

## CAPÍTULO 25

### O PAPEL DA SUSTENTABILIDADE NOS AVANÇOS DA CARDIOLOGIA DIAGNÓSTICA

Carolina Vaz da Costa

---

#### RESUMO

A sustentabilidade na cardiologia é um tema emergente que busca equilibrar os avanços tecnológicos com a redução dos impactos ambientais e a otimização de recursos. Os exames de imagem e os procedimentos invasivos desempenham um papel essencial no diagnóstico e tratamento das doenças cardiovasculares, mas seu uso intensivo está associado a desafios ambientais e econômicos significativos. Os exames de imagem, como a tomografia computadorizada (TC), a ressonância magnética cardíaca (RMC), a ecocardiografia e a cintilografia miocárdica, requerem equipamentos de alta tecnologia que consomem grandes quantidades de energia elétrica e utilizam materiais descartáveis, como contrastes iodados e radiofármacos. Além disso, a produção e descarte inadequado desses insumos podem gerar resíduos tóxicos, contribuindo para a poluição ambiental. Estratégias para minimizar esses impactos incluem a modernização de equipamentos com tecnologias mais eficientes em consumo energético, a adoção de protocolos de imagem com menor dose de radiação e a reutilização controlada de materiais sempre que possível. Nos procedimentos invasivos, como o cateterismo cardíaco e as intervenções percutâneas, o uso de dispositivos descartáveis, materiais plásticos e agentes de contraste é elevado. A produção desses insumos exige um alto consumo de recursos naturais e gera um grande volume de resíduos hospitalares. Para mitigar esses efeitos, iniciativas como a reciclagem de materiais sempre que possível, a redução do uso de contraste por meio de técnicas de imagem avançadas e a implementação de programas de descarte seguro de radiofármacos podem tornar esses procedimentos mais sustentáveis. A incorporação da sustentabilidade na cardiologia exige um esforço conjunto entre pesquisadores, gestores de saúde e profissionais clínicos. A transição para um modelo mais sustentável passa pela conscientização sobre os impactos ambientais, pelo uso racional dos recursos e pelo incentivo a pesquisas voltadas para tecnologias limpas e eficientes.

**Palavras-chave:** Sustentabilidade. Cardiologia. Exames de imagem cardiovascular. Procedimentos invasivos. Impacto ambiental

## 1. CONCEITO DE SUSTENTABILIDADE

O conceito de sustentabilidade foi introduzido na teoria e no desenvolvimento de políticas e práticas gerenciais mundiais a partir da publicação do relatório *Our Common Future*, em 1987, pela Organização das Nações Unidas (ONU). De acordo com o relatório, o desenvolvimento sustentável é definido como aquele que atende às necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de atender às suas próprias necessidades<sup>1</sup>. Importante mencionar que esta abordagem reconhece que o uso e a distribuição eficientes dos recursos naturais são as principais condições para alcançar a sustentabilidade em geral, garantindo a existência humana contínua e a capacidade das gerações futuras de satisfazer suas necessidades. Assim, a sustentabilidade é vista como um método de produção e consumo atuais, que permitirá o desenvolvimento progressivo por meio da alocação de recursos finitos<sup>1,2</sup>.

Além disso, cientistas e profissionais sugeriram as seguintes atividades para alcançar a sustentabilidade: usar tecnologias de produção menos nocivas e prejudiciais; manter os padrões de vida e bem-estar no nível mais baixo aceitável, para minimizar a escala geral de produção e consumo; assim, usar menos recursos naturais finitos; introduzir e implementar tecnologias ecologicamente corretas; construção verde; regulamentações ambientais economicamente orientadas; e incentivos econômicos relacionados<sup>3</sup>.

Com o desenvolvimento posterior do conceito de sustentabilidade, como uma resposta às constantes modificações dos métodos de fazer negócios e do comportamento e conscientização pública sobre os danos potenciais de suas atividades no meio ambiente, uma nova abordagem para a sustentabilidade contemporânea foi sugerida em 1999<sup>4</sup>. A nova versão da sustentabilidade acrescenta questões, como viabilidade do ecossistema; justiça e equidade social; o sistema socioecológico; um nível satisfatório de subsistência e normatividade; geração de conhecimento inspirada no uso; os conceitos de compensações; resiliência; risco e vulnerabilidade; redução de danos; e domínio da equidade<sup>5</sup>.

A sustentabilidade contemporânea foca em diferentes partes do ambiente, como um sistema ao invés de analisá-lo como um todo. Além disso, a abordagem destaca a importância dos sintomas ao invés das causas da insustentabilidade, como mudanças tecnológicas, políticas, sociais e econômicas. Entretanto, como já foi provado, a eficiência de seguir essa abordagem para determinar a sustentabilidade é limitada, como evidenciado por alguns resultados negativos de atividades e projetos implementados e declarados como ambientalmente amigáveis, o que pode levar ao greenwashing e outros impactos prejudiciais imprevistos na natureza<sup>6</sup>.

Assim, devido a algumas limitações da abordagem mencionada para determinar a sustentabilidade, uma abordagem atualizada foi desenvolvida pelos acadêmicos, como o estágio regenerativo da sustentabilidade com base em um conceito, que inclui a visão geral e a mudança de paradigma

para a sustentabilidade<sup>7</sup>. De uma perspectiva regenerativa, a sustentabilidade é vista como uma visão de mundo holística, que fornece a capacidade de adaptar e integrar paradigmas, onde o elemento-chave é o sistema de humanos e o resto da vida, e cada membro do sistema tem seu papel e lugar no sistema individual-global de acordo com os princípios do sistema vivo de totalidade, mudança e relacionamentos<sup>8</sup>.

Além disso, a sustentabilidade é vista por meio de seus criadores, como a sociedade, e cocriadores, como as partes interessadas, que seguem suas crenças, normas sociais e éticas, interesses pessoais, regras e regulamentos para determinar o nível de sustentabilidade<sup>9</sup>. Importante destacar que os principais fatores que afetam a atitude e o comportamento geral em relação à natureza não são constantes, mas estão sendo sempre modificados para aumentar o nível de saúde e bem-estar sob contínuas mudanças econômicas, sociais, tecnológicas e ambientais locais e globais<sup>10</sup>.

Portanto, para manter níveis mais elevados de saúde e bem-estar e garantir a sustentabilidade contínua, todos os membros do sistema humano-natureza devem desenvolver e implementar os princípios de interação: adaptação; auto-organização; evolução; tomada de decisão racional; terra ideal; uso de recursos; segurança do sistema alimentar; práticas culturais; estilo de vida; e padrões comportamentais que apoiam todas as interações mutuamente benéficas entre os elementos do sistema. Assim, a sustentabilidade não é vista como uma meta fixa, mas como um sistema vivo em constante desenvolvimento e modernização que existe sob condições incertas<sup>11</sup>.

## **2. SUSTENTABILIDADE E PRÁTICAS CARDIOVASCULARES**

O modelo atual de prestação de serviços em saúde tem uma pegada de carbono – indicador ambiental que mede a quantidade de gases de efeito estufa (GEE) emitidos – substancial que contribui para o impacto climático. Fontes comuns e de grandes emissões incluem energia para iluminação; aquecimento; resfriamento e operação de dispositivos médicos; transporte e consumo de alimentos de pacientes e funcionários; e aquisição e desperdício de suprimentos médicos, dispositivos e produtos farmacêuticos<sup>12</sup>.

Os laboratórios de cateterismo cardíaco, em particular, produzem uma quantidade significativa de equipamentos de uso único, incluindo cateteres, luvas, cortinas, aventais, entre outros, além da alta utilização de energia. Com mais de 1 milhão de procedimentos estimados de cateterismo anualmente, somente nos Estados Unidos, a pegada de carbono aumenta. As salas de cirurgia cardiovascular também têm alta utilização de energia, por conta da ventilação, iluminação e dispositivos médicos, além do uso de anestésicos, com alto potencial de aquecimento do efeito estufa, contribuindo para uma emissão significativa de carbono<sup>13</sup>.

Dispositivos como stents, marcapassos e desfibriladores cardioversores implantáveis também geram impactos ambientais de

matérias-primas de metal e plástico, processos de fabricação e transporte. Com o uso crescente de dispositivos descartáveis de uso único, o desperdício gerado em laboratórios de cateterismo cardíaco e salas de cirurgia aumentou. A imagem cardíaca também pode ter impacto significativo no meio ambiente, dado o uso de energia, radiação e material de contraste. Além da prestação de cuidados, a ampla gama de produtos farmacêuticos usados em cuidados cardiovasculares tem uma pegada de carbono importante, devido à extração de matéria-prima, produção, embalagem e transporte<sup>13</sup>.

### **3. ABORDAGEM SISTÊMICA PARA CRIAR PRÁTICAS CARDIOVASCULARES SUSTENTÁVEIS**

A transição para modelos sustentáveis de cuidados cardiovasculares requer uma grande reorientação da interconexão entre saúde, meio ambiente e sociedade. Uma perspectiva de pensamento sistêmico facilita a compreensão da dinâmica complexa e dos ciclos de feedback que contribuem para a sustentabilidade e a estreita interdependência de múltiplos sistemas da escala micro à macro (planetária). Ferramentas específicas como modelagem de dinâmica de sistemas, diagramas de ciclo causal e avaliações de impacto na saúde permitem a realização de sinergias e a prevenção de consequências não intencionais<sup>14</sup>.

A reorganização das práticas de saúde exige ampliar a extensão em que as práticas cardiovasculares estão inseridas, o que envolve fornecedores, serviços sociais, agências de saúde pública e comunidades. A adoção de medidas de sustentabilidade deve, portanto, considerar e contabilizar como as decisões se propagam pelo sistema mais amplo. Essas decisões podem, às vezes, parecer desafiadoras e inatingíveis. No entanto, mesmo ações simples podem ter impacto por meio de ações em vários sistemas, as chamadas ações de dupla função ou tripla função<sup>15</sup>.

Por exemplo, reduzir a utilização de dispositivos de uso único não apenas diminui o desperdício e a poluição, mas também impacta o custo, as despesas com saúde e altera sua demanda. Reduzir o desperdício de alimentos e plásticos de uso único em refeitórios de hospitais pode impactar as emissões de carbono e a poluição, além de reduzir custos. Mudar para dietas baseadas em vegetais em hospitais não só diminui as emissões de carbono, mas também melhora a saúde. Há uma necessidade de ação imediata para promover abordagens inovadoras de sistemas alimentares que promovam a saúde cardiovascular e sejam sustentáveis<sup>15</sup>.

Prevenir admissões cardiovasculares, por meio de melhor gestão da saúde populacional, pode ajudar a reduzir a utilização e o custo intensivos de saúde. Evitar ou usar testes e diagnósticos de laboratório de baixo carbono pode ajudar a melhorar a sustentabilidade, sem comprometer o cuidado. As abordagens de sistemas também consideram como um hospital pode desempenhar um papel no tratamento de determinantes sociais na

comunidade, como educação, moradia e jardins comunitários, para prevenir doenças crônicas e utilização de recursos a jusante<sup>15</sup>.

Um comitê de sustentabilidade organizacional pode alinhar esforços e promover responsabilidade compartilhada. A estrutura do modelo de economia circular, conhecida como os 4 Rs (reduzir, reutilizar, reciclar e recuperar), que, posteriormente, evoluiu para 9 Rs –recusar, repensar, reduzir, reutilizar, reparar, reformar, remanufaturar, reaproveitar, reciclar e recuperar –, hoje é altamente necessária. Uma mudança para um modelo de economia circular não é trivial e exige uma transformação nas práticas de design, produção, consumo, uso, desperdício e reutilização, além da mudança das indústrias focadas em reciclagem, remanufatura e economias de escala<sup>16</sup>.

Na prática clínica individual, comportamentos sustentáveis correspondem a considerar os impactos climáticos e ambientais dos testes diagnósticos, tratamentos, dispositivos e medicamentos solicitados. Os clínicos também podem ajudar os pacientes a entender como as mudanças no estilo de vida previnem a progressão de DCV e reduzem a utilização de cuidados de saúde. Por exemplo, a telemedicina pode oferecer uma oportunidade de reduzir ainda mais as emissões de cuidados de saúde<sup>17</sup>.

Entender a pegada de carbono dos exames de imagem pode ajudar a tomada de decisões ecologicamente corretas que otimizam a saúde do paciente e a saúde ambiental. Nos laboratórios de cateterismo, por exemplo, o uso de dispositivos e kits personalizados pode ter um impacto significativo. Reduzir o uso de pacotes personalizados descartáveis e optar por componentes individuais realmente necessários, além de reutilizar alguns suprimentos, como aventais, pode ter uma redução significativa na pegada de carbono durante esse procedimento<sup>8</sup>.

## **4. SUSTENTABILIDADE E IMAGEM CARDIOVASCULAR**

As perturbações climáticas estão associadas ao aumento do uso dos cuidados de saúde, incluindo visitas ao departamento de emergência e internamentos hospitalares. Com isso, a prestação de cuidados de saúde também gera emissões substanciais de gás de efeito estufa (GEE). Na imagiologia médica, isto está relacionado com a energia necessária para fabricar, transportar e alimentar equipamentos e materiais<sup>17</sup>. As emissões de GEE variam de acordo com modalidade de imagiologia, sendo mais elevadas para a ressonância magnética (RM), tomografia computadorizada (TC), SPECT e PET, e mais baixas para a US e a radiografia<sup>18</sup>.

### **4.1 Emissões médias de gases de efeito estufa por teste de imagem**

As estimativas de emissões médias equivalentes de CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub>e) para a fase de produção e utilização são de 77-243 kg por procedimento intervencionista, equivalente a<sup>19</sup>:

- 317-1002 km percorridos por um veículo médio movido a gasolina;

- 54-67 kg por PET, equivalente a 222-276 km percorridos por um veículo médio movido a gasolina;
- 17,5-19,7 kg por RM, equivalente a 72-81 km percorridos por um veículo médio movido a gasolina;
- 11,6-14,4 kg por SPECT, equivalente a 47-59 km percorridos por um veículo médio movido a gasolina;
- 6,6-9,2 kg por CT, equivalente a 27-38 km, percorridos por um veículo médio movido a gasolina;
- 0,5-1,2 kg por US, equivalente a 2-5 km, percorridos por um veículo médio movido a gasolina; e
- 0,5-0,8 kg por radiografia, equivalente a 2-3,5 km, percorridos por um veículo médio movido a gasolina.

Para cada modalidade, o ponto médio de cada intervalo estimado foi plotado. As estimativas para SPECT e PET são baseadas em 2000–2500 estudos/ ano ao longo de 10 anos de uso<sup>19</sup>.

A estrutura do tripé da sustentabilidade, integrando impactos econômicos, sociais e ambientais, pode ser aplicada em imagens cardiovasculares para redefinir qualidade e valor<sup>20</sup>. O impacto ambiental deve ser um fator considerado ao selecionar um teste de imagem cardíaca apropriado, juntamente com outras variáveis, como disponibilidade, custo e exposição à radiação. Testes de imagem com menores emissões de GEE e impacto ambiental podem ser priorizados quando mais de um teste for apropriado para responder a uma questão clínica<sup>21</sup>. Nesse caso, o dever principal dos médicos é promover a saúde e o bem-estar de pacientes individuais e, portanto, a imagem cardíaca nunca deve ser indevidamente retida, devido a preocupações com a sustentabilidade<sup>22</sup>.

O conceito de tripé pode ser aplicado em imagens cardiovasculares. Isso expande o conceito de assistência médica baseada em valor, definido como o resultado do paciente sobre os custos<sup>23</sup>. O valor sustentável otimiza os resultados de saúde para pacientes e populações individuais, ao mesmo tempo em que minimiza os custos ambientais, sociais e financeiros<sup>24</sup>.

Um índice teórico de sustentabilidade de imagem pode ser considerado como o resultado de saúde – por exemplo, precisão diagnóstica ou valor prognóstico – dividido pela soma do impacto ambiental, correspondente a<sup>24</sup>:

- emissões de gases de efeito estufa (CO<sub>2</sub> equivalente) e resíduos;
- impacto social, que são os determinantes sociais da saúde, incluindo discriminação, equidade em saúde e inclusão social; e
- custos financeiros, referente ao custo em dólares do teste de imagem.

Estratégias para reduzir as emissões de GEE relacionadas à imagem cardiovascular, em pacientes adultos e pediátricos, incluem otimizar a demanda por assistência médica e imagem médica, adequar a oferta à

demanda e reduzir as emissões de GEE do fornecimento de imagem cardiovascular<sup>25</sup>. Até o momento, a maioria das iniciativas de sustentabilidade em radiologia se concentrou em estratégias de mitigação para reduzir as emissões de GEE da entrega de imagem<sup>26</sup>. A imagem cardiovascular também pode ser aproveitada para promover a saúde cardiovascular, prevenir doenças graves e reduzir as emissões gerais de GEE relacionadas à assistência médica<sup>27</sup>.

Por exemplo, a TC de cálcio da artéria coronária pode ser usada para identificar pacientes com doença arterial coronária subclínica que podem se beneficiar da terapia com estatina, evitando um futuro evento cardiovascular adverso que exigiria cuidados mais caros e intensivos em energia. Integrar critérios de uso apropriados e ferramentas de suporte à decisão em registros eletrônicos de saúde pode reduzir a imagem cardiovascular de baixo valor, adequando assim a oferta à demanda. Otimizar os cronogramas de imagem minimiza o tempo ocioso do scanner, evitando o excesso de capacidade<sup>27</sup>.

As estratégias abrangentes para reduzir as emissões de GEE relacionadas com a imagiologia médica visam<sup>25</sup>:

- Otimizar a procura de serviços de saúde, por meio da abordagem dos determinantes sociais da saúde, da promoção da saúde cardiovascular e da prevenção de doenças;
- Adequar da oferta à procura, assegurando a adequação dos cuidados e evitando cuidados com recursos insuficientes; e
- Reduzir as emissões provenientes do fornecimento de imagiologia médica, com a implementação de princípios de economia circular nas cadeias de abastecimento e a diminuição do consumo de energia para equipamentos de imagiologia.

## **5. OPORTUNIDADES E AÇÕES PARA INTEGRAR A SUSTENTABILIDADE NA PRÁTICA DE IMAGENS CARDIOVASCULARES**

### **5.1 Ressonância magnética cardíaca**

As oportunidades para melhorar a sustentabilidade ambiental na ressonância magnética cardíaca (RMC) incluem a redução da energia necessária para produzir e alimentar unidades de RM, a minimização dos requisitos de hélio para resfriamento e a diminuição da contaminação de corpos d'água ambientais por agentes de contraste à base de gadolínio (GBCA).

#### **5.1.1 Reduzir o tempo de varredura para reduzir o uso de energia**

A energia da fase de uso para RM é tipicamente proporcional ao comprimento da varredura. Como a maioria dos pacientes foi submetida a ecocardiografia antes da RMC, protocolos abreviados, focados apenas em questões clínicas pendentes, reduzem as emissões de GEE por varredura de RMC, ao mesmo tempo em que agregam valor clínico. As estratégias incluem protocolos de adaptação para remover sequências redundantes ou

desnecessárias; aquisição de imagem mais rápida, incluindo técnicas completas, como impressão digital de RMC; ferramentas de inteligência artificial (IA), para reduzir ruído e reconstruir imagens aceleradas; e planejamento automatizado de planos cardíacos para agilizar a aquisição<sup>26,28</sup>.

Algumas sequências, como a sequência de precessão livre em estado estacionário cine, podem ser realizadas durante a espera para adquirir imagens de realce tardio de gadolínio (LGE), após a injeção de material de contraste, levando a uma economia de energia e emissão de GEE de 19%. Para pacientes pediátricos, protocolos de RMC de respiração livre rápida, com os pais na sala ou capacidade de assistir a um filme, reduzem a necessidade de anestesia geral. Os gases anestésicos inalados são GEE, com potencial de aquecimento global centenas de vezes superior ao do CO<sub>2</sub>. Portanto, minimizar ou evitar o seu uso reduz as emissões de GEE<sup>29</sup>.

### **5.1.2 Redução do desperdício de energia no estado ocioso da RM**

Os scanners de RM requerem energia quase constante, devido à operação contínua do sistema de resfriamento e, portanto, nunca são totalmente desligados. No entanto, seu consumo de energia depende do estado do scanner. Quando o scanner está ligado, mas não está sendo usado ativamente, o sistema fica em um estado ocioso, o que desperdiça energia<sup>30</sup>.

As estratégias para reduzir a energia em estados não produtivos incluem desligar as unidades de RM durante a noite e nos fins de semana se não estiverem em uso, levando a uma economia de energia de 25% a 33%. Outras opções específicas do fornecedor para reduzir o desperdício de energia incluem modos de menor potência, que desligam o amplificador de gradiente, quando a mesa está na posição inicial, ou o scanner está inativo por um período definido<sup>30</sup>.

### **5.1.3 Expansão das aplicações de RMC de baixa intensidade de campo**

A RM de campo baixo utiliza menos energia e, a princípio, gera menos emissões de GEE em comparação com a RM de maior intensidade de campo. A análise do ciclo de vida futuro seria útil para avaliar o impacto ambiental relativo da compra de um novo sistema de baixa intensidade de campo, em comparação com um sistema de campo mais alto reformado. Os sistemas de campo mais baixo normalmente demandam menos hélio, exigem menos material para blindagem de sala e reforço de piso e utilizam menos fio supercondutor, resultando em quantidades menores de elementos raros ou economicamente voláteis, como cobre, nióbio e titânio. Os metais compostos, usados para fio supercondutor, também são difíceis de reciclar, devido à estrutura híbrida heterogênea<sup>31</sup>.

Embora a relação sinal-ruído seja proporcional à intensidade do campo, a escolha apropriada da sequência de pulso e dos parâmetros de imagem, bem como métodos avançados de imagem e redução de ruído, podem compensar a menor relação sinal-ruído. Isso é relevante para a RMC, dada a multiplicidade de técnicas que se baseiam na leitura de precessão



livre, em estado estacionário balanceado, incluindo cine, perfusão, LGE e mapas paramétricos<sup>32</sup>. Além do custo menor, os sistemas de baixa intensidade de campo geralmente têm um tamanho mais compacto e um furo maior, o que pode melhorar o conforto do paciente e a acessibilidade para monitoramento<sup>33</sup>.

Vantagens adicionais incluem maior homogeneidade de campo; T1 mais curto; taxa de absorção específica reduzida, permitindo ângulos de inclinação maiores; menos artefatos; e aquecimento reduzido do dispositivo. Essas vantagens podem ser aproveitadas para expandir as aplicações de RMC, a exemplo de procedimentos guiados por RM, como ablação e radioterapia, e aumentar o acesso à RMC para a crescente população de pacientes com dispositivos cardíacos implantados<sup>37</sup>.

#### **5.1.4 Diminuição da dependência de recursos finitos**

O hélio é um recurso finito, com reservas globais limitadas. A maioria das unidades modernas de RM usa ímãs supercondutores, que requerem resfriamento a temperaturas ultrabaixas, obtidas com hélio, que tem um ponto de ebulição extremamente baixo de 4,2 K. Uma unidade típica de RM opera com 1700–2000 L de hélio líquido e usa até 10 000 L ao longo de sua vida útil, devido às perdas constantes de hélio que exigem reposição<sup>26</sup>.

As estratégias para conservar e reduzir a dependência do hélio na RM incluem a recaptura e a reciclagem – incluindo unidades de RM com ebulição zero, eliminando a necessidade de recarga de hélio durante a vida útil do sistema – e a implementação de ímãs totalmente selados e resfriados por condução, que requerem menos de 10 L de hélio<sup>34</sup>.

#### **5.1.5 Redução de resíduos de GBCA e contaminação de corpos d'água**

Frequentemente, os agentes de contraste à base de gadolínio (GBCA) são administrados intravenosamente durante a RMC, para melhorar o contraste da imagem, com aplicações incluindo angiografia por RM, LGE e mapas T1 pós-contraste para cálculo do volume extracelular do miocárdio. Mais de 98% da dose de GBCA injetada é eliminada em 24 horas e passada para águas residuais pela urina do paciente. O tratamento convencional de resíduos não remove os GBCAs, e há preocupação quanto aos potenciais impactos ambientais e ecológicos a jusante da contaminação do corpo d'água<sup>26</sup>.

As estratégias para reduzir a contaminação e o desperdício de GBCA incluem a otimização de técnicas e protocolos de RMC sem contraste, aumento de IA de imagens de baixa dose, e imagens sintéticas aprimoradas por contraste geradas por IA, incluindo imagens virtuais semelhantes a LGE. Os benefícios potenciais das aplicações de IA em imagens cardiovasculares devem ser equilibrados por emissões massivas de energia e GEE associadas ao desenvolvimento, implantação e armazenamento de dados de IA<sup>35</sup>.

## **5.2 TC Cardíaca**

Os impactos ambientais da TC cardíaca incluem a fabricação, embalagem e transporte de unidades de TC, além de materiais específicos – incluindo controle eletrocardiográfico, medicamentos para controle da frequência cardíaca e vasodilatação coronária –, da energia necessária para alimentar as unidades de TC e do material de contraste iodado (ICM).

### **5.2.1 Desligar os tomógrafos quando não estiverem em uso**

Ao contrário das unidades de RM, as unidades de TC não precisam estar sempre ligadas e podem ser totalmente desligadas quando não estiverem em uso. Desligar as unidades de TC ou colocá-las em modos de menor consumo de energia pode reduzir as emissões gerais de GEE em 40%–80%. Os tempos de inicialização do scanner de TC variam dependendo da unidade. Por isso, a colaboração com fornecedores e tecnólogos pode otimizar os processos automatizados para iniciar o scanner e garantir a qualidade para promover evitar interrupções no fluxo de trabalho<sup>36</sup>.

Outras soluções específicas do fornecedor podem ser implementadas, incluindo recursos para interromper a rotação do gantry durante intervalos de varredura ou modos automatizados de baixo consumo de energia durante períodos ociosos. Os benefícios dessas ações incluem economias substanciais de custos, ao evitar o uso desnecessário de eletricidade<sup>36</sup>.

### **5.2.2 Eliminação de fases desnecessárias**

A energia da fase de uso na TC se correlaciona com a exposição à radiação. Portanto, eliminar fases desnecessárias na TC cardíaca reduz o uso de energia, as emissões de GEE e a dose de radiação. Os benefícios dos protocolos abreviados correspondem à capacidade de reduzir a duração do slot de reserva e a energia necessária para o armazenamento de dados de imagem<sup>37</sup>.

### **5.2.3 Programas de reciclagem e sistemas de administração de material de contraste**

O ICM é essencial para a angiografia cardíaca por TC. Porém, o iodo é um recurso finito, e há impactos ambientais associados à sua produção, embalagem, injeção e ao seu transporte. Além disso, o ICM é difícil de filtrar, com potencial contaminação do corpo d'água, semelhante aos GBCAs. As estratégias para reduzir o impacto ambiental do ICM se referem à participação em programas de reciclagem de material de contraste; troca de sistemas de administração de material de contraste de paciente único para multipaciente (pacote de imagens a granel); e a evitar a administração de material de contraste, se a TC sem contraste for adequada<sup>38</sup>.

#### **5.2.4 Avaliação do impacto ambiental do detector de contagem de fótons**

O detector de contagem de fótons CT tem maior resolução espacial e de contraste de tecidos moles em comparação com o detector de integração de energia CT, além do potencial de melhorar a detecção da composição da placa e estenose intra-stent. Também pode melhorar a sustentabilidade ambiental, gerando imagens virtuais sem contraste para quantificação de cálcio, reduzindo o número total de fases adquiridas ou o volume de ICM necessário para aplicações de CT cardíaca. Mas, os atuais scanners de CT com detector de contagem de fótons não podem ser desligados, pois o sistema de detector integrado requer mais de 12 horas para calibração adequada. Por isso, estudos adicionais são necessários para determinar se esses benefícios potenciais superam o desperdício de energia improdutivo<sup>39</sup>.

### **5.3 Ecocardiografia**

A US utiliza menos energia comparação com a TC e a RM e pode ser priorizada para imagens cardíacas iniciais quando apropriado. Os impactos ambientais da ecocardiografia incluem emissões de GEE na fase de produção e uso e agentes que aumentam a US<sup>18</sup>.

#### **5.3.1 Redução do impacto ambiental dos agentes que elevam os níveis de US**

Agentes de realce de US são usados na ecocardiografia para melhorar a qualidade da imagem, incluindo definição aprimorada da borda endocárdica do pool sanguíneo, detecção de trombos e massas cardíacas e avaliação da perfusão miocárdica. Todos apresentam microbolhas de gás, estabilizadas por uma concha composta de albumina ou lipídios. Atualmente, existem quatro agentes de realce de US disponíveis, três dos quais são usados para imagens cardiovasculares. Eles contêm gases fluorados com potenciais de aquecimento global milhares de vezes maiores que o CO<sub>2</sub> e tempo de vida com persistência na atmosfera por milhares de anos<sup>40</sup>.

Porém, as doses administradas são relativamente pequenas. O benefício diagnóstico potencial, o custo, o risco de uma reação adversa e o impacto ambiental devem ser considerados ao avaliar o uso potencial. As estratégias para reduzir seu impacto ambiental incluem o envolvimento com parceiros da indústria, para implementar sistemas para recuperar gases fluorados durante a produção, reduzir a dose administrada e desenvolver novos agentes com menor potencial de aquecimento global<sup>40</sup>.

### **5.4 Imagem nuclear cardíaca**

As considerações ambientais do SPECT e PET cardíacos incluem a energia necessária para fabricar e alimentar equipamentos de imagem, a cadeia de suprimentos radiofarmacêuticos e resíduos radioativos.

#### **5.4.1 Melhora da aquisição de radiofármacos**

A maioria dos estudos SPECT cardíacos são realizados com radiofármacos baseados em tecnécio-99m, que têm uma meia-vida relativamente curta de 6 horas, o que torna a distribuição desafiadora. A maior parte do suprimento mundial é derivada da fissão do urânio-235, em reatores de pesquisa dedicados a produzir o radioisótopo original molibdênio-99, que é transportado para diferentes instalações e incorporado em geradores.

À medida que o molibdênio-99 cai para formar tecnécio-99m, o tecnécio-99m pode ser eluído do gerador e complexado com moléculas de interesse para formar radiofármacos. As etapas finais de eluição e complexação podem ser realizadas no local em instalações de imagem ou em radiofarmácias regionais, com distribuição subsequente aos usuários finais. A complexidade da cadeia de suprimentos, envolvendo múltiplas jurisdições e partes interessadas, tornou a pegada ambiental de uma única dose de radiofármaco difícil de quantificar<sup>41</sup>.

O PET cardíaco utiliza com mais frequência o cloreto de rubídio-82 ou flúor-18 fluorodeoxiglicose (FDG). A produção de rubídio-82 e flúor-18 envolve um acelerador de partículas, como um ciclotron, que consome grandes quantidades de eletricidade para operar. Devido à sua curta meia-vida de 75 segundos, o rubídio-82 é fornecido aos usuários finais em um gerador, contendo seu isótopo original, estrôncio-82, produzido pelo bombardeio de prótons de rubídio-82 em um ciclotron. Os radiofármacos flúor-18, como o FDG, com meia-vida de 110 minutos, são normalmente produzidos no local com um ciclotron médico ou em instalações de produção regionais<sup>42</sup>.

Avaliações específicas são necessárias para determinar a estratégia ideal para aquisição de radiofármacos, levando em consideração padrões de práticas locais e geografia. As economias de escala da preparação industrial fora do local precisam ser ponderadas em relação aos custos ambientais da decomposição nuclear incorridos durante o transporte<sup>41,42</sup>.

#### **5.4.2 Redução de resíduos radioativos**

Para SPECT, a produção de molibdênio-99 através da fissão de alvos contendo urânio-235 produz quantidades consideráveis de resíduos radioativos, que podem representar um risco à saúde humana e ao meio ambiente se não forem gerenciados adequadamente. Uma estratégia de gerenciamento de resíduos deve ser projetada prospectivamente, evitando a prática de acumular resíduos para tratamento futuro<sup>41</sup>.

As ações incluem minimizar a produção de resíduos, evitar contaminação cruzada entre fluxos de resíduos – o que pode levar à produção de resíduos secundários – e reciclar urânio não fissionado. Uma vantagem dos radiofármacos PET de vida mais curta é que quantidades menores de resíduos radioativos são produzidas, pois as reações de partículas carregadas induzidas em ciclotrons produzem menos

radionuclídeos indesejados do que as reações de fissão realizadas em reatores<sup>41</sup>.

### **5.4.3 Otimização de protocolos para reduzir o impacto ambiental dos radiofármacos**

Estratégias para reduzir a exposição à radiação de pacientes e equipe médica também podem ser aplicadas para diminuir os impactos ambientais de radiofármacos, pois a contenção de suas doses reduz o impacto ambiental da aquisição, produção e resíduos radioativos. O princípio ALARA (tão baixo quanto possível) deve ser aplicado e as intervenções correspondem a reduções de dose baseadas em peso e imagens de estresse para imagens de perfusão miocárdica (IPM), em configurações apropriadas<sup>42</sup>.

Fatores específicos do paciente também devem ser considerados, devido às compensações. Por exemplo, um protocolo de repouso-estresse SPECT MPI de 2 dias – onde o repouso e a imagem de estresse são realizados em dias diferentes – resulta em maiores emissões de GEE relacionadas ao transporte, mas menor dose. Por outro lado, um protocolo de repouso-estresse de 1 dia – onde o repouso e a imagem de estresse são realizados no mesmo dia – resulta em menores emissões relacionadas ao transporte, mas normalmente requer uma dose de traçador três a quatro vezes maior para a segunda porção de estresse. Devido à curta meia-vida do rubídio-82 (75 segundos), o repouso e o estresse PET MPI podem ser realizados no mesmo dia com a mesma dose<sup>42</sup>.

## **6. IMAGEM E PROCEDIMENTOS CARDIOVASCULARES INVASIVOS**

As fontes de emissões de GEE na cardiologia e radiologia intervencionistas estão alinhadas com as das especialidades cirúrgicas<sup>43</sup>. Uma avaliação do ciclo de vida de um departamento de radiologia intervencionista hospitalar, que realiza procedimentos vasculares e não vasculares, descobriu que foi emitido cerca de 23.500 kg de CO<sub>2</sub>e ao longo de 5 dias, com a maior proporção de emissões relacionadas com o sistema de controle climático (49%) e com a utilização de materiais descartáveis de utilização única, como toalhetes, fórceps, cateteres e stents (41%)<sup>44</sup>. Em uma auditoria ambiental da ablação dirigida por cateter de fibrilação auricular, a maioria das emissões de GEE (88%) surgiu da extração de matéria-prima e da produção de materiais, enquanto o transporte e a utilização de materiais foram responsáveis por 11% e 1% das emissões, respectivamente<sup>45</sup>.

### **6.1 Redução de energia para aquecimento e resfriamento**

Os departamentos podem instalar sensores de ocupação em suítes de cateterismo cardíaco e radiologia intervencionista e permitir que os parâmetros de temperatura, umidade e troca de ar oscilem quando as salas não estiverem em uso. Quando implementada na sala de cirurgia, essa abordagem demonstrou reduzir o consumo de energia em um terço a metade, com um benefício de menor custo. Outras estratégias incluem a instalação

de iluminação por LED e a implementação de protocolos para desligar estações de anestesia e equipamentos eletrônicos após o expediente<sup>46,47</sup>.

## **6.2 Redução de suprimentos de uso único e resíduos**

Os departamentos devem fazer a transição de instrumentos descartáveis para aqueles que podem ser reprocessados e reutilizados com segurança. A mudança para suprimentos reutilizáveis pode reduzir as emissões em 50%–66%, em comparação com o uso de suprimentos descartáveis, sendo especialmente impactante em áreas onde a eletricidade é gerada a partir de fontes renováveis. Os benefícios do reprocessamento de dispositivos incluem economia de custos e redução do risco de interrupções na cadeia de suprimentos que impactam o atendimento ao paciente<sup>48</sup>.

Embora cateteres, fios, bainhas e alguns outros equipamentos usados para angiografia por cateter não possam ser reutilizados, há oportunidades para reduzir o desperdício e o consumo de suprimentos desnecessários. Isso inclui seleção criteriosa e revisão de conteúdos em pacotes de equipamentos cirúrgicos e intervencionistas para remover itens redundantes ou desnecessários e implementação de protocolos, de modo que os suprimentos sejam abertos somente quando forem necessários. Outras opções para reduzir o desperdício incluem programas de recompra com a indústria para evitar o desperdício de suprimentos não utilizados<sup>49</sup>.

As embalagens representam 55% do peso total dos suprimentos de radiologia intervencionista. As emissões de GEE associadas à fabricação, transporte e descarte de embalagens podem ser maiores do que as emissões do próprio conteúdo da embalagem. As estratégias para reduzir o impacto ambiental dos resíduos incluem o envolvimento com fornecedores, para diminuir as embalagens, e fluxos de trabalho simplificados, para incentivar a reciclagem e a triagem adequada de resíduos em salas de angiografia<sup>49</sup>.

## **7. DESAFIOS DA SUSTENTABILIDADE**

Os custos iniciais para migrar para uma assistência médica sustentável são consideráveis, com pouca disposição para assumir custos mais altos e problemas de descarbonização. A eliminação gradual de combustíveis fósseis para energia renovável para alimentar organizações de assistência médica contribui com a redução da poluição atmosférica e tem impacto imediato e mensurável na saúde, que já demonstrou superar os custos iniciais de investimento<sup>10</sup>.

Também foi considerado que soluções tecnológicas e incentivos de mercado podem estimular inovações para mudar as emissões de carbono. Nesse sentido, regulamentações governamentais e exigências de organizações e sociedades, para cumprir com metas de carbono ou correr o risco de serem multadas, podem ajudar as organizações de assistência médica na transição para sistemas de saúde de baixo carbono. Os padrões de sustentabilidade não podem mais ser opcionais para atender às metas climáticas e precisam de supervisão regulatória<sup>10</sup>.

## REFERÊNCIAS

1. Brundtland GH. Our common future—Call for action. *Environ Conserv.* 1987;14(4):291-4.
2. Ives CD, Freeth R, Fischer J. Inside-out sustainability: the neglect of inner worlds. *Ambio.* 2020;49(1):208-17.
3. Mostepaniuk A, Nasr E, Awwad RI, Hamdan S, Aljuhmani HY. Managing a relationship between corporate social responsibility and sustainability: a systematic review. *Sustainability.* 2022;14(18):11203.
4. National Research Council. Our common journey: a transition toward sustainability. Washington, DC: National Academies Press; 1999.
5. Fang X, Zhou B, Tu X, Ma Q, Wu J. What kind of a science is sustainability science? An evidence-based reexamination. *Sustainability.* 2018;10(5):1478.
6. Polimeni JM, Polimeni RI. Jevons' paradox and the myth of technological liberation. *Ecol Complex.* 2006;3(4):344-53.
7. González-Márquez I, Toledo VM. Sustainability science: a paradigm in crisis? *Sustainability.* 2020;12(7):2802.
8. Gibbons LV. Moving beyond sustainability: a regenerative community development framework for co-creating thriving living systems and its application. *J Sustain Dev.* 2020;13(1):20.
9. Munthe C, Fumagalli D, Malmqvist E. Sustainability principle for the ethics of healthcare resource allocation. *J Med Ethics.* 2021;47(2):90-7.
10. Grazhevska N, Mostepaniuk A. Ecological components of corporate social responsibility: theoretical background and practical implementation. *J Environ Manag Tour.* 2020;11(5):1060-6.
11. Gibbons LV, Pearthree G, Cloutier SA, Ehlenz MM. The development, application, and refinement of a regenerative development evaluation tool and indicators. *Ecol Indic.* 2020;108:105698.
12. Iyer Y, Moorthy S, Al-Kindi S, Rajagopalan S. Climate change and healthcare organizations: a call to arms. *Eur Heart J* 2022;43:2435–7.
13. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health* 2017;1:e381–8.

14. Pérez-Pérez JF, Parra JF, Serrano-García J. A system dynamics model: transition to sustainable processes. *Technol Soc* 2021;65:101579.
15. Anderson CAM, Thorndike AN, Lichtenstein AH, Van Horn L, Kris-Etherton PM, Foraker R, et al. Innovation to create a healthy and sustainable food system: a science advisory from the American Heart Association. *Circulation* 2019;139:e1025–32.
16. Khaw-ngern K, Peuchthonglang P, Klomkul L, Khaw-ngern C. The 9Rs strategies for the circular economy 3.0. *Psychol Educ J* 2021;58:1440–6.
17. Hanneman K, Araujo-Filho JAB, Nomura CH, Jakubisin J, Moy L. Climate change and sustainability. *Radiology* 2023;307(4):e230903.
18. Hanneman K, McKee H, Nguyen ET, Panet H, Kielar A. Greenhouse gas emissions by diagnostic imaging modality in a hospital-based radiology department. *Can Assoc Radiol J* 2024.
19. Chua ALB, Amin R, Zhang J, Thiel CL, Gross JS. The environmental impact of interventional radiology: an evaluation of greenhouse gas emissions from an Academic Interventional Radiology Practice. *J Vasc Interv Radiol* 2021;32(6):907–915.e3.
20. Mortimer F, Isherwood J, Wilkinson A, Vaux E. Sustainability in quality improvement: redefining value. *Future Healthc J* 2018;5(2):88–93.
21. Alshqaqeeq F, McGuire C, Overcash M, Ali K, Twomey J. Choosing radiology imaging modalities to meet patient needs with lower environmental impact. *Resour Conserv Recycling* 2020;155:104657.
22. Merkle EM, Bamberg F, Vosschenrich J. The impact of modern imaging techniques on carbon footprints: relevance and outlook. *Eur Urol Focus* 2023;9(6):891–893.
23. European Society of Radiology (ESR). ESR concept paper on value-based radiology. *Insights Imaging* 2017;8(5):447–454.
24. Picano E. Economic, ethical, and environmental sustainability of cardiac imaging. *Eur Heart J* 2023;44(45):4748–4751.
25. MacNeill AJ, McGain F, Sherman JD. Planetary health care: a framework for sustainable health systems. *Lancet Planet Health* 2021;5(2):e66–e68.



26. Chaban YV, Vosshenrich J, McKee H, et al. Environmental sustainability and MRI: challenges, opportunities, and a call for action. *J Magn Reson Imaging* 2024;59(4):1149–1167.
27. Dekker HM, Stroomberg GJ, Prokop M. Tackling the increasing contamination of the water supply by iodinated contrast media. *Insights Imaging* 2022;13(1):30.
28. Christodoulou AG, Cruz G, Arami A, et al. The future of cardiovascular magnetic resonance: All-in-one vs. real-time (Part 1). *J Cardiovasc Magn Reson* 2024;26(1):100997.
29. Ibrahim F, Cadour F, Campbell-Washburn AE, et al. Energy and greenhouse gas emission savings associated with implementation of an abbreviated cardiac MRI protocol. *Radiology* 2024;311(1):e240588.
30. Woolen SA, Becker AE, Martin AJ, et al. Ecodesign and operational strategies to reduce the carbon footprint of MRI for energy cost savings. *Radiology* 2023;307(4):e230441.
31. Yang Y, Boom R, Irion B, van Heerden D-J, Kuiper P, de Wit H. Recycling of composite materials. *Chem Eng Process* 2012;51:53–68.
32. Bandettini WP, Shanbhag SM, Mancini C, et al. A comparison of cine CMR imaging at 0.55 T and 1.5 T. *J Cardiovasc Magn Reson* 2020;22(1):37.
33. Vosshenrich J, Breit HC, Bach M, Merkle EM. Economic aspects of low-field magnetic resonance imaging: acquisition, installation, and maintenance costs of 0.55 T systems [in German]. *Radiologe* 2022;62(5):400–404.
34. Campbell-Washburn AE, Varghese J, Nayak KS, Ramasawmy R, Simonetti OP. Cardiac MRI at low field strengths. *J Magn Reson Imaging* 2024;59(2):412–430.
35. Zhang Q, Burrage MK, Lukaschuk E, et al; Hypertrophic Cardiomyopathy Registry (HCMR) Investigators. Toward replacing late gadolinium enhancement with artificial intelligence virtual native enhancement for gadolinium-free cardiovascular magnetic resonance tissue characterization in hypertrophic cardiomyopathy. *Circulation* 2021;144(8):589–599.
36. Barloese M, Petersen CL. Sustainable health care: a real-world appraisal of a modern imaging department. *Clin Imaging* 2024;105:110025.
37. Schoen JH, Burdette JH, West TG, Geer CP, Lipford M, Sachs JR. Savings in CT net scan energy consumption: assessment using dose report

metrics and comparison with savings in idle state energy consumption. *AJR Am J Roentgenol* 2024;222(1):e2330189.

38. Sengar A, Vijayanandan A. Comprehensive review on iodinated X-ray contrast media: Complete fate, occurrence, and formation of disinfection byproducts. *Sci Total Environ* 2021;769:144846.

39. Higashigaito K, Mergen V, Eberhard M, et al. CT Angiography of the aorta using photon-counting detector CT with reduced contrast media volume. *Radiol Cardiothorac Imaging* 2023;5(1):e220140.

40. Kang H-J, Lee JM, Yoon JH, Lee K, Kim H, Han JK. Contrast-enhanced US with sulfur hexafluoride and perfluorobutane for the diagnosis of hepatocellular carcinoma in individuals with high risk. *Radiology* 2020;297(1):E241.

41. Aisyah PAA, Rachmadetin J. Radioactive fission waste from molybdenum 99 production and proliferation risks. *IOP Conf Ser Earth Environ Sci* 2021;927(1):012041.

42. Ahmadi A, Klein R, Lewin HC, Beanlands RSB, deKemp RA. Rubidium-82 generator yield and efficiency for PET perfusion imaging: Comparison of two clinical systems. *J Nucl Cardiol* 2020;27(5):1728–1738.

43. Alasnag M, Ahmed B, Jones T, et al. Cardiac catheterization laboratory sustainability: what it is and why it matters. *JACC Cardiovasc Interv* 2023;16(16):2034–2039.

44. Chua ALB, Amin R, Zhang J, Thiel CL, Gross JS. The environmental impact of interventional radiology: an evaluation of greenhouse gas emissions from an Academic Interventional Radiology Practice. *J Vasc Interv Radiol* 2021;32(6):907–915.e3.

45. Ditac G, Cottinet P-J, Quyen Le M, et al. Carbon footprint of atrial fibrillation catheter ablation. *Europace* 2023;25(2):331–340.

46. MacNeill AJ, Lillywhite R, Brown CJ. The impact of surgery on global climate: a carbon footprinting study of operating theatres in three health systems. *Lancet Planet Health* 2017;1(9):e381–e388.

47. Wormer BA, Augenstein VA, Carpenter CL, et al. The green operating room: simple changes to reduce cost and our carbon footprint. *Am Surg* 2013;79(7):666–671.

48. Vozzola E, Overcash M, Griffing E. An Environmental analysis of reusable and disposable surgical gowns. *AORN J* 2020;111(3):315–325.
49. Szirt R, Monjur MR, McGovern L, et al. Environmental sustainability in the cardiac catheter laboratory. *Heart Lung Circ* 2023;32(1):11–15.
50. Clements W, Chow J, Corish C, Tang VD, Houlihan C. Assessing the burden of packaging and recyclability of single-use products in interventional radiology. *Cardiovasc Intervent Radiol* 2020;43(6):910–915.