



DESENVOLVIMENTO DO CONCEITO EXERCÍCIO- ENERGIA PARA CIDADES SUSTENTÁVEIS E INTELIGENTES

Herwin Saito Schultz

Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil
herwin.schultz@alumni.cear.ufpb.br

Carlos Eduardo Keutenedjian Mady

Instituto de Energia e Ambiente, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil
cekm@usp.br

Monica Carvalho

Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Brasil
monica@cear.ufpb.br

Resumo: A busca por geração de energia sustentável tem levado cidades a buscarem soluções que reduzam custos e impactos ambientais. No Brasil, a dependência de hidrelétricas é um desafio durante períodos de seca, pois leva ao uso das usinas termelétricas, aumentando tarifas e emissões de carbono. A descentralização da geração de energia pode mitigar o risco de apagões e aliviar sistemas de transmissão. O Sistema de Colheita de Energia (SCE) captura pequenas quantidades de energia de fontes naturais e pode contribuir para geração de energia sem esgotamento de recursos. A energia cinética humana, como a gerada no ciclismo *indoor*, pode ser convertida em eletricidade, beneficiando saúde pública e meio ambiente. A partir do SCE, que permite ajustar a intensidade dos exercícios, informando o usuário sobre benefícios à saúde, energia produzida e emissões evitadas, em um estudo de caso, verificou-se que se 1% da população brasileira fizesse uso desse sistema, a geração elétrica poderia chegar a 1,6 TWh/mês, representando 3,4% da matriz energética do país. Esse modelo destaca a importância de novas tecnologias na geração de energia sustentável, podendo ser distribuídos por bairros e cidades e contribuindo para minimizar problemas de fornecimento de energia nas localidades que forem instaladas.

Palavras-chave: Colheita de energia, geração de eletricidade, exercícios físicos, melhoria da saúde pública, cidades sustentáveis.

1. Introdução

Os SCEs podem capturar e converter pequenas quantidades de energia de várias fontes naturais. Existem várias referências aos processos de conversão envolvidos em sistemas de energia movidos a humanos: colheita de energia, energia das pessoas e autoalimentação.



Definições e questões críticas associadas a sistemas de energia movidos a humanos foram definidas por Jansen e Stevels (2006), que também observaram que a energia humana é "verde" de uma perspectiva científica (estudos de Avaliação do Ciclo de Vida - ACV a consideram não poluente) e também da percepção do consumidor. A colheita de energia é baseada na ideia de que "[...] dispositivos podem coletar a energia presente em seu ambiente em tempo real e usá-la imediatamente para que a energia só precise ser armazenada temporariamente." (CHETTO; QUEUDET, 2016).

A colheita de energia pode contribuir para compensar os crescentes desafios globais de energia sem incorrer no esgotamento de recursos energéticos adicionais, além de ajudar a mitigar as emissões de gases de efeito estufa (GEE). Como Beeby *et al.* (2013) mencionou, enquanto a colheita de energia é idêntica aos sistemas de geração de energia renovável em larga escala, a quantidade de energia produzida é tipicamente de alguns *watts*, o suficiente para fornecer uma alternativa, ou pelo menos aumentar, as baterias.

A energia cinética humana pode ser coletada do exercício físico. A energia do pedal tem sido usada como fonte de energia nas indústrias, mas com sistemas de energia centralizados, muitos dos aparelhos que usam energia do pedal desapareceram - embora na década de 1970 alguns escritórios dos EUA ainda tivessem pequenos geradores de pedal como reserva de energia (VEENMAN, 2009). O termo “treino verde” foi cunhado para se referir à energia utilizável produzida por equipamentos de exercícios estacionários (elípticos, bicicletas e máquinas de remo), que podem ser empregados para carregar eletrônicos móveis. Ao realizar práticas esportivas *indoor*, geralmente, a energia gasta pelo atleta não é convertida em energia utilizável. No ciclismo *indoor* realizado em um rolo, a energia metabólica do atleta é transformada em calor e entalpia (suor), que o corpo transfere para o ambiente. Eventualmente, essas ações de energia se tornam energia destruída externa ao corpo.

Com foco na autogeração de eletricidade para consumo interno ou exportação para a rede elétrica em academias, há estudos limitados e a maioria não é recente. Yildiz e Fahmy (2009) apresentaram um SCE usando energia cinética humana com base nos sistemas de pedalada de bicicletas ergométricas. Os resultados indicaram que a rotina regular de exercícios de uma pessoa era suficiente para alimentar o display da bicicleta (aumentando a vida útil da bateria) e um pequeno rádio de 40 mW. O estudo verificou que a energia da bicicleta ergométrica, gerada em corrente contínua (CC) também poderia ser usada para diferentes aplicações (por exemplo, aparelhos de corrente alternada (CA) usando um conversor CC-CA conectado a uma unidade de armazenamento). Sukumaran e Purushothaman (2014) desenvolveram um equipamento de condicionamento físico de colheita de energia com base no exercício de mergulho, capaz de gerar 10 W - os autores mencionaram que se 5% da população indiana em idade produtiva utilizar o equipamento por 1 hora por dia, 375 MW/dia seriam gerados. Khan *et al.* (2015) se concentraram na geração de energia em larga escala a partir de bicicletas ergométricas de academia e verificaram a probabilidade comercial como uma fonte de energia secundária em academias locais de Bangladesh. Embora a eficiência de conversão fosse inferior a 50%, era possível carregar uma bateria de 12 V, 55 Ah com baixo custo e segurança. Também em Bangladesh, Hossain *et al.* (2016) obtiveram uma eficiência de quase 60%, e a eletricidade gerada foi considerada uma alternativa à rede elétrica durante o corte de carga. Mais recentemente, Ihsan e Viswanathan (2019) observaram que uma redução de aproximadamente 20% dos custos de energia de uma academia poderia ser obtida com um arranjo de baixo custo para coletar energia de bicicletas



estáticas. Pham *et al.* (2022) se concentraram em uma aplicação residencial para uma bicicleta de *spinning* regenerativa com um preço-alvo de US\$ 400 (comparado às opções comerciais atuais disponíveis a US\$ 3.000).

Em relação ao comportamento do corpo humano, há estudos sobre os efeitos da corrida em esteira (teste ergométrico de MADY *et al.*, 2013), levantamento de peso (SPANGHERO *et al.*, 2018) e exercício em bicicleta (MADY *et al.*, 2019). Os objetivos dos estudos foram obter um método para avaliar o trabalho realizado pelo esportista para uma caracterização adequada do comportamento termodinâmico. Para tanto, foram empregados índices da literatura científica para obter indicadores de desempenho em saúde. Dois estudos recentes abriram novas direções de pesquisa: Igarashi *et al.* (2022) relacionaram o trabalho realizado com o metabolismo durante um teste de bicicleta, e Pereira *et al.* (2022) sistematizaram a pegada de carbono de diferentes dietas. Esses estudos indicam que é possível avaliar o o máximo potencial de energia atingível por uma pessoa durante o exercício, a potência real obtida e formular indicadores de qualidade com base em aspectos de saúde humana e mudanças climáticas.

Um fator crítico é quantificar a energia real gerada por uma pessoa por meio de atividades físicas. Com as preocupações ambientais cada vez maiores, também é fundamental determinar a redução associada nas emissões de GEE alcançada. Portanto, os benefícios da atividade física vão além dos ganhos individuais de saúde, sendo estendidos ao setor de energia, meio ambiente e economia da saúde pública. Este estudo relata o trabalho inicial e o desenvolvimento do conceito do sistema *Green&Healthy Power*, um SCE que coleta energia de atividades físicas.

O conceito SCE a ser desenvolvido aqui pode fornecer soluções para diferentes situações e é aplicável a edifícios, empresas, academias, parques e pequenos espaços, como casas, apartamentos e locais remotos, podendo ter papel importante no desenvolvimento de cidades sustentáveis. O objetivo geral do estudo é fornecer uma abordagem inicial, incluindo considerações sobre a eficiência do corpo humano. Este artigo também apresenta uma revisão dos conceitos essenciais que são necessários para o desenvolvimento do sistema *Green&Healthy Power*.

2. Fundamentação teórica

2.1 Colheita de Energia (*Energy Harvesting*)

Enfrentando a crise energética mundial e o efeito estufa, os países em todo o mundo atribuem grande importância ao desenvolvimento da nova indústria energética. Sendo uma tecnologia promissora, a colheita de energia pode gerar energia limpa e renovável a partir do ambiente, capturando energia não utilizada e desperdiçada (PAN *et al.*, 2021). No ambiente que nos rodeia, podemos “colher” pequenas quantidades de energia dissipada e utilizá-la como energia elétrica disponível, essa tecnologia é conhecida como colheita de energia (AKINAGA, 2020).

A principal diferença entre colheita de energia e geração de energia é que a ação da qual a energia é coletada não é realizada com o único propósito de gerar energia, mas sim como



um objetivo secundário (BLECHMAN *et al.*, 2009). De cada batimento cardíaco, a cada passo, os seres humanos dissipam energia continuamente, se esta energia puder ser aproveitada adequadamente, os benefícios são imensuráveis em termos da atual base populacional global (ZOU, BO e LI, 2021).

A colheita de energia a partir da prática de atividades físicas depende do tipo de exercício praticado e do preparo físico de quem pratica. Deve-se também salientar que a duração da prática é um fator importante para o montante final da colheita de energia. A Tabela 1 apresenta a produção de energia para diferentes atividades.

Tabela 1. Produção de energia para diferentes atividades (valores para homens).

Fonte de energia (tempo de execução)	Potência (W)
Ciclista profissional (1 hora)	400
Halterofilismo (poucos segundos)	6629
Velocistas 100 m (poucos segundos)	2392
Trabalhador (mais de 8 horas)	75
Um passo (menos de 1 segundo)	2–5

Fonte: Adaptado de Cicchella, 2023.

O ciclismo *indoor*, por exemplo é o tipo de atividade que tem grande potencial de colheita de energia. Um ciclista com treinamento regular 2 a 3 vezes por semana tem uma potência máxima de 250-400 W, enquanto um ciclista de classe mundial gera até 600 W (JEUKENDRUP, CRAIG e HAWLEY, 2000). A produção de energia sustentada depende da duração. Foi demonstrado que ciclistas bem treinados sustentam mais de 50% de sua potência máxima por 1 hora (JEUKENDRUP, CRAIG e HAWLEY, 2000). Nota-se que como evidenciado por Mady *et al.* (2019) existe uma eficiência de conversão entre a potência metabólica e o que realmente vira potência útil.

Levando-se em consideração a porcentagem da população mundial que realiza exercícios físicos regularmente, os SCEs a partir da prática de atividades físicas podem adquirir um grande potencial de produção de energia elétrica. Neste sentido, o desenvolvimento e a difusão na utilização de equipamentos capazes de realizar esta colheita de energia torna-se de fundamental importância, visto que aproveita uma energia que normalmente acaba sendo dissipada para o ambiente.

2.2 Energia “Verde” para Cidades Inteligentes e Sustentáveis



As cidades inteligentes e sustentáveis emergem como uma resposta moderna às necessidades urbanas contemporâneas, buscando combinar tecnologias avançadas e práticas sustentáveis para melhorar a qualidade de vida dos cidadãos, reduzir o impacto ambiental e otimizar a gestão dos recursos.

A Internet das Coisas (IoT), por exemplo, desempenha um papel fundamental nesse contexto, pois através de dispositivos conectados à internet, como sensores, atuadores e telefones celulares, facilita a rápida disponibilização de informações em cidades inteligentes, servindo de apoio para o planejamento autônomo e a operação contínua dessas cidades (SALAMA; AL-TURJMAN, 2023). Estes dispositivos podem coletar e analisar dados em tempo real sobre diversos aspectos da cidade, como tráfego, consumo de energia e qualidade do ar, ou seja, o “inteligente” integra sensores, bases de dados e acesso sem fios para detectar, adaptar e fornecer serviços aos utilizadores de forma colaborativa no ambiente da cidade (KALUARACHCHI, 2022).

Além da aplicação de tecnologias digitais, a integração de fontes de energia renovável, como solar, eólica, hidrelétrica e também das tecnologias de colheita de energia é essencial para a transição das cidades para modelos mais sustentáveis. Essas fontes de energia ajudam a reduzir a dependência de combustíveis fósseis, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Um sistema de geração solar, por exemplo, pode apresentar taxas de emissões de gases de efeito estufa por volta de 80% menores que as taxas do *mix* brasileiro de geração de eletricidade (SCHULTZ; CARVALHO, 2022).

A criação e manutenção de ambientes verdes, como parques e áreas públicas, são componentes-chave das cidades inteligentes e sustentáveis, promovendo não apenas a saúde física e mental dos cidadãos, mas também o equilíbrio ecológico e a resiliência urbana. Dentre os efeitos benéficos proporcionado pela presença de vegetação arbórea e áreas verdes livres no meio urbano podemos citar o relaxamento e a redução do *stress*, melhora da qualidade do ar e diminuição das ilhas de calor urbana (GÜNTHER, 2021).

Os benefícios que cidades inteligentes e sustentáveis podem proporcionar serão colhidos pelas gerações atuais e pelas futuras gerações também, porém, para que as cidades possam evoluir é importante que haja um compromisso global e coordenado, onde haja incentivo ao financiamento para o desenvolvimento urbano, incluindo as parcerias público-privadas e o fortalecimento das capacidades fiscais locais (ONU, 2016).

O sistema *Green&Healthy Power* pode contribuir simultaneamente para os vários aspectos abordados aqui:

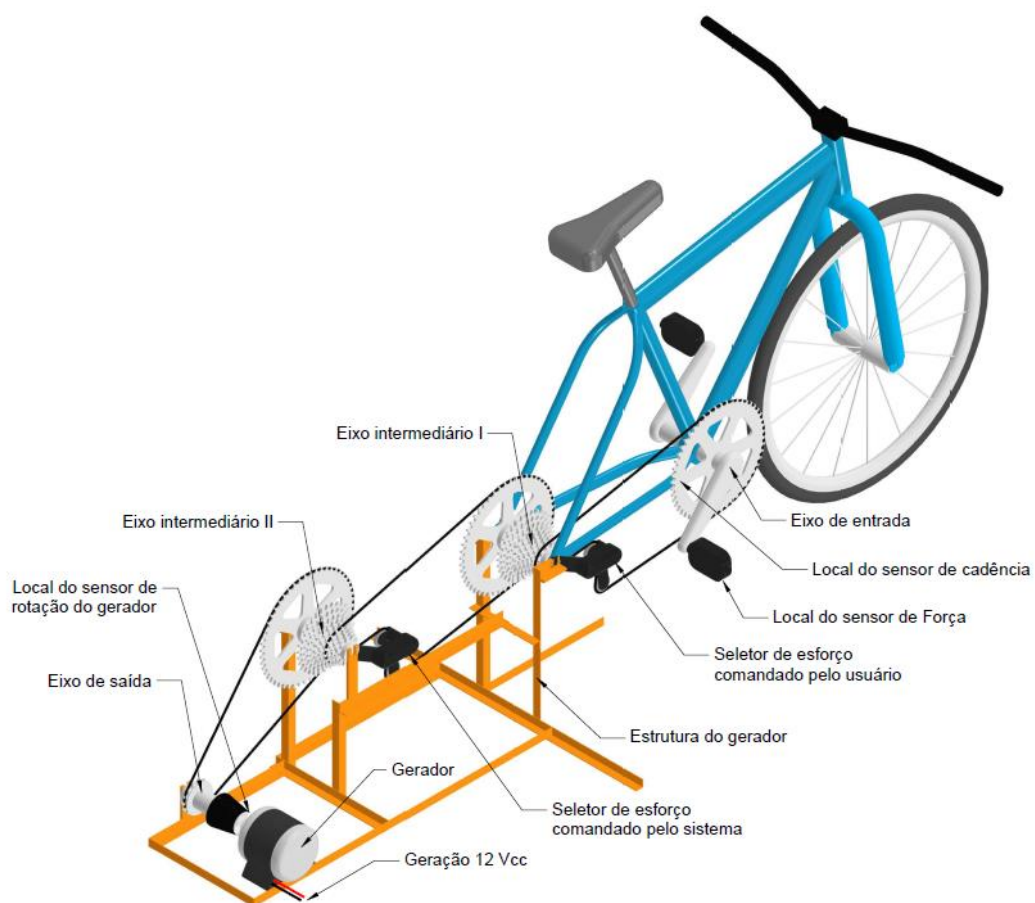
- Por se tratar de um sistema de colheita de energia, este sistema contribui de forma totalmente sustentável para a geração de energia advinda da prática de ciclismo *indoor*;
- O sistema possui aplicativo que monitora diversos fatores, como por exemplo, geração de energia elétrica e emissões de gases de efeito estufa evitadas. Este sistema pode ser interligado, por meio de internet, aos sistemas de gestão da cidade;
- Por se tratar de atividade física, este sistema contribui para uma melhor qualidade de vida para os cidadãos, podendo ser instalados em academias públicas localizadas nas áreas verdes das cidades por exemplo.

3. Metodologia

Protótipo e formulação inicial do *Green&Healthy Power*

Como inovação conceitual, o sistema de geração apresentado neste trabalho pode selecionar a intensidade de esforço em que os exercícios são realizados, além do processo de geração convencionalmente utilizado em geradores deste tipo. Durante o exercício físico, o SCE pode alterar automaticamente (conforme uma programação pré-selecionada pelo usuário) a intensidade de execução de um nível mais leve para um mais pesado. Quanto maior o esforço, maior a quantidade de energia instantânea gerada. Esse diferencial torna a prática dos exercícios mais prazerosa, simulando situações mais próximas da realidade. O usuário é informado sobre os benefícios do exercício para a saúde¹ e a quantidade de energia produzida, com até mesmo uma exibição das emissões evitadas. A Fig. 1 mostra um esquema simplificado do conceito do *Green&Healthy Power*, com base nos equipamentos já instalados em uma academia. A Fig. 1 mostra também o eixo de saída e o gerador de 12 Vcc. São dois eixos intermediários e um eixo de entrada.

Figura 1. Conceito do sistema *Green&Healthy Power*.

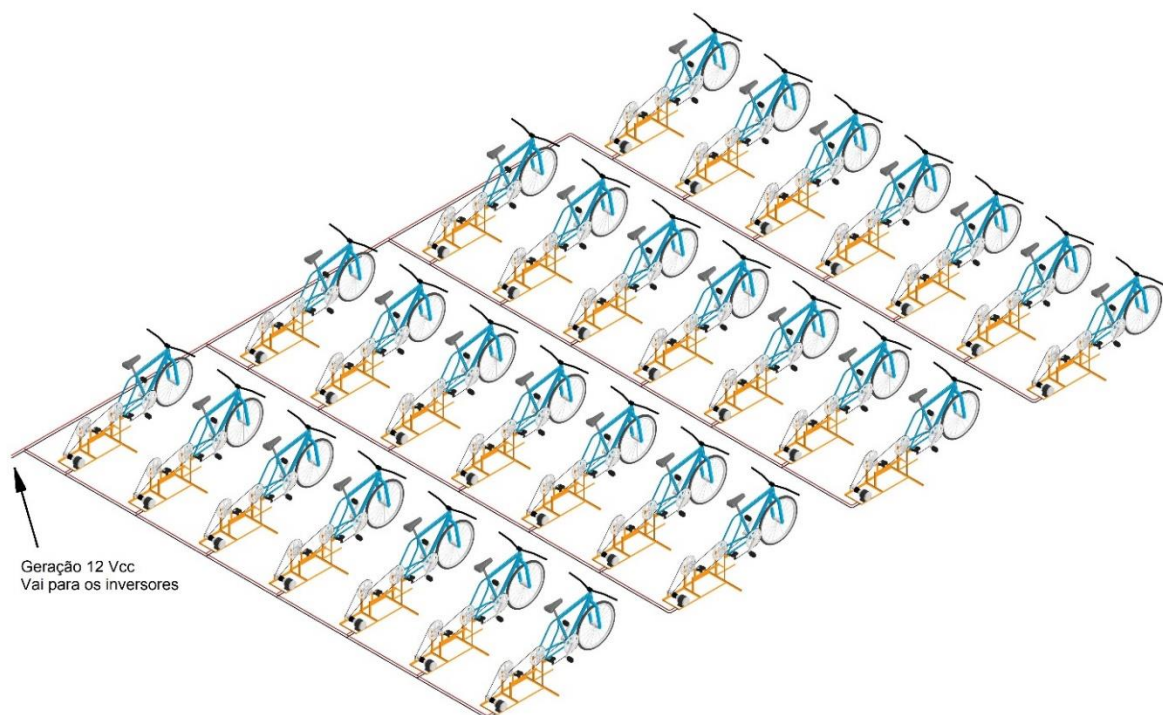


Fonte: Os próprios autores (2024)



Uma Fazenda de Colheita de Energia (FCE) pode ser proposta utilizando a bicicleta geradora aqui desenvolvida para gerar mais eletricidade. Uma das vantagens é a maior capacidade de geração nos horários de pico, que é quando a maioria dos trabalhadores sai do trabalho e se exercita. A Fig. 2 apresenta o conceito FCE com 28 unidades de gerador de bicicleta.

Figura 2. Conceito de Fazenda de Colheita de Energia.



Fonte: Os próprios autores (2024)

Foi considerado que cada participante faria esse mesmo exercício três vezes por semana durante 20 min. Além disso, para fins didáticos, o CO_2 produzido pelo corpo humano durante esse exercício também foi contabilizado. Igarashi *et al.* (2022) mediram a produção de dióxido de carbono usando o método de calorimetria indireta conforme descrito por Mady e Oliveira (2013). Como os valores eram baixos, estes foram multiplicados por uma constante (100) para uma leitura mais direta. Com essas informações, foram considerados blocos de "práticas de 20 minutos".

Um ponto crucial é que há uma quantidade de energia perdida (ou exergia destruída) nos nutrientes para obter Adenosina Trifosfato (ATP), uma fonte de energia para uso e armazenamento no nível celular. A ATP é uma molécula entendida como a exergia final despachável para qualquer atividade no corpo. Essa quantidade física é chamada de eficiência metabólica (SCHULTZ; MADY; CARVALHO, 2024). Isso leva a um valor de eficiência que é intrínseco e inevitável no corpo. O próximo passo é converter ATP em trabalho real, neste



último passo também há eficiência. Essas análises mostram a importância da segunda lei neste artigo conceitual e suas futuras aplicações para avaliar corretamente as ineficiências de um processo biológico e mecânico (SCHULTZ; MADY; CARVALHO, 2024).

Para obter a eletricidade produzida ao longo do tempo, é necessário estabelecer as perdas em diversas partes do equipamento, como mancal da manivela, pedais, transmissão por corrente, cubo do mancal e gerador. A eficiência geral de conversão do movimento da bicicleta (rpm) em eletricidade é de 88%. A Tabela 2 indica a integração dessas grandezas físicas ao longo do teste. Mady *et al.* (2019) verificaram que a eficiência de conversão energética de nutrientes em trabalho é de cerca de 30%. Além disso, as emissões de dióxido de carbono foram obtidas seguindo Mady e Oliveira (2013) - Observe que essas emissões não representam nenhum carbono "novo" na atmosfera (representando, portanto, uma fonte renovável).

Tabela 2. Integração do metabolismo, trabalho realizado, consumo de glicose, produção de dióxido de carbono e geração de eletricidade para o teste completo, 20 minutos.

Resultados do teste (integração em 20 minutos)	
Metabolismo	850,1 kJ
Trabalho realizado	255,0 kJ
Consumo de glicose	0,0544 kg
Emissões de CO ₂	0,0133 kg
Geração de eletricidade	223,7 kJ

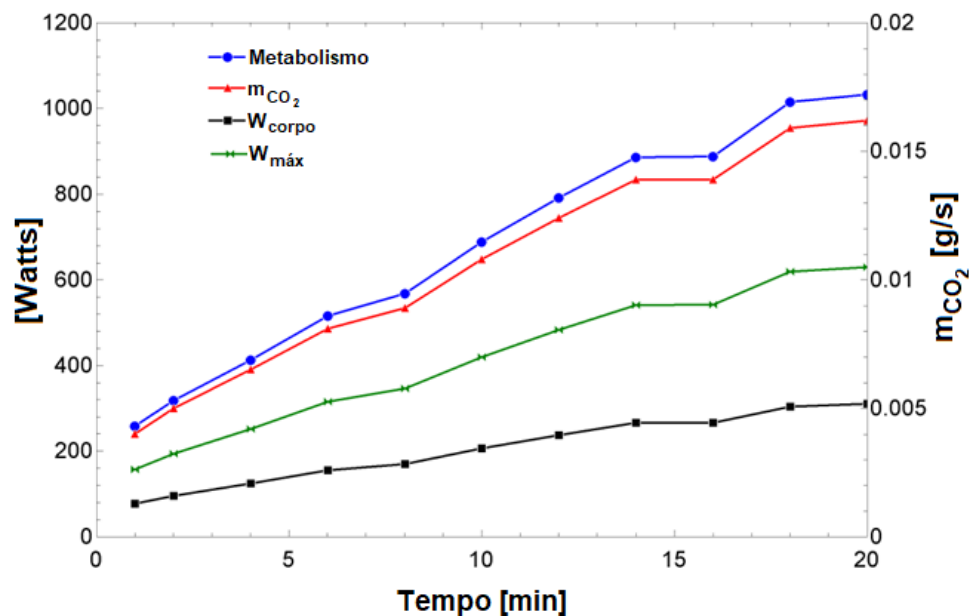
Fonte: Schultz, Mady e Carvalho (2024).

4. Resultados

Seguindo Igarashi *et al.* (2022), foi possível construir a Fig. 3 com valores médios de oito sujeitos realizando um teste de exercício de 20 minutos. O metabolismo em função do tempo para um teste de exercício incremental é indicado na Fig. 3, bem como o trabalho realizado pelo sujeito.



Figura 3. Resultados do teste de treinamento de ciclista: oito indivíduos pedalando por 20 minutos.

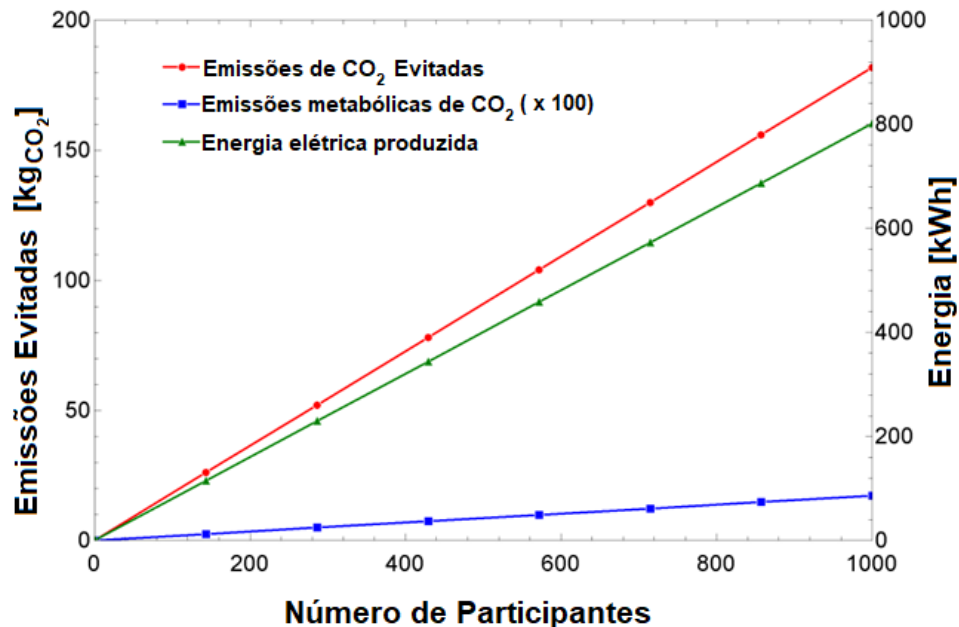


Fonte: traduzido de Schultz, Mady e Carvalho (2024).

A Fig. 4 mostra a relação entre emissões evitadas, emissões metabólicas, produção de energia e o número de participantes. Para 1000 participantes, as emissões anuais evitadas atingiram 180 kg CO₂-eq com uma produção de cerca de 800 kWh/ano (2880 MJ/ano) e economia financeira anual de mais de R\$ 800. Este número pode parecer modesto à primeira vista - no Brasil, a eletricidade é barata. No entanto, deve-se destacar que a geração de eletricidade apresenta uma profunda dependência das capacidades dos reservatórios de água (a cobrança por kWh consumido pode variar de acordo com as condições de geração do sistema energético do país). Em julho (estação seca), uma tarifa de bandeira vermelha pode ser aplicada, o que aumenta a tarifa de R\$ 6,500 para R\$ 9,795 por 100 kWh consumidos (ANEEL, 2023).



Figura 4. Relação entre emissões evitadas, emissões metabólicas, produção de energia e número de participantes.



Fonte: traduzido de Schultz, Mady e Carvalho (2024).

Reconhecendo as dimensões continentais do Brasil e sua população de aproximadamente 200 milhões de habitantes, então se 1% da população se exercitasse três vezes por semana em uma bicicleta por 20 min, seguindo Igarashi *et al.* (2022), a eletricidade gerada poderia atingir 1,6 TWh em um mês e 19,2 TWh em um ano. Considerando a produção anual de energia no Brasil como 570,8 TWh (BEN, 2022), nossos resultados mostram que com uma simples mudança de hábitos, seria possível contribuir com 3,4% para a matriz elétrica brasileira.

Esses resultados demonstram que a energia elétrica pode ser colhida de atividades que também beneficiariam a saúde da população, diminuindo doenças relacionadas ao sedentarismo, com benefícios à saúde pública (REINER *et al.*, 2013). Os FCEs não são uma solução para a crise do aquecimento global. No entanto, os FCEs ajudam a mitigar as emissões de GEE associadas a fontes de energia não renováveis. A aplicabilidade dos FCEs deve considerar a possibilidade de redução de impostos com base em tarifas máximas e médias (diminuindo o máximo). Também deve ser destacado que o FCE não é uma indústria; a produção de energia dentro do esquema aqui proposto levanta preocupações éticas se se tornar uma forma de lucro sem respeito à vida e à saúde humanas, perdendo seu propósito. O excesso de treinamento e o excesso de exercícios acarretam problemas para a saúde humana (ANNAMALAI e NANDA, 2017; ROCHA *et al.*, 2019).

Essas discussões são necessárias, e usar o conceito de fazenda energética não para a saúde, mas sim para o lucro significa que as emissões associadas ao metabolismo humano são renováveis (e devem ser consideradas como tal). No entanto, quando se torna uma forma de substituir outras formas de energia, aumentará o consumo energético da pessoa, com



repercussões na ingestão alimentar. Foi demonstrado que as escolhas alimentares afetam as emissões de CO₂ (PEREIRA *et al.*, 2022; CARVALHO *et al.*, 2020; CARVALHO *et al.*, 2018).

Uma dieta convencional brasileira está associada a emissões de 4,8 kg CO₂-eq/dia, com 1,2 kg CO₂-eq/dia associado a uma dieta vegetariana (PEREIRA *et al.*, 2022). Se tentarmos compensar a produção de energia aumentando nossa dieta sem fins de saúde, a consequência é um aumento nas emissões de GEE. Políticas públicas devem ser formuladas para que essas fazendas energéticas utilizem esse conceito adequadamente, visando a saúde e os benefícios da prática de atividades físicas com regulamentações adequadas. Considerando as emissões relacionadas à dieta e 2.000.000 participantes (1% da população brasileira), os participantes não vegetarianos e vegetarianos emitem 1.258 e 314,5 t CO₂-eq anualmente (exercício de 20 minutos, três vezes por semana). A segunda lei da termodinâmica e a avaliação do ciclo de vida são cruciais para avaliar adequadamente qualquer forma de produção de energia elétrica, evitando o *greenwashing*. Os benefícios à saúde e a exergia destruída da sociedade devem ser contabilizados (MENG *et al.*, 2023).

Vários estudos discutiram os benefícios do uso de bicicletas em vez de carros, considerando que o trânsito é caótico e os acidentes são prováveis na maioria das regiões. Rojas-Rueda *et al.* (2012) estudaram essa troca para Barcelona (Espanha), fazendo oito estratégias distintas para substituir viagens de carro de curta e longa duração por transporte público e bicicletas. O destaque do estudo foi relacionado a acidentes e mortes evitáveis se 40% da população mudasse seus hábitos para transporte público (40,15 mortes evitadas) ou transporte público e ciclismo (98,50 mortes evitadas). Além disso, os autores declararam o efeito positivo da redução das emissões de CO₂ no centro de Barcelona. Não houve comentários sobre evitar algumas patologias, como em Cenzi *et al.* (2018) sobre o efeito do aumento de monóxido de carbono e intoxicações presentes no trânsito diário e até mesmo em túneis. É interessante destacar que em países desenvolvidos como a Noruega (RAUSTORP e KOGLIN, 2019), é mais fácil motivar os cidadãos a irem a pé ou de bicicleta para o trabalho, aumentando os benefícios para a saúde de um grupo de cidadãos.

Uma análise geral desse aumento no uso de transporte alternativo (baseado em exercícios físicos) para o trabalho foi apresentada por Jarrett *et al.* (2012), demonstrando que os resultados são dependentes das suposições, mas foi possível estimar uma economia financeira de aproximadamente £ 17 bilhões (a preços de 2010) para o Sistema Nacional de Saúde do Reino Unido. Isso seria possível devido à diminuição de patologias como diabetes tipo 2, demência, doença cerebrovascular, câncer de mama, câncer colorretal, depressão e doença cardíaca isquêmica, outros autores, como Winters *et al.* (2007), conduziram análises semelhantes.

Alguns estudos na literatura científica vão além. O conceito do SCE é usar a energia bioquímica de uma pessoa para produzir energia e investigar as vantagens de mudar o propósito do exercício. O objetivo geral é aumentar a saúde da população enquanto se obtém um ganho em impostos sobre eletricidade. Claro, alguma política pública deve incentivar o setor privado a usar essa ideia com ética e respeito pelos seres humanos. Li *et al.* (2008) aplicaram esse conceito a momentos de frenagem, como a regeneração em um carro híbrido, mostrando que um ligeiro aumento no custo metabólico rendeu 0,8 W de eletricidade.



O conceito de ir um passo além do desempenho esportivo/saúde, alcançando um aumento na expectativa de vida, pode motivar até mesmo as pessoas mais resistentes a começar atividades físicas e aproveitar os benefícios. A intenção é dar uma razão adicional para a população ser mais ativa, com ganhos reais na produção de eletricidade e até mesmo participação nos benefícios da geração de eletricidade. O caminho ético com os benefícios humanos adequados (sem exploração de mão de obra) desses SCEs ainda está para ser criado e está fora do escopo dos primeiros passos aqui apresentados.

Conforme declarado na abertura do artigo, este é um trabalho em andamento. No entanto, o valor do SCE foi claramente ilustrado neste exemplo. Este estudo apresentou o conceito de desenvolvimento de um SCE baseado em exercícios físicos humanos em uma bicicleta para refletir os desafios enfrentados pelo setor de energia descentralizada que devem ser superados e as extensões que serão implementadas para atingir as metas de eficiência energética. Finalmente, a colheita de energia de bicicletas *indoor* não apenas promove a sustentabilidade e a energia renovável, mas também oferece uma gama de impactos positivos, desde a motivação individual de condicionamento físico até benefícios ambientais e sociais mais amplos.

5. Conclusões

Esta contribuição descreve as prioridades de investigação, desenvolvimento e demonstração de novos conceitos e tecnologias para melhorar a eficiência energética e reduzir o consumo final de energia primária. Ao integrar métodos de colheita de energia em bicicletas ergométricas, torna-se possível gerar eletricidade ao mesmo tempo em que promove práticas sustentáveis e ecologicamente corretas. Isso não apenas aumenta a eficiência da experiência de ciclismo, mas também contribui para o objetivo mais amplo de utilizar energia movida a energia humana para aplicações práticas.

O primeiro passo foi propor um projeto de conceito inicial, o sistema *Green&Healthy Power*, combinado com referências de literatura científica que incluíam estudos de engenharia térmica e desempenho esportivo. Essa combinação permitiu que o estudo fosse um passo além ao selecionar uma bicicleta ergométrica como ponto focal para o estudo, servindo tanto como fonte de energia quanto como plataforma para avaliar a eficiência e as capacidades de geração de energia do ciclista. Portanto, foi possível fazer uma primeira estimativa, com base em casos reais, do uso da colheita de energia, que é uma característica distintiva deste estudo. Os resultados iniciais apresentados aqui não apenas contribuem com *insights* valiosos, mas também delineiam os próximos passos para o avanço da pesquisa neste domínio.

Uma grande quantidade de energia é produzida no treinamento de ciclismo *indoor* e outras atividades, que é dissipada. Criar novas tecnologias pode permitir que essa energia seja coletada/colhida e usada como eletricidade. Incentivar a população a praticar esportes e atividades físicas pode contribuir para um aumento na geração de eletricidade, trazer benefícios financeiros, melhorar a saúde e a qualidade de vida das pessoas e também contribuir para a redução das despesas médicas gerais, públicas e privadas.

Com uma pequena parcela da população praticando atividades regulares de SCE, uma parcela considerável de energia pode deslocar o consumo de eletricidade da rede,



contribuindo para maior autonomia energética e redução da sobrecarga em redes de distribuição centralizadas. Os benefícios ambientais gerais do emprego de um SCE como os apresentados aqui para produtos de consumo pessoais ou portáteis são modestos se considerarmos as questões ambientais associadas ao aquecimento, resfriamento ou transporte. Apesar dos benefícios enganosamente nada excepcionais em pequena escala, esses sistemas são escaláveis e os benefícios são extrapoláveis. Apesar das limitações do poder humano dentro dos esquemas de SCE, ele abre novas oportunidades de benefício e valor realizado na forma de fornecimento de energia adicional ou alternativo para locais remotos ou em desenvolvimento. SCE é uma solução de energia sustentável que pode ser combinada com outras fontes de energia renováveis. Esta é uma solução simples que, se bem explorada, pode aumentar a renda das academias e diminuir o uso de usinas termoeletricas nos horários de pico, além de trazer benefícios pessoais ao usuário.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Laboratório de Avaliação Ambiental e Energética (LAvAE) da UFPB, ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, bolsas de produtividade 309452/2021-0 e 307405/2021-4 e projeto 424173/2021-2) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa de doutorado.

7. Referências bibliográficas

- AKINAGA, H. Recent advances and future prospects in energy harvesting technologies. **Japanese Journal of Applied Physics**, v. 59, n. 11, 2020.
- ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Valores das bandeiras tarifárias são atualizados para o período 2022-2023 — Agência Nacional de Energia Elétrica**. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2022/valores-das-bandeiras-tarifarias-sao-atualizados-para-o-periodo-2022-2023>>. Acesso em: 13 ago. 2024.
- ANNAMALAI, K.; NANDA, A. Biological aging and life span based on entropy stress via organ and mitochondrial metabolic loading. **Entropy**, v. 19, n. 10, 2017.
- BEEBY, S. P.; CAO, Z.; ALMUSSALLAM, A. Kinetic, thermoelectric and solar energy harvesting technologies for smart textiles. In: KIRSTEIN, T. B. T.-M. K.-H. FOR S.-T. D. **Woodhead Publishing Series in Textiles**. [s.l.] Woodhead Publishing, 2013. p. 306–328.
- BLECHMAN, A.; BRAKER, G.; CHODNICKI, B.; DUBOW, E.; PERNIA, K.; SY, T.; THOMPSON, M.; TUCKER, J. A Study of the Benefits of Retrofitting Cardiovascular Exercise Equipment of a Gym With Human Energy Harvesting Technology. **Angewandte Chemie International Edition**, 6(11), 951–952., 2009.
- CARVALHO, M.; DA SILVA, A. L. T.; DE PAULA DINIZ, D.; DE BRITO, A. M. V. G.; DE SANTANA FREIRE, R. Carbon footprint associated with the production of cakes. **Revista em Agronegocio e Meio Ambiente**, v. 13, n. 3, p. 1185–1200, 2020.
- CARVALHO, M.; GRILO, M. M. de S.; ABRAHAO, R. Comparison of greenhouse gas



emissions relative to two frying processes for homemade potato chips. **Environmental Progress and Sustainable Energy**, v. 37, n. 1, p. 481–487, 2018.

CENZI, J. R.; ALBUQUERQUE, C.; MADY, C. E. K. The effect of carbon monoxide on the exergy behavior of the lungs. **Bioengineering**, v. 5, n. 4, 2018.

CHETTO, M.; QUEUDET, A. Harnessing Ambient Energy for Embedded Systems. In: [s.l: s.n.]p. 57–83.

CICCHELLA, A. Human Power Production and Energy Harvesting. **Encyclopedia**, v. 3, n. 2, p. 698–704, 2023.

DA ROCHA, A. L.; PINTO, A. P.; KOHAMA, E. B.; PAULI, J. R.; DE MOURA, L. P.; CINTRA, D. E.; ROPELLE, E. R.; DA SILVA, A. S. R. The proinflammatory effects of chronic excessive exercise. **Cytokine**, v. 119, n. March, p. 57–61, 2019.

FAHMY, M. F.; YILDIZ, F. Self Powered Fitness Equipment. v. 10, 2009.

GÜNTHER, W. R. **Ambiente urbano e sustentabilidade: desafios e oportunidades**. [s.l: s.n.]

HOSSAIN, N.; FERDOUS, J.; FUAD, F.; AHSAN-UZ-ZAMAN, K. M.; WAHED, A. Power distribution scheme using smart meter, perspective Bangladesh. **2nd International Conference on Electrical Information and Communication Technologies, EICT 2015**, n. November 2018, p. 486–491, 2016.

IGARASHI, T. L.; FERNANDES, T. L.; HERNANDEZ, A. J.; KEUTENEDJIAN MADY, C. E.; ALBUQUERQUE, C. Behavior of skin temperature during incremental cycling and running indoor exercises. **Heliyon**, v. 8, n. 10, 2022.

IHSAN, M.; VISWANATHAN, V. **Self-Powering Gyms: A Case Study on Energy Harvesting From a Static Bicycle** 11 nov. 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/IMECE2019-11972>>.

JANSEN, A.; STEVELS, A. Combining eco-design and user benefits from human-powered energy systems, a win-win situation. **Journal of Cleaner Production**, v. 14, n. 15–16, p. 1299–1306, 2006.

JARRETT, J.; WOODCOCK, J.; GRIFFITHS, U. K.; CHALABI, Z.; EDWARDS, P.; ROBERTS, I.; HAINES, A. Effect of increasing active travel in urban England and Wales on costs to the National Health Service. **The Lancet**, v. 379, n. 9832, p. 2198–2205, 2012.

JEUKENDRUP, A. E.; CRAIG, N. P.; HAWLEY, J. A. The bioenergetics of world class cycling. **Journal of Science and Medicine in Sport**, v. 3, n. 4, p. 414–433, 2000.

KALUARACHCHI, Y. Implementing Data-Driven Smart City Applications for Future Cities. **Smart Cities**, v. 5, n. 2, p. 455–474, 2022.

LI, Q.; NAING, V.; HOFFER, J. A.; WEBER, D. J.; KUO, A. D.; DONELAN, J. M. **Biomechanical energy harvesting: Apparatus and method**. BT - 2008 IEEE International Conference on Robotics and Automation, ICRA 2008, May 19-23, 2008, Pasadena, California, USA 2008. Disponível em: <<https://doi.org/10.1109/ROBOT.2008.4543774>>.

MADY, C. E. K.; ALBUQUERQUE, C.; FERNANDES, T. L.; HERNANDEZ, A. J.; SALDIVA, P. H. N.; YANAGIHARA, J. I.; DE OLIVEIRA, S. Exergy performance of human body under physical activities. **Energy**, v. 62, p. 370–378, 2013. Disponível em:



<<http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2013.09.050>>.

MADY, C. E. K.; IGARASHI, T. L.; ALBUQUERQUE, C.; SANTOS-SILVA, P. R.; FERNANDES, T. L.; HERNANDEZ, A. J. Exergy efficiency on incremental stationary bicycle test: A new indicator of exercise performance? **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 41, n. 12, p. 1–11, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s40430-019-2070-7>>.

MADY, C. E. K.; OLIVEIRA, S. Human body exergy metabolism. **International Journal of Thermodynamics**, v. 16, n. 2, p. 73–80, 2013.

MENG, Z.; YANG, Z.; ZHANG, B.; WU, X. Resource exergy analysis of the Chinese society in 2017. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 30, n. 14, p. 42016–42033, 2023. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s11356-023-25278-0>>.

MME, M. de M. e E.; EPE, E. de P. E. Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – Ano base 2021 (BEN 2021). **Relatório Síntese do Balanço Energético Nacional 2022 – Ano base 2021 (BEN 2021)**, p. 67, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2022>>.

ONU - ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. Nova Agenda Urbana. **Habitat III**, p. 66, 2016. Disponível em: <<https://habitat3.org/wp-content/uploads/NUA-Portuguese-Brazil.pdf>>.

PAN, H.; QI, L.; ZHANG, Z.; YAN, J. Kinetic energy harvesting technologies for applications in land transportation: A comprehensive review. **Applied Energy**, v. 286, n. January, p. 116518, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.116518>>.

PEREIRA, M. T. R. M.; CARVALHO, M.; MADY, C. E. K. Addressing Energy Demand and Climate Change through the Second Law of Thermodynamics and LCA towards a Rational Use of Energy in Brazilian Households. **Entropy**, v. 24, n. 11, 2022.

PHAM, H.; BANDARU, A. P.; BELLANNAGARI, P.; ZAIDI, S.; VISWANATHAN, V. Getting Fit in a Sustainable Way: Design and Optimization of a Low-Cost Regenerative Exercise Bicycle. **Designs**, v. 6, n. 3, p. 1–21, 2022.

RAUSTORP, J.; KOGLIN, T. The potential for active commuting by bicycle and its possible effects on public health. **Journal of Transport and Health**, v. 13, n. October 2018, p. 72–77, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jth.2019.03.012>>.

REINER, M.; NIERMANN, C.; JEKAUC, D.; WOLL, A. Long-term health benefits of physical activity - A systematic review of longitudinal studies. **BMC Public Health**, v. 13, n. 1, p. 1–9, 2013.

ROJAS-RUEDA, D.; DE NAZELLE, A.; TEIXIDÓ, O.; NIEUWENHUIJSEN, M. J. Replacing car trips by increasing bike and public transport in the greater Barcelona metropolitan area: A health impact assessment study. **Environment International**, v. 49, p. 100–109, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.envint.2012.08.009>>.

SALAMA, R.; AL-TURJMAN, F. Sustainable Energy Production in Smart Cities. **Sustainability (Switzerland)**, v. 15, n. 22, 2023.

SCHULTZ, H. S.; CARVALHO, M. Design, Greenhouse Emissions, and Environmental Payback of a Photovoltaic Solar Energy System. **Energies**, v. 15, n. 16, p. 1–24, 2022.



SCHULTZ, H. S.; MADY, C. E. K.; CARVALHO, M. Concept development of exercise-to-power: The Green&Healthy power concept. **Cleaner Energy Systems**, v. 8, n. April, p. 100120, 2024. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.cles.2024.100120>>.

SPANGHERO, G. M.; ALBUQUERQUE, C.; FERNANDES, T. L.; HERNANDEZ, A. J.; MADY, C. E. K. Exergy analysis of the musculoskeletal system efficiency during aerobic and anaerobic activities. **Entropy**, v. 20, n. 2, p. 1–16, 2018.

SUKUMARAN, S. K.; PURUSHOTHAMAN, M. An approach in energy harvesting from fitness equipment. In: 2014 International Conference on Science Engineering and Management Research (ICSEMR), 2014, [...]. 2014. p. 1–5.

ULLAH, M. T.; KARIM, M. A. Bin; UDDIN, M. H.; TAUSEEF, G. M. Harvesting green energy from wastage energy of human activities using gymnasium bicycle at Chittagong city. **2015 International Conference on Green Energy and Technology, ICGET 2015**, n. March 2020, 2015.

VEENMAN, R. S. **A Human Powered Fitness Bicycle: Generating electricity in fitness clubs**. 2009. TU Delft, 2009.

WINTERS, M.; FRIESEN, M. C.; KOEHOORN, M.; TESCHKE, K. Utilitarian Bicycling. A Multilevel Analysis of Climate and Personal Influences. **American Journal of Preventive Medicine**, v. 32, n. 1, p. 52–58, 2007.

ZOU, Y.; BO, L.; LI, Z. Recent progress in human body energy harvesting for smart bioelectronic system. **Fundamental Research**, v. 1, n. 3, p. 364–382, 2021. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.fmre.2021.05.002>>.