ferramentas

ISSN: 2448-0916

complementares importantes, ampliando as possibilidades de rastreamento, seguimento clínico e compreensão da dinâmica das alterações da pressão intracraniana na prática clínica.

REFERÊNCIAS

ALVES, S. et al. Multidisciplinary management of idiopathic intracranial hypertension in pregnancy: case series and narrative review. **Brazilian Journal of Anesthesiology**, v. 72, n. 6, p. 790–794, 2022. https://doi.org/10.1016/j.bjane.2021.02.030

CANAC, N. et al. Review: pathophysiology of intracranial hypertension and noninvasive intracranial pressure monitoring. **Fluids and Barriers of the CNS**, v. 17, n. 1, p. 40, 2020. https://doi.org/10.1186/s12987-020-00201-8

HARARY, M.; DOLMANS, R. G. F.; GORMLEY, W. B. Intracranial pressure monitoring: review and avenues for development. **Sensors**, v. 18, n. 2, p. 465, 2018. https://doi.org/10.3390/s18020465

KAWOOS, U. et al. Advances in intracranial pressure monitoring and its significance in managing traumatic brain injury. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 16, n. 12, p. 28979–28997, 2015. https://doi.org/10.3390/ijms161226146

MITCHELL, K.-A. S. et al. First-in-human experience with integration of wireless intracranial pressure monitoring device within a customized cranial implant. **Operative Neurosurgery**, v. 19, n. 3, p. 341–350, 2020. https://doi.org/10.1093/ons/opz431

OCAMOTO, G. N. et al. Characterization of intracranial compliance in healthy subjects using a noninvasive method: results from a multicenter prospective observational study.

Journal of Clinical Monitoring and Computing, v. 38, n. 6, p. 1249–1261, 2024. https://doi.org/10.1007/s10877-024-01191-w

PRADEEP, R. et al. Transcranial Doppler for monitoring and evaluation of idiopathic intracranial hypertension. **Journal of Neurosciences in Rural Practice**, v. 11, p. 309–314, 2020. https://doi.org/10.1055/s-0040-1710086

ROLDAN, M. et al. Non-invasive monitoring of intracranial pressure changes: healthy volunteers study. **Frontiers in Physiology**, v. 14, p. 1208010, 2023. https://doi.org/10.3389/fphys.2023.1208010

ROSSI, D. M. et al. Noninvasive intracranial pressure monitoring in women with migraine. **Scientific Reports**, v. 12, n. 1, p. 2635, 2022. https://doi.org/10.1038/s41598-022-06258-9

SAINDANE, A. M. et al. Noninvasive assessment of intracranial pressure status in idiopathic intracranial hypertension using displacement encoding with stimulated echoes (DENSE) MRI: a prospective patient study with contemporaneous CSF pressure correlation. **American Journal of Neuroradiology**, v. 39, n. 2, p. 311–316, 2018. https://doi.org/10.3174/ajnr.A5486

TORRES, G. S. A.; PAIVA, W. S.; AMORIM, R. L. O. Intracranial pressure monitoring in patients with severe traumatic brain injury: a cohort study with paired analysis. **Arquivos Brasileiros de Neurocirurgia**, v. 42, n. 4, p. e277–e281, 2023. https://doi.org/10.1055/s-0041-1731012

WAKERLEY, B. R.; TAN, M. H.; TING, E. Y. Idiopathic intracranial hypertension. **Cephalalgia**, v. 35, n. 3, p. 248–261, 2015. https://doi.org/10.1177/0333102414534329