Segurança e Complicações da Ablação por Campo Pulsado para Fibrilação Atrial: Biofísica, Diagnóstico e Manejo

Safety and Complications of Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation: Biophysics, Diagnosis, and Management

Alejandro Velasquez,[1] Gabriel Odozynski,[2] Heloisa Gonzaga Menezes de Moraes,[3] Leandro Ioschpe Zimerman,[4,5] Andre d'Avila[2,6]

Beth Israel Deaconess Medical Center,[1] Boston, Massachusetts – EUA
Harvard-Thorndike Electrophysiology Institute – Electrophysiology Institute,[2] Boston, Massachusetts – EUA
Escola Bahiana de Medicina e Saúde Pública – Unidade Acadêmica Brotas,[3] Brotas, BA – Brasil
Hospital de Clínicas de Porto Alegre,[4] Porto Alegre, RS – Brasil
Associação Hospital Moinhos de Vento,[5] Porto Alegre, RS – Brasil
Hospital SOS Cardio,[6] Florianópolis, SC – Brasil

Resumo

A ablação por campo pulsado (*pulsed field ablation* [PFA]) utiliza a eletroporação irreversível para atuar preferencialmente sobre o tecido miocárdico durante a ablação da fibrilação atrial (FA), limitando a lesão colateral de estruturas adjacentes. Esta revisão narrativa sintetiza as complicações associadas à PFA, com foco nos mecanismos, na incidência, no diagnóstico, na prevenção e no manejo dos eventos adversos relacionados ao procedimento e específicos da modalidade de energia. As evidências foram obtidas de 14 dos principais ensaios clínicos, registros e estudos pós-aprovação, selecionados pela abrangência dos dados de segurança. As complicações foram classificadas como vasculares, cardíacas, pulmonares, hematológicas, renais, neurológicas ou gastrintestinais. Apesar da heterogeneidade substancial dos delineamentos, as taxas de complicações relatadas foram geralmente baixas. A PFA parece reduzir acentuadamente as complicações térmicas tradicionais, sem casos de estenose das veias pulmonares ou fístula atrioesofágica nos principais estudos revisados. Entretanto, os eventos adversos associados à PFA incluem hemólise intravascular, lesão renal aguda associada à hemoglobinúria, vasoespasmo coronariano, arritmias, respostas vasovagais e lesão transitória do nervo frênico. Eventos neurológicos clinicamente manifestos, como acidente vascular encefálico e ataque isquêmico transitório, permanecem incomuns, embora lesões cerebrais silenciosas sejam detectadas por ressonância magnética após o procedimento. As estratégias preventivas incluem acesso vascular cuidadoso, punção transeptal guiada por ecocardiografia intracardíaca, anticoagulação periprocedimento rigorosa, limitação do número de aplicações, contato adequado entre o cateter e o tecido, hidratação e administração de nitroglicerina durante a ablação próxima às artérias coronárias. O manejo das respostas vagais exige disponibilidade imediata de estimulação cardíaca temporária ou terapia anticolinérgica. A PFA representa um avanço importante na segurança da ablação da FA ao reduzir lesões térmicas graves, embora as complicações relacionadas à eletroporação exijam atenção específica. Sua adoção segura requer estratégias de prevenção e manejo fundamentadas nos mecanismos das complicações à medida que seu uso se amplia na prática clínica.

Palavras-chave

Terapia de Eletroporação Irreversível; Fibrilação Atrial; Ablação por Cateter; Eletroporação

Correspondência: Alejandro Velasquez •
Beth Israel Deaconess Medical Center, 330 Brookline Avenue, Suite ES 217 (Department of Graduate Medical Education) / Deaconess Building, Suite 306, Boston, MA 02215
E-mail: avelasq4@bidmc.harvard.edu
Artigo recebido em 14/05/2026, revisado em 23/08/2026, aceito em 16/09/2026
Editor responsável pela revisão: Mauricio Scanavacca

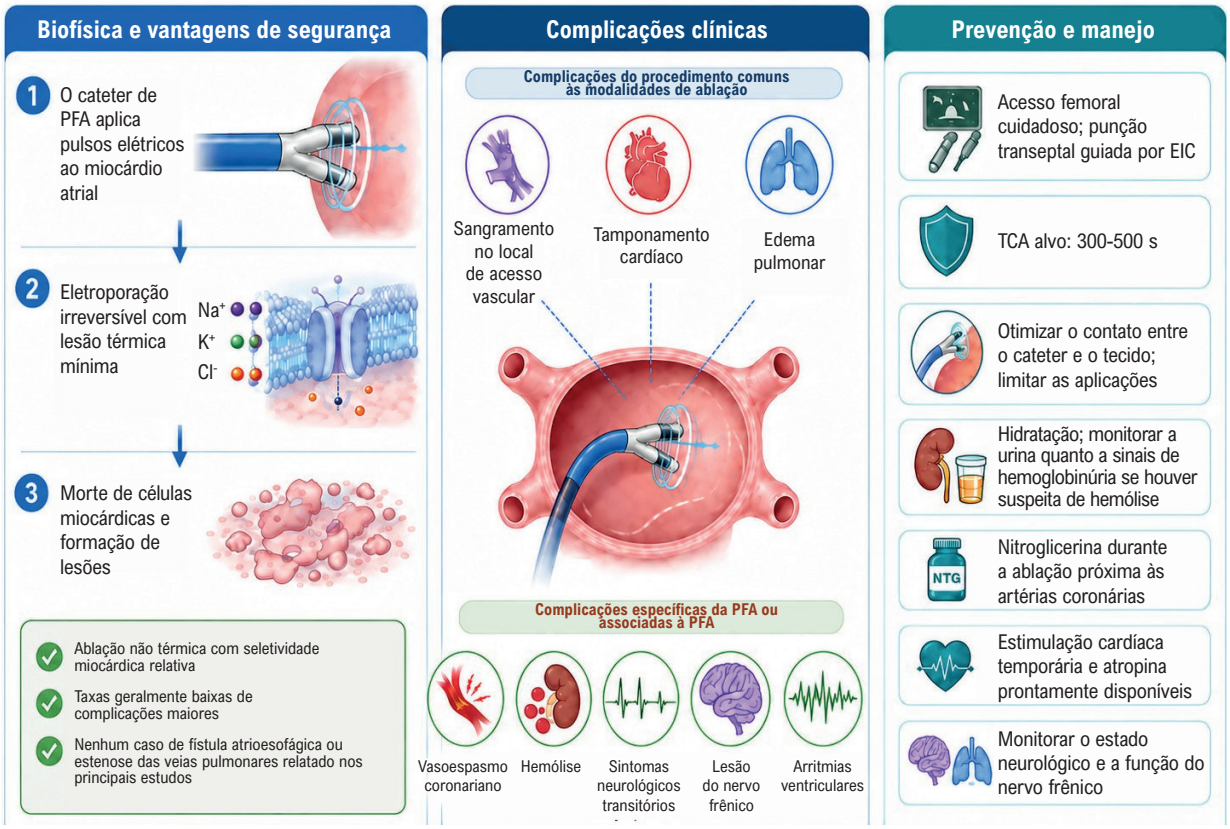
DOI: https://doi.org/10.36660/abc.20260389

Introdução

A ablação por cateter tornou-se uma estratégia de primeira linha para o controle do ritmo em pacientes com fibrilação atrial (FA) paroxística ou persistente sintomática.[1] Historicamente, as modalidades térmicas, incluindo a ablação por radiofrequência (ARF) e a ablação com criobalão, têm sido as abordagens padrão para o isolamento das veias pulmonares (IVP). Seus efeitos térmicos não seletivos podem causar lesão colateral de estruturas adjacentes, resultando em complicações raras, porém graves, como fístula atrioesofágica, estenose das veias pulmonares (VP) e paralisia persistente do nervo frênico.[1-3]

A ablação por campo pulsado (*pulsed field ablation* [PFA]) surgiu como uma alternativa não térmica. Ensaios clínicos randomizados e registros demonstraram eficácia não inferior, menor duração dos procedimentos e baixas taxas de complicações maiores em comparação com a ablação térmica. A ausência de recorrência de arritmias atriais aos 12 meses tem sido comparável à observada com a ablação térmica convencional, indicando que o perfil de segurança favorável da PFA é acompanhado de efetividade clínica sustentada.[2-8] Apesar da redução acentuada das complicações térmicas, a PFA apresenta riscos tanto específicos da modalidade de energia quanto relacionados ao procedimento (Figura Central). As plataformas de PFA comercialmente disponíveis diferem quanto às formas de onda, às configurações dos eletrodos e aos desenhos dos cateteres, características que podem influenciar seus perfis de complicações.

Figura Central: Segurança e Complicações da Ablação por Campo Pulsado para Fibrilação Atrial: Biofísica, Diagnóstico e Manejo



Arq Bras Cardiol. 2026; 123(10):e20260389

Visão geral da PFA e de seu mecanismo de ação, das complicações associadas ao procedimento e específicas da modalidade de energia, e das estratégias de prevenção e manejo baseadas nas evidências atuais e nos protocolos de segurança. EIC: ecocardiografia intracardíaca; NTG: nitroglicerina; PFA: ablação por campo pulsado; TCA: tempo de coagulação ativado.

Esta revisão narrativa examina 14 dos principais ensaios clínicos e registros, com foco na apresentação clínica, na prevenção e no manejo das complicações associadas à PFA (Tabela 1).[2-15]

Métodos

Esta revisão narrativa apresenta uma síntese baseada em evidências, em consonância com recomendações estabelecidas para o relato de revisões narrativas. Os autores realizaram uma busca no PubMed por estudos publicados entre 2019, quando foram publicados os primeiros ensaios clínicos de PFA, e 2026, utilizando combinações dos termos "pulsed field ablation", "irreversible electroporation", "atrial fibrillation", "complications", "safety" e "adverse events". Foram considerados elegíveis ensaios clínicos randomizados, registros multicêntricos e estudos pós-aprovação em seres humanos, revisados por pares e publicados em inglês, que relatassem desfechos de segurança do procedimento. As listas de referências dos estudos elegíveis e de revisões anteriores foram examinadas manualmente para identificar publicações relevantes sobre mecanismos e segurança, incluindo relatos de casos de complicações raras. Quatro autores realizaram, de forma independente, a triagem dos principais ensaios clínicos e registros. A inclusão foi definida por consenso, considerando a relevância clínica, o tamanho da amostra e a abrangência do relato de segurança, com prioridade para os maiores conjuntos de dados disponíveis. Os intervalos de incidência apresentados correspondem às menores e maiores estimativas dos estudos incluídos, e não a estimativas combinadas ou ponderadas.

Fundamentos biofísicos e técnicos da ablação por campo pulsado

Biofísica e mecanismo de ação

A PFA baseia-se na eletroporação irreversível (EIR), um mecanismo não térmico no qual pulsos elétricos

Tabela 1 – Principais ensaios clínicos, estudos e registros que relatam taxas de complicações associadas à PFA. Os desfechos primários de segurança são apresentados para ilustrar as diferenças nas definições entre os estudos

Estudo	n	Desfecho primário de segurança	Taxa de complicações
PULSED AF[2]	300	Ausência de eventos adversos graves relacionados ao procedimento e ao dispositivo	0,7%
ADVENT[3]	305*	Eventos adversos graves relacionados ao dispositivo e ao procedimento em até 7 dias; fístula atrioesofágica ou estenose das VPs em qualquer momento	2,1%
inspIRE[4]	226	Eventos adversos primários de início precoce em até 7 dias	0,0%
PULSE-EU[5]	48	Eventos adversos maiores precoces (< 7 dias) e tardios (> 7 dias) relacionados ao dispositivo ou ao procedimento	2,0%
MANIFEST-PF[6]	1.568	Desfecho composto de eventos adversos maiores agudos e tardios	Maiores: 1,9%; menores: 4,0%
MANIFEST-17K[7]	17.642	Desfecho composto de eventos adversos maiores agudos e tardios	Maiores: 0,98%; menores: 3,21%
MANIFEST-US[8]	41.968	Desfecho composto de eventos adversos maiores agudos e tardios	Maiores: 0,62%; menores: 2,10%
AdmIRE[9]	277	Eventos primários de segurança pré-especificados em até 7 dias; tamponamento cardíaco ou perfuração em até 30 dias; fístula atrioesofágica em até 90 dias; estenose das VPs em até 12 meses	2,9%
VOLT CE Mark[10]	150	Eventos adversos graves relacionados ao dispositivo e/ou ao procedimento em até 7 dias	2,7%
PFA vs ACB vs ARF[11]	214*	Desfecho composto de eventos adversos maiores	2,3%
FARADISE[12]	1.158	Eventos adversos graves relacionados ao dispositivo e ao procedimento do 7º dia até 12 meses	1,5%
VOLT-AF IDE[13]	392	Eventos adversos relacionados ao dispositivo e/ou ao procedimento em até 7 dias	1,9%
ADVANTAGE AF[14]	260	Eventos primários de segurança pré-especificados em até 7 dias; tamponamento cardíaco ou perfuração em até 30 dias; fístula atrioesofágica ou estenose das VPs em até 12 meses	2,3%
AVANT GUARD[15]	257*	Desfecho composto de eventos adversos graves relacionados ao dispositivo e ao procedimento em até 12 meses, na análise conjunta do grupo randomizado para PFA e da coorte de segurança designada para PFA	5,1%

**Número de pacientes no grupo de PFA. ACB: ablação com criobalão; ARF: ablação por radiofrequência; PFA: ablação por campo pulsado; VP: veia pulmonar.*

ultracurtos de alta tensão, aplicados a 1.500-2.000 V durante microssegundos a milissegundos, criam nanoporos permanentes na bicamada lipídica das células-alvo.[2-12] Acima de um limiar crítico de intensidade do campo elétrico, a lesão irreversível da membrana provoca morte celular sem lesão térmica substancial. Em contraste, a ARF destrói o tecido principalmente por necrose de coagulação induzida pelo aquecimento resistivo.

Uma vantagem fundamental da PFA é sua seletividade tecidual relativa, uma vez que diferentes tipos celulares apresentam diferentes limiares de EIR. Os cardiomiócitos são altamente suscetíveis a campos elétricos com intensidade de aproximadamente 400-600 V/cm, enquanto os tecidos do músculo liso vascular, do nervo frênico, do esôfago e das VPs requerem intensidades substancialmente maiores para sofrer EIR. Essas diferenças ajudam a explicar as baixas taxas de lesão esofágica clinicamente significativa e a ausência de casos relatados de estenose das VPs após a PFA.[3,5-14]

Características dos pulsos e padrões de complicações

A duração dos pulsos e o desenho das formas de onda são determinantes fundamentais da eficácia e da segurança. Pulsos com duração de microssegundos permanecem como padrão clínico, apesar de sua associação com estimulação substancial da musculatura esquelética. Pulsos bifásicos

simétricos reduzem a estimulação neuromuscular em comparação com formas de onda monofásicas, limitando a ativação da musculatura esquelética e o desconforto do paciente durante a sedação consciente. Os sistemas atuais aplicam sequências coordenadas de pulsos separadas por intervalos interpulsos, limitando o acúmulo de calor e os efeitos sobre tecidos não alvo.[8-10,16]

O protocolo de aplicação de energia também influencia os padrões de complicações. O aumento do número de pulsos pode ampliar a profundidade das lesões, mas também aumentar o aquecimento colateral por efeito Joule e a formação de microbolhas, potencialmente elevando o risco de embolização gasosa e de eventos neurológicos associados, incluindo acidente vascular encefálico (AVE) e lesões cerebrais silenciosas.

Desenho dos cateteres

As plataformas de PFA variam substancialmente quanto à arquitetura dos cateteres. Os desenhos disponíveis incluem arranjos multieletrodos de aplicação única, como os de cinco hastes (*pentaspline*) e os circulares com alça fixa ou variável; sistemas baseados em balão; cateteres esféricos ou com ponta em malha (*lattice-tip*); e dispositivos focais. Essas plataformas diferem quanto ao número e à configuração dos eletrodos, ao calibre dos cateteres, à possibilidade de ajuste, à avaliação do contato com o tecido, à integração com sistemas de mapeamento e à aplicação pretendida, que abrange desde o IVP até a ablação focal e a modificação do substrato.[1-14,15] Essas diferenças podem influenciar a formação das lesões, a eficiência do procedimento, a exposição do sangue intracavitário ao campo elétrico e o risco de complicações. Portanto, os achados de segurança devem ser interpretados no contexto de cada plataforma, em vez de generalizados para a PFA como uma tecnologia homogênea.[17-19]

As configurações monopolares, que aplicam energia entre a ponta do cateter e um eletrodo dispersivo, podem produzir lesões mais profundas, mas também maior estimulação da musculatura esquelética e dor, assim como as formas de onda monofásicas. As configurações bipolares podem restringir o campo elétrico e reduzir a ativação neuromuscular colateral. A geometria das lesões também depende do desenho do cateter, de sua orientação em relação às fibras miocárdicas e do contato com o tecido. Embora a PFA seja menos dependente do contato do que a ablação térmica, mesmo pequenos aumentos na distância entre o cateter e o tecido podem elevar substancialmente a tensão necessária para a formação das lesões, aumentando o risco de formação de bolhas e de lesão térmica localizada.[16,17,20]

Complicações da ablação por campo pulsado

Complicações vasculares

As complicações vasculares e relacionadas ao acesso permanecem entre os eventos adversos mais comuns após a ablação, embora não sejam específicas da PFA. As estimativas de incidência relatadas para as complicações individuais variam de 0,002% a 3,000% nos principais estudos de PFA (Tabela 2). Esses eventos estão relacionados ao acesso vascular e à punção transeptal, e não à eletroporação em si, e também ocorrem com outras modalidades de ablação. Embora os sistemas de PFA utilizem bainhas de maior calibre, entre 8,5F e 17F, o calibre da bainha, isoladamente, não foi associado de forma independente a eventos vasculares maiores.[21,22]

Sangramento e complicações no local de acesso

O hematoma inguinal é a complicação mais comum relacionada ao acesso (0,3%-3,0%) e geralmente é tratado de forma conservadora com compressão e curativos compressivos; raramente há necessidade de transfusão. Pseudoaneurisma (< 0,3%) e fístula arteriovenosa (< 0,3%) são menos comuns e diagnosticados por ultrassonografia duplex. Pseudoaneurismas pequenos podem regredir espontaneamente ou com compressão guiada por ultrassonografia, enquanto a injeção de trombina ou a cirurgia é reservada para lesões maiores ou refratárias. A hemorragia retroperitoneal é rara (0,002%-0,070%), porém potencialmente fatal, e geralmente decorre de punção femoral acima do ligamento inguinal. Um caso fatal foi relatado entre mais de 40.000 pacientes no MANIFEST-US.[8]

Complicações trombóticas e embólicas

As complicações trombóticas e embólicas, incluindo trombose venosa profunda (0,004%-0,060%) e embolia gasosa (< 1%), permanecem incomuns. A anticoagulação periprocedimento ininterrupta com anticoagulantes orais diretos ou antagonistas da vitamina K, associada à anticoagulação intraprocedimento com tempo de coagulação ativado (TCA) alvo de 300-500 s, reduz substancialmente o risco tromboembólico. A lavagem rotineira das bainhas e dos cateteres com solução salina heparinizada ajuda a prevenir a retenção de ar.

O acesso vascular guiado por ultrassonografia é uma estratégia preventiva fundamental, pois melhora a identificação dos vasos e a canulação na primeira tentativa, além de reduzir a punção arterial inadvertida.[22,23] Um ensaio clínico randomizado demonstrou que os dispositivos de fechamento vascular foram superiores às suturas em oito isoladas após a retirada de bainhas de grande calibre, reduzindo o tempo até a deambulação e os sangramentos menores.[24]

Lesão da parede aórtica

Foi relatado realce tardio transitório pelo gadolínio na parede da aorta descendente após PFA próxima à parede posterior do átrio esquerdo (AE). Diferentemente da lesão vascular relacionada ao acesso, esse achado ocorreu em taxas semelhantes às observadas com a ablação térmica (33% vs 43%; p = 0,52) e regrediu completamente em 3 meses, sem aneurisma, dissecção ou estenose, sugerindo um efeito inespecífico.[25] A dissecção aórtica associada ao acesso ventricular retrógrado é uma complicação mecânica, e não relacionada à energia, e não foi relatada nos 14 ensaios clínicos revisados. O acesso guiado por ultrassonografia e a avaliação da aorta por imagem antes do procedimento podem ajudar a mitigar esse risco.[26]

Tabela 2 – Complicações vasculares associadas à PFA

Complicação	Incidência	Mecanismo	Apresentação clínica	Manejo
TVP	0,004%-0.06%	Lesão vascular relacionada à bainha e estase venosa	Dor e edema no membro	Anticoagulação
Hemorragia retroperitoneal	0,002%-0.07%	Punção acima do ligamento inguinal, resultando em acúmulo de sangue no espaço retroperitoneal não compressível	Hipotensão, dor no flanco e queda acentuada da hemoglobina	Confirmação por TC; manejo desde tratamento conservador até reparo endovascular ou cirúrgico
Fístula arteriovenosa	0,02%-0,3%	Punção arterial inadvertida durante a canulação venosa	Sopro contínuo, frêmito palpável e edema no membro	Compressão, injeção de trombina ou reparo cirúrgico
Embolia gasosa	0,038%-0,3%	Entrada de ar durante a manipulação do cateter e as trocas de bainhas	Sintomas neurológicos ou alterações hemodinâmicas	Prevenção de entrada adicional de ar, oxigênio suplementar e posicionamento em Trendelenburg; oxigenoterapia hiperbárica nos casos graves
Pseudoaneurisma	0,1%-0,3%	Ruptura da parede vascular, criando comunicação entre a luz do vaso e o espaço extravascular	Dor, edema, massa pulsátil e frêmito palpável	Compressão ou injeção de trombina; reparo cirúrgico nos casos refratários
Sangramento ou hematoma	0,3%-3%	Inserção de bainha de grande calibre, causando extravasamento de sangue para os tecidos adjacentes	Achados que variam de pequenas equimoses a hematomas inguinais em expansão	Manejo conservador com compressão manual e curativos compressivos; transfusão nos casos graves
Total de complicações vasculares*	0,25%-8,1%	—	—	—

*As estimativas de incidência representam os intervalos observados nos estudos revisados. As complicações estão ordenadas de forma crescente pelo limite superior do intervalo de incidência; em caso de empate, considera-se o limite inferior. *Intervalo das taxas globais de complicações vasculares relatadas nos 14 ensaios clínicos e registros revisados. PFA: ablação por campo pulsado; TC: tomografia computadorizada; TVP: trombose venosa profunda.*

Complicações cardíacas

As estimativas de incidência relatadas para os eventos adversos cardíacos individuais variam de 0,01% a 2,00% nos estudos revisados (Tabela 3). Esses eventos incluem complicações do procedimento não específicas da PFA, como tamponamento cardíaco e derrame pericárdico, além de eventos associados à PFA, incluindo pericardite, vasoespasmo coronariano, arritmias e complicações envolvendo dispositivos cardíacos eletrônicos implantáveis (DCEIs).

Tamponamento cardíaco e derrame pericárdico

O tamponamento cardíaco está relacionado principalmente à manipulação do cateter e à punção transeptal, e não à aplicação de energia da PFA. Ainda assim, permanece uma complicação importante, com estimativas de incidência de 0,7%-1,6%.[2-8] O tamponamento manifesta-se como derrame pericárdico agudo com comprometimento hemodinâmico e requer pericardiocentese percutânea de urgência. Derrames pericárdicos sem comprometimento hemodinâmico ocorreram em 0,12%-2,00% dos casos e foram tratados de forma conservadora.

A proficiência em ecocardiografia intracardíaca (EIC) é essencial para o acesso transeptal com as bainhas de maior calibre utilizadas na PFA. Recomenda-se fortemente uma técnica com fio-guia espiral que permita a dilatação sequencial do septo interatrial sob orientação da EIC.[27] A EIC também facilita o reconhecimento precoce do tamponamento e a intervenção imediata.

Pericardite

A pericardite após PFA é incomum, ocorrendo em 0,06%-2,00% dos casos, e pode resultar de uma resposta inflamatória à formação das lesões.[28] Um estudo de biomarcadores demonstrou maior lesão miocárdica após PFA do que após ARF, compatível com uma maior área de superfície submetida à ablação, porém com resposta inflamatória sistêmica mais discreta. Esse achado pode ajudar a explicar o curso geralmente autolimitado da pericardite

Tabela 3 – Complicações cardíacas associadas à PFA

Complicação	Incidência	Mecanismo	Apresentação clínica	Manejo
Complicações relacionadas aos DCEIs	0,01%-0,08%	Interferência eletromagnética e manipulação do cateter próximo aos componentes do dispositivo	Deslocamento de eletrodos ou disfunção do dispositivo detectada durante sua interrogação	Reimplante do marca-passo; estimulação ventricular de suporte durante o procedimento
Vasoespasmo coronariano	0,1%-0,14%	Modulação autonômica e sequestro de NO próximo às artérias coronárias	Estreitamento subclínico à angiografia; casos sintomáticos podem apresentar alterações do segmento ST, dor torácica ou arritmias	Nitroglicerina IV; nitroglicerina intracoronária nos casos refratários
IAM ou SCA	0,05%-0,4%	Vasoespasmo coronariano ou trombose; o mecanismo permanece incompletamente esclarecido	Supradesnivelamento do segmento ST e evidência angiográfica de comprometimento coronariano	ICP; nitroglicerina IV
Tamponamento cardíaco	0,7%-1,6%	Manipulação do cateter e punção transeptal	Derrame pericárdico agudo com comprometimento hemodinâmico, incluindo hipotensão, taquicardia e choque obstrutivo	Drenagem pericárdica percutânea ou cirúrgica
Pericardite	0,06%-2%	Resposta inflamatória discreta após a formação de lesões não térmicas	Alterações no ECG, derrame pericárdico, atrito pericárdico e dor torácica	Tratamento anti-inflamatório e monitorização
Derrame pericárdico	0,12%-2%	Manipulação do cateter e resposta inflamatória	Pequeno derrame detectado por ecocardiografia, sem comprometimento hemodinâmico	Acompanhamento conservador; pericardiocentese se houver repercussão hemodinâmica significativa
Total de complicações cardíacas*	0,6%-4,16%	—	—	—

*As estimativas de incidência representam os intervalos observados nos estudos revisados. *Intervalo das taxas globais de complicações cardíacas relatadas nos 14 ensaios clínicos e registros revisados. DCEI: dispositivo cardíaco eletrônico implantável; ECG: eletrocardiograma; IAM: infarto agudo do miocárdio; ICP: intervenção coronária percutânea; IV: intravenoso; NO: óxido nítrico; PFA: ablação por campo pulsado; SCA: síndrome coronariana aguda.*

após PFA.[29] A maioria dos casos respondeu ao tratamento medicamentoso ou não exigiu intervenção específica. A limitação do número de aplicações por procedimento é a principal estratégia preventiva.

Vasoespasmo coronariano e síndrome coronariana aguda

O vasoespasmo coronariano é uma complicação rara, porém importante e específica da PFA, relatada em 0,10%-0,14% dos casos e mais frequente do que com a ARF.[6-8,14] A maioria dos casos ocorre quando a energia é aplicada próxima às artérias coronárias, particularmente durante a ablação do istmo mitral próximo à artéria circunflexa ou do istmo cavo-tricúspide próximo à artéria coronária direita.[30,31] Em contraste, o IVP de rotina não foi associado a maior risco anatômico de vasoespasmo coronariano, pois as VPs não estão próximas às principais artérias coronárias. O mecanismo provavelmente envolve desregulação autonômica desencadeada pelo campo elétrico e sequestro de óxido nítrico (NO) mediado pela hemólise. A hemoglobina livre liberada durante a PFA reage com o NO, reduzindo sua biodisponibilidade local e promovendo hipercontratilidade do músculo liso coronariano.[32]

A maioria dos casos é subclínica e manifesta-se como estreitamento coronariano transitório à angiografia, sem alterações eletrocardiográficas ou comprometimento hemodinâmico. As apresentações sintomáticas incluem supradesnivelamento do segmento ST, dor torácica, hipotensão e arritmias ventriculares. No MANIFEST-17K, um paciente desenvolveu fibrilação ventricular (FV) que exigiu

ressuscitação e desfibrilação; no ADVANTAGE AF, um paciente precisou de intervenção coronária percutânea.[7,14]

A nitroglicerina intravenosa reverte rapidamente o vasoespasmo na maioria dos casos. Recomenda-se sua administração profilática em procedimentos que envolvam regiões adjacentes às artérias coronárias. Um dos esquemas relatados consiste em um bolus de 3.000 μg, seguido de bolus de 2.000 μg em intervalos de 2 min após o início da aplicação de energia.[33] O preparo para o procedimento deve incluir a disponibilidade de nitroglicerina em doses de 2.000-4.000 μg e suporte da cardiologia intervencionista para casos refratários.

Arritmias

A PFA possui um risco pró-arrítmico intrínseco e dependente do momento de aplicação: a aplicação de energia durante o período vulnerável ventricular, correspondente à onda T, pode induzir FV, particularmente com formas de onda monofásicas. A sincronização da aplicação com a onda R minimiza esse risco.[34] Outros mecanismos incluem arritmias desencadeadas por vasoespasmo coronariano (ver subseção "Vasoespasmo coronariano e síndrome coronariana aguda") e bradicardia associada à PFA (ver subseção "Respostas vasovagais"). Casos raros de morte súbita inexplicada foram relatados no MANIFEST-US (0,019%), predominantemente nos primeiros 3 dias após o procedimento; a relação causal permanece incerta.[8]

Interações com dispositivos cardíacos eletrônicos implantáveis

Complicações relacionadas aos DCEIs foram relatadas em 0,01%-0,08% dos casos.[7,8] Os pulsos de alta tensão da PFA podem causar interferência eletromagnética, enquanto a manipulação do cateter pode provocar deslocamento ou fratura dos eletrodos. Dois mecanismos específicos desses dispositivos merecem atenção. Primeiro, o acoplamento indutivo da energia da PFA aos eletrodos dos DCEIs pode desencadear FV por um mecanismo de R sobre T (ver subseção "Arritmias"). Segundo, os pulsos de alta tensão podem danificar diretamente os circuitos internos, causando disfunção do gerador ou reinicialização do *software* e potencialmente exigindo a substituição do dispositivo, independentemente de eventos arrítmicos.[35-37] As medidas preventivas incluem a interrogação do dispositivo antes e após o procedimento, a reprogramação para evitar hipersensibilidade (*oversensing*), a prevenção do contato com os componentes dos DCEIs, a disponibilidade de estimulação ventricular de suporte e a monitorização eletrocardiográfica contínua.[38-41]

Complicações pulmonares

As estimativas de incidência relatadas para as complicações pulmonares variam de 0,028% a 1,500% (Tabela 4). Esses eventos estão predominantemente relacionados ao procedimento, e não especificamente à PFA. Não foram relatados casos de estenose das VPs após PFA.[1-8]

Edema pulmonar e pneumonia

O edema pulmonar (0,1%-1,5%) é atribuído à sobrecarga volêmica periprocedimento, particularmente em procedimentos mais longos com maiores volumes de irrigação. Pacientes com insuficiência cardíaca preexistente requerem monitorização cuidadosa do balanço hídrico. O tratamento inclui diuréticos intravenosos e ventilação não invasiva. A pneumonia (0,028%-0,070%) é rara e está mais associada à hospitalização ou à aspiração do que à própria PFA.[7,8]

Aprisionamento de fio-guia e cateter

O aprisionamento de fio-guia ou cateter em uma VP inferior é uma complicação mecânica rara, não relacionada à aplicação de energia, que não foi relatada nos 14 ensaios

Tabela 4 – Complicações pulmonares associadas à PFA

Complicação	Incidência	Mecanismo	Apresentação clínica	Manejo
Estenose das VPs	Nenhum caso relatado	Estreitamento ostial progressivo secundário ao remodelamento induzido pela aplicação de energia	Dispneia e hemoptise meses após a ablação	Implante de stent nas VPs; nenhum caso que exigisse tratamento foi relatado com PFA
Pneumonia	0,028%-0,07%	Ausência de relação causal direta com a PFA; provavelmente relacionada à hospitalização ou à aspiração	Febre, leucocitose e sintomas respiratórios	Antibioticoterapia
Edema pulmonar	0,1%-1,5%	Sobrecarga volêmica periprocedimento e disfunção atrial transitória após ablação extensa	Dispneia e hipoxemia nas primeiras horas a dias após a ablação	Diuréticos IV e VNI
Total de complicações pulmonares*	0,028%-1,5%	—	—	—

*As estimativas de incidência representam os intervalos observados nos estudos revisados. *Este intervalo corresponde às menores e maiores estimativas de incidência das complicações pulmonares listadas acima nos 14 ensaios clínicos e registros revisados. IV: intravenoso; PFA: ablação por campo pulsado; VNI: ventilação não invasiva; VP: veia pulmonar.*

clínicos revisados. Entretanto, uma série de casos descreveu três eventos em 229 procedimentos (1,3%), manifestados como perda súbita da mobilidade do cateter após seu avanço distal para um pequeno ramo.[42] Deve-se evitar a tração vigorosa devido ao risco de dissecção ou tamponamento. A abordagem preferencial consiste em recolher o conjunto para dentro da bainha para restabelecer o alinhamento coaxial antes de aplicar tração suave; a retirada assistida por balão ou cirúrgica pode ser necessária se essas manobras falharem.

Hemólise e complicações renais

As estimativas de incidência relatadas para hemólise e complicações renais, entre os eventos adversos mais característicos e específicos da PFA, variam de 0,009% a 0,760% (Tabela 5). A eletroporação dos eritrócitos circulantes estabelece uma relação direta entre as propriedades biofísicas da PFA e essas manifestações clínicas subsequentes.

Hemólise

Apesar de sua seletividade miocárdica relativa, a PFA causa hemólise intravascular dependente da dose, pois os eritrócitos são suscetíveis à eletroporação nas intensidades de campo elétrico utilizadas clinicamente. Pulsos de alta energia rompem as membranas dos eritrócitos, liberando hemoglobina livre na circulação.[32] O contato inadequado com o tecido durante a ablação pode aumentar a exposição do sangue intracavitário ao campo elétrico, intensificando esse efeito. As taxas de hemólise também diferem substancialmente entre as plataformas de PFA. Um estudo prospectivo com 245 pacientes, que comparou quatro sistemas comercialmente disponíveis, relatou incidência global de hemólise de 16,7%, com taxas de 37,0%, 26,1% e 14,7% para cateteres de cinco hastes, de arranjo circular e com ponta em malha, respectivamente. Não foi observado comprometimento renal clinicamente aparente.[17]

A hemólise abrange desde alterações bioquímicas subclínicas, incluindo redução da haptoglobina e aumento da bilirrubina indireta ou da lactato desidrogenase, até eventos clinicamente significativos com queda mensurável da hemoglobina ou necessidade de transfusão. A hemoglobinúria, identificada visualmente ou por teste com fita reagente urinária, indica maior intensidade da hemólise e pode evoluir para lesão renal aguda (LRA) associada à hemoglobinúria, sua manifestação mais grave. A incidência relatada varia amplamente conforme os limiares diagnósticos e os métodos de rastreamento. Casos clinicamente significativos podem ser subestimados porque poucos estudos avaliam sistematicamente a hemólise. A limitação das aplicações de PFA e a otimização do contato com o tecido são as principais estratégias preventivas. A monitorização laboratorial após o procedimento pode orientar o manejo.[17,43]

Lesão renal aguda induzida por hemólise

A LRA associada à hemoglobinúria ocorre em 0,02%-0,40% dos casos.[2-10] A hemoglobina livre é filtrada pelos rins e pode causar lesão tubular, estresse oxidativo e inflamação.[44,45] Os critérios de creatinina sérica da definição de LRA do Kidney Disease: Improving Global Outcomes incluem aumento de pelo menos 0,3 mg/dL em 48 h ou elevação para pelo menos 1,5 vez o valor basal em 7 dias.[46] A maioria dos casos é subclínica, embora possam ocorrer hematúria, hemoglobinúria ou oligúria. O manejo inclui hidratação intravenosa cuidadosamente ajustada e, raramente, hemodiálise temporária. O prognóstico é geralmente favorável, com recuperação completa.

Complicações neurológicas e autonômicas

As estimativas de incidência relatadas para as complicações neurológicas individuais variam de 0,06% a 2,00% nos estudos revisados, excluindo lesões cerebrais

Tabela 5 – Hemólise e complicações renais associadas à PFA

Complicação	Incidência	Mecanismo	Apresentação clínica	Manejo
Hemólise	0,009%-0,76%	Eletroporação das membranas dos eritrócitos dependente da dose, resultando em hemólise intravascular e liberação de hemoglobina livre	Alterações laboratoriais subclínicas, incluindo redução da haptoglobina e aumento da LDH e da bilirrubina indireta; anemia	Limitação do número de pulsos; monitorização laboratorial após o procedimento
LRA	0,02%-0,4%	Lesão tubular mediada pela hemoglobina, estresse oxidativo e inflamação renal	Elevação da creatinina sérica que atende aos critérios KDIGO; hematúria, hemoglobinúria ou oligúria	Hidratação IV; hemodiálise temporária nos casos graves
Total de hemólise e complicações renais*	0,009%-0,76%	—	—	—

*As estimativas de incidência representam os intervalos observados nos estudos revisados. *Este intervalo corresponde às menores e maiores estimativas de incidência de hemólise e das complicações renais listadas acima nos 14 ensaios clínicos e registros revisados. IV: intravenoso; KDIGO: Kidney Disease: Improving Global Outcomes; LDH: lactato desidrogenase; LRA: lesão renal aguda; PFA: ablação por campo pulsado.*

Tabela 6 – Complicações neurológicas e autonômicas associadas à PFA

Complicação	Incidência	Mecanismo	Apresentação clínica	Manejo
AVE	0,1%-2%	Embolização de microbolhas, ar ou detritos teciduais durante a manipulação do cateter	Déficits neurológicos focais, afasia ou alterações visuais	Anticoagulação ininterrupta e TCA alvo de 300-500 s para prevenção; avaliação neurológica imediata
AIT	0,08%-0,4%	Mesmo mecanismo do AVE	Déficits neurológicos transitórios que se resolvem em até 24 h	Mesmo manejo do AVE
LNF	0,06%-1,3%	Aplicação de PFA próxima ao nervo frênico, causando hiperpolarização da membrana; raramente, lesão direta do nervo	Frequentemente assintomática; dispneia posicional ou disfunção diafragmática detectada pela monitorização do PAMC	Geralmente autolimitada; limitação das aplicações próximas à VPSD para prevenção
LCSs	5%-20,5%§	Embolização sistêmica de microbolhas, ar ou detritos teciduais durante a manipulação do cateter	Lesões subclínicas detectadas por RM-PD	Pausa de 10 s entre as aplicações e anticoagulação periprocedimento rigorosa para prevenção
Respostas vasovagais	~30%-60%†	Ativação dos plexos ganglionares extracardíacos próximos às veias pulmonares	Bradicardia, pausas sinusais, bloqueio AV, hipotensão ou assistolia durante a aplicação de energia	Terapia anticolinérgica profilática; início do IVP pela VPSD; estimulação cardíaca temporária quando necessária
Total de complicações neurológicas*	0,06%-2%	—	—	—

*As estimativas de incidência representam os intervalos observados nos estudos revisados. *Este intervalo corresponde às menores e maiores estimativas de incidência das complicações neurológicas listadas acima, excluindo lesões cerebrais silenciosas e respostas vasovagais, nos 14 ensaios clínicos e registros revisados. §As lesões cerebrais silenciosas foram excluídas do intervalo total de complicações neurológicas porque foram relatadas apenas em estudos com rastreamento sistemático por RM-PD após o procedimento. †As respostas vasovagais foram excluídas do intervalo total de complicações neurológicas devido à inconsistência de seu relato entre os estudos e à sua natureza frequentemente transitória. AIT: ataque isquêmico transitório; AV: atrioventricular; AVE: acidente vascular encefálico; IVP: isolamento das veias pulmonares; LCS: lesão cerebral silenciosa; LNF: lesão do nervo frênico; PAMC: potencial de ação muscular composto; PFA: ablação por campo pulsado; RM-PD: ressonância magnética ponderada em difusão; TCA: tempo de coagulação ativado; VPSD: veia pulmonar superior direita.*

silenciosas e respostas vasovagais (Tabela 6). O AVE e o ataque isquêmico transitório (AIT) ocorrem em taxas comparáveis às observadas com a ablação térmica. As lesões cerebrais silenciosas e as respostas vasovagais merecem consideração separada devido às diferenças em seus mecanismos, detecção e relato.

Acidente vascular encefálico e ataque isquêmico transitório

O AVE (0,1%-2,0%) e o AIT (0,08%-0,40%) estão entre as complicações neurológicas mais graves da ablação por cateter.[2-8] Embora o mecanismo não térmico da PFA possa reduzir a formação de coágulos, a geração de microbolhas, a presença de trombo preexistente no AE e os detritos liberados durante a manipulação do cateter permanecem fontes importantes de êmbolos.[18]

O AVANT GUARD foi temporariamente interrompido após seis casos de AVE relacionados ao procedimento, número superior ao previsto. Esses eventos foram atribuídos à inclusão de pacientes mais idosos e de maior risco, além de fatores relacionados ao procedimento. Após modificações no protocolo, incluindo rastreamento mais rigoroso, intensificação das medidas de anticoagulação e TCA alvo ≥ 350 s, a taxa de eventos de segurança no grupo de ablação diminuiu de 6% para 3%, sem novos casos de AVE após a retomada do ensaio clínico.[15] A prevenção baseia-se em anticoagulação ininterrupta, TCA intraprocedimento alvo de 300-500 s, exclusão de trombo no AE por ecocardiografia transesofágica antes do procedimento, prevenção da retirada rápida do cateter e lavagem das bainhas e dos cateteres com solução salina heparinizada.

Lesões cerebrais silenciosas

As lesões cerebrais silenciosas (LCSs) são lesões isquêmicas cerebrais subclínicas detectadas por ressonância magnética ponderada em difusão (RM-PD), na ausência de sintomas neurológicos. As estimativas de incidência relatadas nos ensaios clínicos de PFA variam de 5,0% a 20,5%.[2-7] Uma revisão sistemática e metanálise em rede de 86 ensaios clínicos, envolvendo 10.456 pacientes, estimou incidência combinada de 14,4% nas coortes de PFA, sem diferença estatisticamente significativa em comparação com a ablação térmica.[47] As taxas de detecção dependem de a avaliação por imagem ser realizada sistematicamente ou em resposta a sintomas, com taxas mais elevadas nas coortes submetidas a exames de rotina.

Entretanto, essa estimativa combinada pode ocultar diferenças substanciais entre as plataformas de cateteres. As taxas relatadas de LCSs são baixas com cateteres de cinco hastes (3,0%-8,8%),[48,49] intermediárias com cateteres de arranjo circular multieletrodos (8,9%-22,0%)[19] e acentuadamente maiores com cateteres circulares de alça variável (66,7%-85,0%). Estes últimos também foram associados a uma distribuição atípica envolvendo a circulação posterior e, em uma coorte, à interrupção precoce do estudo após um AVE incapacitante.[19,50] A discrepância entre as baixas taxas de AVE clinicamente manifesto (< 1%) e a frequência expressiva de LCSs detectadas por ressonância magnética pode refletir o pequeno tamanho das lesões, frequentemente subcorticais, que podem não produzir déficits neurológicos evidentes.[19]

Os protocolos de prevenção específicos para PFA ainda não estão definidos, embora ajustes no fluxo de trabalho próprios de cada plataforma pareçam promissores. Em um ensaio clínico com cateter de alça variável, modificações no fluxo de trabalho que incluíram uma pausa de 10 s entre as aplicações de energia foram seguidas de redução na incidência de LCSs, de quatro dos primeiros seis participantes para quatro dos 33 participantes subsequentes.[50] Esse achado sugere que o intervalo entre as aplicações pode constituir uma estratégia de mitigação de risco. A anticoagulação periprocedimento rigorosa também é recomendada com base nas evidências da ablação térmica.

Lesão do nervo frênico

A lesão do nervo frênico (LNF) foi relatada em 0,06%-1,30% dos casos nos principais ensaios clínicos de PFA. Entretanto, o rastreamento sistemático frequentemente não foi realizado, e a detecção baseou-se principalmente nos sintomas ou na elevação de um hemidiafragma à radiografia de tórax.[2-8] Um estudo prospectivo que utilizou uma abordagem mais sensível, a monitorização do potencial de ação muscular composto (PAMC), detectou paralisia diafragmática em 40,6% dos pacientes. LNF incompleta permanecia presente ao final do procedimento em 18,8%, e um paciente apresentava disfunção persistente aos 3 meses.[51] O mecanismo proposto é a hiperpolarização da membrana do nervo frênico, particularmente durante a ablação próxima à VP superior direita (VPSD). A LNF transitória é autolimitada, enquanto a paralisia persistente requer monitorização do comprometimento respiratório. A limitação das aplicações próximas à VPSD e a prevenção do posicionamento profundo do cateter na veia são medidas preventivas recomendadas.[51-53]

Respostas vasovagais

As respostas vasovagais, incluindo bradicardia, pausas sinusais, bloqueio atrioventricular, hipotensão e assistolia durante a aplicação de energia, ocorrem mais frequentemente com PFA do que com ablação térmica, acometendo aproximadamente 30%-60% dos procedimentos.[54,55] Em um estudo retrospectivo, respostas vagais ocorreram em 41% dos procedimentos de PFA, em comparação com 5,1% dos procedimentos de ARF.[56] O mecanismo envolve a despolarização direta dos plexos ganglionares extracardíacos próximos às VPs. Diferentemente da necrose ganglionar induzida pela ARF, a PFA preserva a integridade estrutural enquanto desencadeia ativação autonômica aguda.[57]

Um estudo prospectivo demonstrou que iniciar o IVP pela VPSD, em vez da VP superior esquerda, reduziu as respostas vasovagais de 78% para 13%, provavelmente por interromper a influência do plexo ganglionar anterior direito sobre o nó sinoatrial.[58] Esse efeito também se estendeu à ablação subsequente da VP inferior esquerda (28% vs 0%), mas não da VP inferior direita. O estudo não avaliou diretamente o início da ablação por uma VP inferior. O manejo das respostas vasovagais inclui estimulação cardíaca temporária quando necessária. A administração profilática de atropina (0,3–1,0 mg) ou glicopirrolato (0,2 mg) antes da punção venosa pode reduzir a incidência e a gravidade desses eventos.[59,60]

Complicações gastrintestinais

Não foram relatadas fístula atrioesofágica nem lesão esofágica significativa nos 14 estudos de PFA revisados, incluindo aqueles com endoscopia após o procedimento.[2-8] No MANIFEST-17K, a endoscopia realizada em 29 pacientes identificou edema esofágico em quatro (13,8%), sem sequelas clínicas.[7] Foi relatado pelo menos um caso de ulceração esofágica após PFA, embora não tenha sido realizada endoscopia antes do procedimento para excluir uma lesão preexistente.[61] Estudos pré-clínicos em suínos com aplicação direta de PFA no esôfago demonstraram apenas alterações transitórias da mucosa. Um estudo recente de Nies et al. identificou pequenas lesões não transmurais em 24 h, que regrediram em 14 dias.[62,63] A preservação do esôfago pode decorrer de sua retração natural durante a aplicação de energia e da eletroporação reversível de tecidos não alvo expostos a campos elétricos abaixo do limiar para lesão irreversível. Esses achados apoiam a dispensa da monitorização esofágica de rotina.

Implicações clínicas e limitações

Ao reduzir substancialmente o risco de lesão térmica, a PFA tem possibilitado conjuntos de lesões mais extensos, incluindo o isolamento da parede posterior e a ablação de alvos fora das VPs. Entretanto, a PFA modificou a distribuição dos riscos do procedimento, sem eliminá-los. O vasoespasmo coronariano, a LRA associada à hemólise, as arritmias e as interações com

DCEIs exigem atenção contínua à medida que sua adoção se amplia. Os protocolos institucionais devem incorporar medidas preventivas direcionadas, incluindo nitroglicerina antes da ablação dos istmos, hidratação e monitorização da hemólise durante procedimentos prolongados, além de interrogação dos DCEIs com disponibilidade de estimulação cardíaca de suporte.

A interpretação dos dados atuais de segurança é limitada pela heterogeneidade substancial. Grande parte das evidências provém de centros de alto volume que adotaram a PFA precocemente, com definições de complicações, práticas de rastreamento e durações de acompanhamento inconsistentes. As comparações diretas entre plataformas permanecem limitadas. Registros multicêntricos prospectivos com definições padronizadas e acompanhamento superior a 1 ano são necessários para estabelecer a manutenção das vantagens de segurança da PFA e identificar complicações tardias.

Conclusão

A PFA representa um avanço importante na segurança da ablação da FA ao reduzir lesões térmicas graves, embora os riscos do procedimento persistam e as complicações relacionadas à eletroporação exijam atenção específica. Sua adoção segura depende de estratégias de prevenção e manejo fundamentadas nos mecanismos dessas complicações e nas características de cada plataforma. À medida que seu uso se amplia na prática clínica, a padronização do relato de segurança e o acompanhamento em longo prazo serão essenciais para esclarecer as diferenças entre plataformas e identificar eventos adversos incomuns ou tardios.

Contribuição dos Autores

Concepção e desenho da pesquisa: Velasquez A, Silva GO, d'Avila A; Obtenção de dados: Velasquez A, Silva GO, Moraes HGM; Análise e interpretação dos dados: Silva GO, Moraes HGM, d'Avila A; Redação do manuscrito: Velasquez A, Silva GO, Moraes HGM, d'Avila A; Revisão crítica do manuscrito quanto ao conteúdo intelectual importante: Velasquez A, Silva GO, Moraes HGM, Zimerman LI, d'Avila A.

Potencial Conflito de Interesse

Declaro não haver conflito de interesses pertinentes.

Fontes de Financiamento

O presente estudo não teve fontes de financiamento externas.

Vinculação Acadêmica

Não há vinculação deste estudo a programas de pós-graduação.

Aprovação Ética e Consentimento Informado

Este artigo não contém estudos com humanos ou animais realizados por nenhum dos autores.

Uso de Inteligência Artificial

Durante a preparação deste trabalho, o(s) autor(es) usaram Google Gemini and OpenAI ChatGPT para criação de imagens e correção gramatical. Após o uso desta ferramenta/serviço, o(s) autor(es) revisaram e editaram o conteúdo conforme necessário e assumem total responsabilidade pelo conteúdo do artigo publicado.

Disponibilidade de Dados

Os conteúdos subjacentes ao texto da pesquisa estão contidos no manuscrito.

Referências

1. Joglar JA, Chung MK, Armbruster AL, Benjamin EJ, Chyou JY, Cronin EM, et al. 2023 ACC/AHA/ACCP/HRS Guideline for the Diagnosis and Management of Atrial Fibrillation: A Report of the American College of Cardiology/American Heart Association Joint Committee on Clinical Practice Guidelines. Circulation. 2024;149(1):e1-e156. doi: 10.1161/CIR.0000000000001193.
2. Verma A, Haines DE, Boersma LV, Sood N, Natale A, Marchlinski FE, et al. Pulsed Field Ablation for the Treatment of Atrial Fibrillation: PULSED AF Pivotal Trial. Circulation. 2023;147(19):1422-32. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.123.063988.
3. Reddy VY, Gerstenfeld EP, Natale A, Whang W, Cuoco FA, Patel C, et al. Pulsed Field or Conventional Thermal Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. N Engl J Med. 2023;389(18):1660-71. doi: 10.1056/NEJMoa2307291.
4. Duytschaever M, Potter T, Grimaldi M, Anic A, Vijgen J, Neuzil P, et al. Paroxysmal Atrial Fibrillation Ablation Using a Novel Variable-Loop Biphasic Pulsed Field Ablation Catheter Integrated with a 3-Dimensional Mapping System: 1-Year Outcomes of the Multicenter inspIRE Study. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2023;16(3):e011780. doi: 10.1161/CIRCEP.122.011780.
5. Turagam MK, Neuzil P, Petru J, Funasako M, Koruth JS, Skoda J, et al. AF Ablation Using a Novel "Single-Shot" Map-and-Ablate Spherical Array Pulsed Field Ablation Catheter: 1-Year Outcomes of the First-in-Human PULSE-EU Trial. Heart Rhythm. 2024;21(8):1218-26. doi: 10.1016/j.hrthm.2024.04.102.
6. Turagam MK, Neuzil P, Schmidt B, Reichlin T, Neven K, Metzner A, et al. Safety and Effectiveness of Pulsed Field Ablation to Treat Atrial Fibrillation: One-Year Outcomes from the MANIFEST-PF Registry. Circulation. 2023;148(1):35-46. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.123.064959.
7. Ekanem E, Neuzil P, Reichlin T, Kautzner J, van der Voort P, Jais P, et al. Safety of Pulsed Field Ablation in More than 17,000 Patients with Atrial Fibrillation in the MANIFEST-17K Study. Nat Med. 2024;30(7):2020-9. doi: 10.1038/s41591-024-03114-3.
8. Turagam MK, Aryana A, Day JD, Dukkipati SR, Hounshell T, Nair D, et al. Multicenter Study on the Safety of Pulsed Field Ablation in Over 40,000 Patients: MANIFEST-US. J Am Coll Cardiol. 2026;87(2):172-93. doi: 10.1016/j.jacc.2025.10.051.
9. Reddy VY, Calkins H, Mansour M, Wazni O, Di Biase L, Bahu M, et al. Pulsed Field Ablation to Treat Paroxysmal Atrial Fibrillation: Safety and Effectiveness in the AdmIRE Pivotal Trial. Circulation. 2024;150(15):1174-86. doi: 10.1161/CIRCULATIONAHA.124.070333.

10. Tilz RR, Chierchia GB, Gunawardene M, Sanders P, Haqqani H, Kalman J, et al. Safety and Effectiveness of the First Balloon-in-Basket Pulsed Field Ablation System for the Treatment of Atrial Fibrillation: VOLT CE Mark Study 6-Month Results. Europace. 2025;27(4):euaf072. doi: 10.1093/europace/euaf072.

11. Kueffer T, Stettler R, Maurhofer J, Madaffari A, Stefanova A, Iqbal SUR, et al. Pulsed-Field vs Cryoballoon vs Radiofrequency Ablation: Outcomes after Pulmonary Vein Isolation in Patients with Persistent Atrial Fibrillation. Heart Rhythm. 2024;21(8):1227-35. doi: 10.1016/j.hrthm.2024.04.045.

12. Boersma LVA, Széplaki G, Russo AD, García-Bolao I, Efremidis M, Szegedi N, et al. Real-World Experience with the Pentaspline Pulsed Field Ablation System: One-Year Outcomes of the FARADISE Registry. Europace. 2025;27(9):euaf182. doi: 10.1093/europace/euaf182.

13. Lo M, Gambhir A, Sundaram S, Sanders P, DeLurgio D, Trivedi A, et al. Safety and Effectiveness of a Novel Balloon-in-Basket Pulsed-Field Ablation Catheter for the Treatment of Paroxysmal and Persistent AF: Volt-AF IDE Trial Acute Results. Heart Rhythm. 2025;22(10):2524-33. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.04.037.

14. Reddy VY, Gerstenfeld EP, Schmidt B, Nair D, Natale A, Saliba W, et al. Pulsed Field Ablation for Persistent Atrial Fibrillation: 1-Year Results of ADVANTAGE AF. J Am Coll Cardiol. 2025;85(17):1664-78. doi: 10.1016/j.jacc.2025.03.515.

15. Wazni OM, Chun KJ, Amin A, Anic A, Ajijola OA, Gibson DN, et al. A Randomized Controlled Trial of Pulsed Field Ablation vs Antiarrhythmic Therapy as a First-Line Treatment for Persistent Atrial Fibrillation: The AVANT GUARD Trial Rationale and Design. Heart Rhythm O2. 2025;7(3):561-74. doi: 10.1016/j.hroo.2025.12.011.

16. Sugrue A, Maor E, Munoz FDC, Killu AM, Asirvatham SJ. Cardiac Ablation with Pulsed Electric Fields: Principles and Biophysics. Europace. 2022;24(8):1213-22. doi: 10.1093/europace/euac033.

17. Mountantonakis SE, Beccarino N, Patel H, Castillo A, Siddiqui T, Bhatt M, et al. Incidence of Laboratory-Defined Severe Intravascular Haemolysis Across Commercially Available Pulsed Field Ablation Technologies for Atrial Fibrillation. Europace. 2025;27(9):euaf185. doi: 10.1093/europace/euaf185.

18. Sánchez-Gómez JM, Ortiz-Fernández Á, Soler-Martínez J, Gabaldón-Pérez A, Iraola-Viana D, Martínez-Brotons Á, et al. Incidence of Brain Lesions Following Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation. Heart Rhythm. 2026;23(1):8-15. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.02.020.

19. Miyazaki S, Kawamura I, Iwasa Y, Negishi M, Tateishi R, Honda M, et al. Different Incidence and Size of Silent Strokes after Pulsed Field Ablation with Circular Shaped Ablation Catheters. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2025;18(5):e013719. doi: 10.1161/CIRCEP.125.013719.

20. Tabaja C, Younis A, Hussein AA, Taigen TL, Nakagawa H, Saliba WI, et al. Catheter-Based Electroporation: A Novel Technique for Catheter Ablation of Cardiac Arrhythmias. JACC Clin Electrophysiol. 2023;9(9):2008-23. doi: 10.1016/j.jacep.2023.03.014.

21. Benali K, Khairy P, Hammache N, Petzl A, Costa A, Verma A, et al. Procedure-Related Complications of Catheter Ablation for Atrial Fibrillation. J Am Coll Cardiol. 2023;81(21):2089-99. doi: 10.1016/j.jacc.2023.03.418.

22. Lee HJ, Lee SH, Park S, Kim MJ, Kim J, Kim JY, et al. Incidence, Predictors, and Management of Femoral Vascular Complications Following Catheter Ablation for Atrial Fibrillation: A Systematic Duplex Ultrasound Study. Biomedicines. 2025;13(2):314. doi: 10.3390/biomedicines13020314.

23. Krimphoff A, Urbanek L, Bordignon S, Schaack D, Tohoku S, Chen S, et al. The Impact of Ultrasound-Guided Vascular Access for Catheter Ablation of Left Atrial Arrhythmias in a High-Volume Centre. J Interv Card Electrophysiol. 2024;67(5):1247-55. doi: 10.1007/s10840-024-01779-x.

24. Dashwood A, Ha FJ, Healy S, Puchalski R, Cheng SH, Tian B, et al. Vascular Closure Device Following Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation: A Randomized Controlled Trial. Pacing Clin Electrophysiol. 2025;48(11):1294-300. doi: 10.1111/pace.70051.

25. Cochet H, Nakatani Y, Sridi-Cheniti S, Cheniti G, Ramirez FD, Nakashima T, et al. Pulsed Field Ablation Selectively Spares the Oesophagus during Pulmonary Vein Isolation for Atrial Fibrillation. Europace. 2021;23(9):1391-9. doi: 10.1093/europace/euab090.

26. Ishida S, Takemoto Y, Kimata R, Yagami K. Iatrogenic Acute Type A Aortic Dissection during Catheter Ablation for Idiopathic Ventricular Premature Contraction. Oxf Med Case Reports. 2024;2024(9):omae110. doi: 10.1093/omcr/omae110.

27. Tzeis S, Gerstenfeld EP, Kalman J, Saad EB, Shamloo AS, Andrade JG, et al. 2024 European Heart Rhythm Association/Heart Rhythm Society/Asia Pacific Heart Rhythm Society/Latin American Heart Rhythm Society Expert Consensus Statement on Catheter and Surgical Ablation of Atrial Fibrillation. Europace. 2024;26(4):euae043. doi: 10.1093/europace/euae043.

28. Isenegger C, Arnet R, Jordan F, Salis M, Knecht S, Krisai P, et al. Incidence of Acute Pericarditis after Pulsed-Field Ablation for the Treatment of Atrial Fibrillation. Europace. 2024;26(7):euae180. doi: 10.1093/europace/euae180.

29. Osmancik P, Bacova B, Hozman M, Pistkova J, Kunstatova V, Sochorova V, et al. Myocardial Damage, Inflammation, Coagulation, and Platelet Activity during Catheter Ablation Using Radiofrequency and Pulsed-Field Energy. JACC Clin Electrophysiol. 2024;10(3):463-74. doi: 10.1016/j.jacep.2023.11.001.

30. Zhang C, Neuzil P, Petru J, Funasako M, Hala P, Kopriva K, et al. Coronary Artery Spasm during Pulsed Field vs Radiofrequency Catheter Ablation of the Mitral Isthmus. JAMA Cardiol. 2024;9(1):72-7. doi: 10.1001/jamacardio.2023.4405.

31. Farnir FIP, Chaldoupi SM, Hermans B, Johannessen A, Haugdal MA, Ruwald MH, et al. Ablation of Cavotricuspid Isthmus-Dependent Atrial Flutter Using a Focal Monopolar Pulsed-Field Ablation Catheter: Feasibility, Periprocedural Coronary Spasms and Conduction Disorders. Heart Rhythm. 2026;23(1):105-13. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.07.001.

32. Popa MA, Venier S, Menè R, Della Rocca DG, Sacher F, Derval N, et al. Characterization and Clinical Significance of Hemolysis after Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation: Results of a Multicenter Analysis. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2024;17(10):e012732. doi: 10.1161/CIRCEP.124.012732.

33. Malyshev Y, Neuzil P, Petru J, Funasako M, Hala P, Kopriva K, et al. Nitroglycerin to Ameliorate Coronary Artery Spasm during Focal Pulsed-Field Ablation for Atrial Fibrillation. JACC Clin Electrophysiol. 2024;10(5):885-96. doi: 10.1016/j.jacep.2023.12.015.

34. Bradley CJ, Haines DE. Pulsed Field Ablation for Pulmonary Vein Isolation in the Treatment of Atrial Fibrillation. J Cardiovasc Electrophysiol. 2020;31(8):2136-47. doi: 10.1111/jce.14414.

35. Goldar G, Sifuentes A, Vargas C, Farjo P, Dominic P, Bailin S. Asynchronous Pulsed Field Ablation-Induced Ventricular Fibrillation. Heart Rhythm. 2026;23(5):1023-6. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.10.032.

36. Takahashi K, Kuwahara T, Makita T, Arisuda Y, Kadono K, Oshio T. Irreversible Intracardiac Defibrillator Circuit Damage Induced by Pulsed-Field Ablation: Mechanistic Insights. HeartRhythm Case Rep. 2026;12(3):344-9. doi: 10.1016/j.hrcr.2025.12.012.

37. Nair DG, Gabrah K, Doty B, Nair G, Reddy VY. Cardiac Implantable Electronic Device Software Reset and Damage after Pulsed Field Ablation Using a Monopolar Lattice-Tip Catheter. Heart Rhythm. 2026;23(5):1027-31. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.09.027.

38. Koop BE, Albrecht EM, Lecy E, Kippola J. Pulsed Field Ablation in Patients with Cardiac Implantable Electric Devices: Vigilance is Warranted. Pacing Clin Electrophysiol. 2026;49(1):58-66. doi: 10.1111/pace.70097.

39. Iacopino S, Tondo C, Bianchi S, Russo AD, Maggio R, Rovaris G, et al. Safety and Feasibility of Pulsed Field Ablation with a Pentaspline Catheter in Patients with Cardiac Implantable Electronic Devices: A Multicentre Experience. Europace. 2025;27(8):euaf132. doi: 10.1093/europace/euaf132.

40. Chen S, Chun JKR, Bordignon S, Tohoku S, Urbanek L, Schaack D, et al. Pulsed Field Ablation-Based Pulmonary Vein Isolation in Atrial Fibrillation

Patients with Cardiac Implantable Electronic Devices: Practical Approach and Device Interrogation (PFA in CIEDs). J Interv Card Electrophysiol. 2023;66(8):1929-38. doi: 10.1007/s10840-022-01445-0.

41. Wan EY, Rogers AJ, Lavelle M, Marcus M, Stone SA, Ottoboni L, et al. Periprocedural Management and Multidisciplinary Care Pathways for Patients with Cardiac Implantable Electronic Devices: A Scientific Statement from the American Heart Association. Circulation. 2024;150(8):e183-96. doi: 10.1161/CIR.0000000000001264.

42. Shoda M, Takami M, Imamura K, Fukuzawa K. Guidewire Entrapment in Pulmonary Veins during Pulsed Field Ablation of Atrial Fibrillation: A Case Series. HeartRhythm Case Rep. 2026;12(7):707-12. doi: 10.1016/j.hrcr.2026.04.002.

43. Bruss J, Kueffer T, Tanner H, Noti F, Haeberlin A, Thalmann G, et al. Hemolysis Induced by Pulsed-Field Ablation of Atrial Arrhythmias: A Comparative Analysis of Current Systems. J Cardiovasc Electrophysiol. 2025;36(10):2498-506. doi: 10.1111/jce.70049.

44. Venier S, Vaxelaire N, Jacon P, Carabelli A, Desbiolles A, Garban F, et al. Severe Acute Kidney Injury Related to Haemolysis after Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation. Europace. 2023;26(1):euad371. doi: 10.1093/europace/euad371.

45. Mohanty S, Casella M, Compagnucci P, Torlapati PG, Della Rocca DG, La Fazia VM, et al. Acute Kidney Injury Resulting from Hemoglobinuria after Pulsed-Field Ablation in Atrial Fibrillation: Is it Preventable? JACC Clin Electrophysiol. 2024;10(4):709-15. doi: 10.1016/j.jacep.2023.12.008.

46. Kellum JA, Lameire N; KDIGO AKI Guideline Work Group. Diagnosis, Evaluation, and Management of Acute Kidney Injury: A KDIGO Summary (Part 1). Crit Care. 2013;17(1):204. doi: 10.1186/cc11454.

47. Hu X, Li W, Ren B, Zeng R. Incidence of Silent Cerebral Events Detected by MRI in Patients with Atrial Fibrillation Undergoing Pulsed Field Ablation vs Thermal Ablation: A Systematic Review and Network Meta-Analysis. Heart Rhythm. 2026;23(1):32-43. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.04.008.

48. Patel C, Gerstenfeld EP, Gupta SK, Winterfield J, Woods C, Natale A, et al. Comparison of Cerebral Safety after Atrial Fibrillation Using Pulsed Field and Thermal Ablation: Results of the Neurological Assessment Subgroup in the ADVENT Trial. Heart Rhythm. 2024;21(11):2103-9. doi: 10.1016/j.hrthm.2024.05.048.

49. Reinsch N, Füting A, Höwel D, Bell J, Lin Y, Neven K. Cerebral Safety after Pulsed Field Ablation for Paroxysmal Atrial Fibrillation. Heart Rhythm. 2022;19(11):1813-8. doi: 10.1016/j.hrthm.2022.06.018.

50. Laskov V, Hozman M, Malikova H, Lauer D, Kremenova K, Herman D, et al. Cerebrovascular Ischemic Lesions after Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation Using Variable-Loop Ablation Catheter. JACC Clin Electrophysiol. 2026;12(4):814-23. doi: 10.1016/j.jacep.2025.12.018.

51. Chéhirlian L, Koutbi L, Mancini J, Hourdain J, Richard-Vitton R, Wilkin M, et al. High Incidence of Phrenic Nerve Injury in Patients Undergoing Pulsed Field Ablation for Atrial Fibrillation. Heart Rhythm. 2025;22(12):e1206-13. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.08.010.

52. Oda Y, Nogami A, Igarashi D, Usui R, Uno K. A Case Report of Persistent Phrenic Nerve Injury by Pulsed Field Ablation: Lessons from Anatomical Reconstruction and Electrode Positioning. HeartRhythm Case Rep. 2025;11(8):763-6. doi: 10.1016/j.hrcr.2025.05.015.

53. Howard B, Haines DE, Verma A, Kirchhof N, Barka N, Onal B, et al. Characterization of Phrenic Nerve Response to Pulsed Field Ablation. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2022;15(6):e010127. doi: 10.1161/CIRCEP.121.010127.

54. Chen S, Narayan SM, Boveda S, Neven K, Ruwald MH, Martinek M, et al. 2025 International Expert Practical Guide on the Use of the Pentaspline Pulsed Field Ablation System in Atrial Fibrillation Ablation Procedures. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2025;18(8):e013977. doi: 10.1161/CIRCEP.125.013977.

55. Zhou M, Yang H, Sun H, Yu M, Si D, He Y. Pulse Field Ablation: An Update on Energy-Specific Adverse Events. Rev Cardiovasc Med. 2025;26(10):44442. doi: 10.31083/RCM44442.

56. Sebag F, Roeun SR, Vincent MV, Durand JD, Miled MM, Simeon ES, et al. Comparison of Vagal Effect during Pulmonary Vein Isolation with Radiofrequency and Pulse Field Ablation: A Retrospective Study. Europace. 2025;27(Suppl 1):euaf085.345. doi: 10.1093/europace/euaf085.345.

57. van Zyl M, Khabsa M, Tri JA, Ladas TP, Yasin OZ, Ladejobi AO, et al. Open-Chest Pulsed Electric Field Ablation of Cardiac Ganglionated Plexi in Acute Canine Models. J Innov Card Rhythm Manag. 2022;13(7):5061-9. doi: 10.19102/icrm.2022.130704.

58. Del Monte A, Della Rocca DG, Pannone L, Vetta G, Fernández MC, Marcon L, et al. Pulsed Field Ablation of the Right Superior Pulmonary Vein Prevents Vagal Responses Via Anterior Right Ganglionated Plexus Modulation. Heart Rhythm. 2024;21(6):780-7. doi: 10.1016/j.hrthm.2024.01.040.

59. Vetta G, Della Rocca DG, Cespon-Fernandez M, Del Monte A, Magnocavallo M, Mene R, et al. Prophylactic Administration of Glycopyrrolate Prevents Vasovagal Responses Induced by Pulsed Field Ablation in Patients with Atrial Fibrillation. Europace. 2024;26(Suppl 1):euae102.194. doi: 10.1093/europace/euae102.194.

60. Santangeli P, Rosso R, Pachon JC. Managing Vagal Responses Induced by Pulsed Field Ablation: Go Right First? Heart Rhythm. 2024;21(6):788-9. doi: 10.1016/j.hrthm.2024.02.029.

61. Maan A, Chacko P, Kobeissy A, Koruth J. Esophageal Injury after Pulmonary Vein Isolation Using Pulsed Electric Fields. Heart Rhythm. 2026;23(4):800-4. doi: 10.1016/j.hrthm.2026.01.021.

62. Neven K, van Es R, van Driel V, van Wessel H, Fidder H, Vink A, et al. Acute and Long-Term Effects of Full-Power Electroporation Ablation Directly on the Porcine Esophagus. Circ Arrhythm Electrophysiol. 2017;10(5):e004672. doi: 10.1161/CIRCEP.116.004672.

63. Nies M, Koruth JS, Mlček M, Petru J, Tibenská VC, Watanabe K, et al. Is the Esophagus Spared during Pulsed Field Ablation? Early Histopathology and in Vivo Esophageal Retraction. Heart Rhythm. 2026;23(4):788-99. doi: 10.1016/j.hrthm.2025.06.033.

Este é um artigo de acesso aberto distribuído sob os termos da licença de atribuição pelo Creative Commons