



DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS PARA A SECAGEM DE LODOS INDUSTRIAIS: NAS PERSPECTIVAS DE SENSORIAMENTO E DA ECONOMIA CIRCULAR

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2024.5130

Autores: CARLA CRISTINA ARAUJO PARREIRA, TAÍS RESENDE COSTA, HUGO CESAR COELHO MICHEL, IDALMO MONTENEGRO DE OLIVEIRA, LINDOMAR MATIAS GONÇALVES, MARCELO CARDOSO

Resumo: O artigo aborda o desenvolvimento de protótipos para a secagem de lodos industriais, focando nas perspectivas de sensoriamento e economia circular. A necessidade de secagem eficiente dos lodos industriais é crucial para minimizar impactos ambientais e reduzir custos operacionais. Foram desenvolvidos e testados dois protótipos de secadores solares para este fim. O primeiro protótipo utilizou um secador solar indireto ativo híbrido, enquanto o segundo incorporou um sistema de aquecimento solar com tubos à vácuo. Os resultados indicam que o uso de energia solar é uma alternativa promissora para a secagem de lodo industrial, reduzindo o tempo de secagem e aumentando a eficiência energética. Além disso, a construção de protótipos desempenha um papel fundamental no processo de ensino-aprendizagem, permitindo que estudantes apliquem conceitos teóricos na prática e desenvolvam habilidades em pesquisa e desenvolvimento. A integração de tecnologias de sensoriamento com protótipos de secadores promove a sustentabilidade e prepara os futuros engenheiros para os desafios da economia circular e da 4ª Revolução Industrial.

Palavras-chave: Secagem de lodos industriais; Protótipos; Economia circular; Sensoriamento

DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS PARA A SECAGEM DE LODOS INDUSTRIAIS: NAS PERSPECTIVAS DE SENSORIAMENTO E DA ECONOMIA CIRCULAR

1 INTRODUÇÃO

A necessidade de secagem dos lodos provenientes de indústrias é fundamental tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico. Geralmente, indústrias de grande porte como a de celulose geram uma grande quantidade de resíduos líquidos e sólidos, incluindo lodos que necessitam de tratamento adequado para evitar impactos negativos no meio ambiente. Para tanto, a secagem é um processo essencial para reduzir o volume de resíduos e prepará-los para posterior destino, seja reciclagem, reutilização ou descarte seguro. Nesse contexto, referências da literatura como a de Gorjian *et al.* (2021) e Prakash e Kumar (2014) ressaltam a importância de desenvolver tecnologias de secagem eficientes para lidar com os resíduos das indústrias, visando promover a sustentabilidade e a conformidade com regulamentações ambientais.

A criação de protótipos de secadores se mostra crucial para enfrentar os desafios apresentados pela secagem dos lodos industriais. Esses modelos permitem testar e otimizar diferentes configurações e parâmetros operacionais, garantindo que o processo de secagem seja eficiente e adequado às necessidades específicas da indústria. Trabalhos como os de Singh *et al.* (2021) e Slimani *et al.* (2016) destacam a importância de projetar e desenvolver protótipos de secadores que sejam eficazes, econômicos e ambientalmente sustentáveis, para atender às demandas de uma economia circular.

Além de sua relevância prática, a criação de protótipos de secadores também desempenha um papel fundamental no processo de ensino-aprendizagem em projetos acadêmicos e de pesquisa. A construção e análise de protótipos proporcionam uma oportunidade valiosa para que os estudantes apliquem conceitos teóricos na prática, desenvolvendo habilidades de resolução de problemas bem como ganhando experiência em pesquisa e desenvolvimento. Obras como a de Simo-Tagne *et al.* (2019) e Santos *et al.* (2014) ressaltam como a criação de protótipos pode enriquecer a experiência educacional, promovendo a inovação e o avanço do conhecimento em tecnologias de secagem e economia circular.

A economia circular tem sido objeto de pesquisa e discussão, com a literatura fornecendo dados sobre sua aplicação em diferentes contextos industriais. Uma revisão abrangente de Gherghel, Teodosiu e De Gisi (2019) destaca os desafios e oportunidades associados à valorização do lodo de esgoto no contexto da economia circular, ressaltando a importância de encontrar métodos sustentáveis de tratamento e aproveitamento desse resíduo como recurso. Além disso, trabalhos como o de Ramakrishna *et al.* (2020) exploram a interseção entre a Revolução Industrial 4.0 e a economia circular, enfatizando o papel das universidades na promoção da inovação e colaboração para impulsionar a transição para um modelo econômico mais circular.

Outros estudos, como o de Roberts *et al.* (2018), destacam a importância de integrar atividades de educação e pesquisa para promover a aplicação prática dos

princípios da economia circular na indústria. Essa abordagem holística enfatiza a necessidade de colaboração entre academia, indústria e governo para impulsionar a inovação e a adoção de práticas sustentáveis. No geral, esses trabalhos contribuem significativamente para a compreensão dos desafios e oportunidades associados à transição para uma economia circular, fornecendo uma base sólida para futuras pesquisas e práticas industriais.

Neste contexto, surge o desafio de compreender como a construção de protótipos pode contribuir para o aprendizado e análise da secagem do lodo industrial, um processo que impacta diretamente o gerenciamento de resíduos e a recuperação de materiais úteis. A literatura existente destaca a importância da construção de protótipos como uma ferramenta eficaz para a compreensão aprofundada de processos de secagem, permitindo a investigação de variáveis-chave e a otimização de parâmetros operacionais.

Cardoso e Chanin (2022) relatam uma análise abrangente da evolução do ensino da engenharia ao longo do tempo. O trabalho examina a história da educação em engenharia, destacando as mudanças significativas que ocorreram no campo, desde suas origens até os dias atuais. Ao revisitar o passado, os autores identificam tendências, desafios e inovações que moldaram o ensino da engenharia e fornecem projeções para o design do futuro da educação em engenharia. Ao traçar essa linha do tempo, é explicitado que o futuro do ensino em engenharia deve ser baseado em três linhas: Sustentabilidade, 4ª Revolução Industrial e Empregabilidade. Considerando a crescente relevância da sustentabilidade, da 4ª Revolução Industrial e da empregabilidade no futuro do ensino em engenharia, a integração da secagem de lodo por meio de protótipos com sensoriamento representa uma abordagem inovadora que aborda esses três tópicos de forma abrangente. Ao aplicar técnicas de sensoriamento em protótipos de secadores, os estudantes de engenharia têm a oportunidade de explorar não apenas os princípios da 4ª Revolução Industrial, mas também os conceitos de sustentabilidade relacionados à economia circular. Essa abordagem não apenas promove a compreensão dos avanços tecnológicos, mas também estimula o pensamento crítico sobre como essas inovações podem ser aplicadas de forma sustentável para resolver desafios reais da indústria, contribuindo assim para a formação de engenheiros preparados para enfrentar os desafios do futuro.

O objetivo deste estudo é explorar e analisar como a construção de um protótipo de secador pode facilitar o aprendizado e a compreensão do processo de secagem do lodo industrial, dentro do contexto da economia circular. A pesquisa busca investigar os benefícios e desafios associados à construção de protótipos específicos para este fim, visando contribuir para o avanço do conhecimento e aprimoramento das práticas de tratamento de resíduos nas indústrias.

2 DESENVOLVIMENTO DE PROTÓTIPOS DE SECADORES DE LODOS GERADOS EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

O desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para o tratamento e reutilização do lodo industrial tem sido objeto de pesquisa, e vem avançando nos últimos anos. Neste trabalho, foram analisados dois protótipos de equipamentos de secagem de lodo industrial que utilizam energia solar como fonte de energia (Gonçalves et al, 2023). O primeiro, já foi utilizado para testes (Figura 1) e o segundo está em construção. Esta abordagem inovadora busca não apenas reduzir os custos operacionais, mas também minimizar o impacto ambiental associado ao tratamento de resíduos industriais. Estudos como o de

Silva *et al.* (2023) têm explorado essa tecnologia emergente, destacando a eficácia da energia solar na secagem do lodo industrial e seus benefícios potenciais em termos de sustentabilidade. Ao aproveitar a abundante energia solar disponível, estes novos protótipos apresentam uma promissora alternativa para a secagem de lodo industrial, abrindo caminho para uma gestão mais eficiente e ambientalmente consciente de resíduos industriais.

O primeiro protótipo foi um Secador Solar Indireto Ativo Híbrido de Cabine. O secador proposto possui uma bandeja de secagem com área de 0,108 m² (0,24 m × 0,45 m). A capacidade de secagem foi estimada em aproximadamente 2 kg de lodo úmido por lote. O fluxo de ar foi realizado por convecção forçada por um ventilador na entrada. O desenvolvimento do secador com energia solar em escala laboratorial permite projetar um novo protótipo em escala industrial (Gonçalves *et al.*, 2023).

Figura 1. Foto do secador solar indireto ativo: (A1, A2, A3, A4 e A5) sensores de temperatura PT100, (B1 e B2) termo-higrômetro, (C) piranômetro, (D) anemômetro, (E). painel fotovoltaico.



Fonte: Gonçalves *et al.* (2023).

A radiação solar passa pelo vidro temperado com a espessura de 8mm e é absorvido por uma placa absorvedora na cor preto fosco localizada no fundo da cabine. O carregamento e descarregamento das amostras de lodo eram realizadas na câmara de secagem, por uma porta localizada abaixo da chaminé de exaustão Gonçalves *et al.* (2023).

De acordo com Gonçalves *et al.* (2023) a correta especificação da instrumentação, bem como a calibração realizada em escala laboratorial visam garantir que os experimentos sejam realizados com confiabilidade. A Tabela 1 ilustra a instrumentação utilizada durante todo o período de testes de secagem com o secador solar (material suplementar C de Gonçalves *et al.*, 2023).

O protótipo foi projetado e construído com um tempo médio de 4 meses. Os testes foram realizados com uma amostra de 2kg em cada batelada, com medição de variação de massa de 30 em 30 minutos. Na câmara de secagem há 4 bandejas de alumínio e a curva de secagem foi gerada por variação de massa. Durante os testes foram monitoradas as temperaturas de entrada, saída e de cada ponto do canal de passagem do ar internamente (PT-100), umidade relativa do ar na entrada e saída do dispositivo (termo-higrômetro), radiação solar incidente no plano (piranômetro), variação de massa do

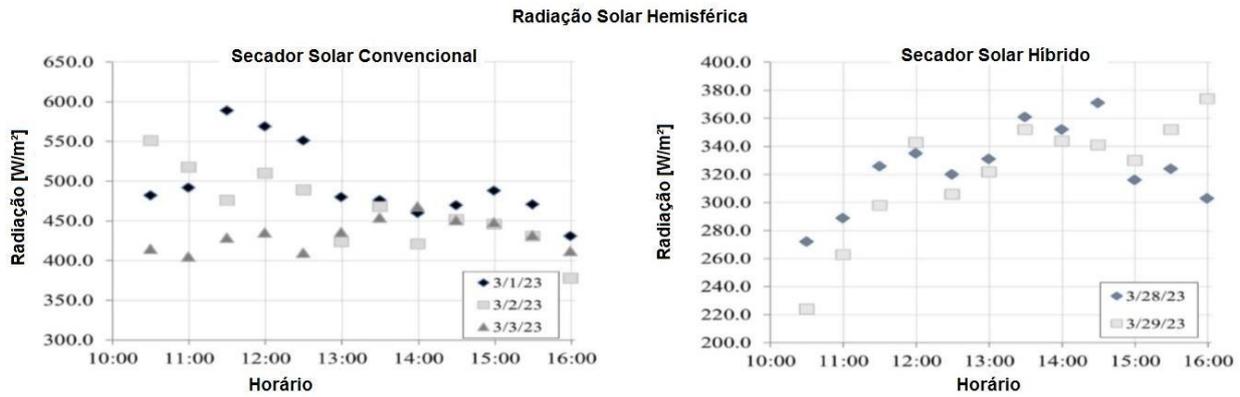
lodo na câmara de secagem (balança de precisão), aquisição de dados (NI cDAQ9191) (Gonçalves *et al.*, 2023).

Tabela 1. Instrumentação utilizada no secador solar.

Sensor	Uso	Ponto de medição	Recursos do sensor
 PT-100 sensor de temperatura	Determina a temperatura em vários pontos do secador	A1, A2, A3, A4 e A5	Fabricado em platina, com resistência nominal 100 Ω a 0°C.
 Thermo-higrômetro	Registrador gráfico para medição de temperatura + umidade e condensação de ponto de ajuste. Extech RH520A	B1 e B2	O RH520A's A memória interna pode armazenar até 49,152 medições para posterior transferência para a PC.
 Piranômetro	Utilizado para medições da radiação solar global incidente no plano do equipamento.	C	Ajuste da resposta do sensor com correção de cosseno, para que ele possa medir a radiação solar corretamente, independentemente do ângulo de incidência da luz solar. Resistente às intempéries. Baixo custo.
 Anemômetro multifuncional	Responsável pela medição de velocidade do ar na entrada do equipamento.	D	Alta precisão de medição. Mede luminosidade, temperatura e umidade relativa.
 Painel fotovoltaico	Mini painel fotovoltaico 12V 150mA usado para a convecção forçada do mini-ventilador na entrada do dispositivo.	E	Painel solar, multifunção 12V Waterproof, Dura.

Fonte: adaptado de material suplementar C de Gonçalves *et al.*, 2023.

Figura 2: Curvas de secagem observadas para teste do Protótipo 1 do Secador Solar.



Fonte: Adaptado de Gonçalves *et al.* (2023).

Para o experimento do teste de secagem realizado de 1 a 3 de março de 2023 com o secador solar convencional, iniciou-se com 29% de massa sólida inicial, alcançando um teor de massa sólida de 62,5%. Nos dias 28 e 29 de março do ano de 2023, iniciou-se com uma massa de sólidos de 27%, e ao final dos testes foi obtida uma média de 69,6% de massa de sólidos (modo híbrido) (Gonçalves *et al.*, 2023).

A partir da análise dos resultados obtidos nos testes do protótipo, mostrados na Figura 2, foi possível realizar o projeto e construção de um novo modelo com o intuito de buscar melhores resultados na eficácia de secagem do lodo industrial. A primeira modificação realizada em relação à versão inicial diz respeito ao pré-aquecimento do ar com adição de um ar aquecido por um soprador de calor. No segundo protótipo, é prevista a utilização de um trocador de calor que ficará instalado dentro de um boiler em um sistema de aquecimento solar de água a vácuo, comumente usado para aquecimento de água para banho, o que permitirá o aquecimento do ar ambiente por meio da água aquecida pela radiação solar. Essa abordagem está alinhada com as pesquisas de Santos *et al.* (2021), que destacam a eficácia dos aquecedores solares à vácuo na redução do consumo energético e no aumento da eficiência dos processos de secagem industrial.

Ademais, o emprego de energia solar está integrado em todas as fases do processo, com fins térmicos e também elétricos, por meio de painéis fotovoltaicos, promovendo a convecção forçada mediante a alimentação de um miniventilador. Todos os sensores devem ser alimentados pela rede elétrica originada dos painéis fotovoltaicos da Usina Solar do Campus de Florestal da Universidade Federal de Viçosa, onde o segundo protótipo deve ser implantado (Figura 3).

Figura 3: Laboratório de Energia Fotovoltaica, Universidade Federal de Viçosa - Campus Florestal.



Fonte: Acervo dos autores.

Por fim, é prevista uma exposição direta do lodo à incidência solar, o que também pode contribuir para o incremento da eficiência no procedimento de secagem. Esta abordagem está em consonância com estudos recentes, como destacado por Silva *et al.* (2023), que ressaltam os benefícios da exposição direta ao sol no processo de secagem de resíduos industriais, resultando em redução do tempo de secagem e aumento da eficiência energética do sistema.

Este segundo protótipo se trata de um secador solar misto que utiliza energia solar direta e indiretamente para a secagem de lodo industrial. Ele deve ser construído a partir de duas tecnologias: secador estufa utilizado para secagem de arroz (Chan, Dyah e Abdullah, 2015) e secador misto utilizado para secagem de tomates (Nayanita, Shaik e Muthukumar, 2022).

O sistema proposto conta com um aquecedor de tubos à vácuo acoplado a um boiler para recirculação de água isolado com poliuretano com espessura de 8mm, responsável por pré-aquecer o ar ambiente, a ser direcionado para a estufa, configurando o sistema de secagem em misto. Semelhante ao primeiro, este protótipo também prevê o uso de sensores devidamente posicionados para medição dos principais parâmetros durante o processo de secagem de resíduos sólidos. Esse sistema de secagem é projetado para favorecer a reutilização de lodos e outros resíduos, contribuindo significativamente para o reaproveitamento de resíduos sólidos industriais e agregando valor ao setor industrial com um impacto ambiental reduzido. A construção do protótipo deve seguir as seguintes etapas:

- Pesquisa na literatura com levantamento de materiais;
- Pesquisa de preço e levantamento de custos do projeto;
- Adaptações aos modelos encontrados na literatura, favorecendo o desenvolvimento de tecnologia, de forma a incluir a utilização da energia solar de maneira direta e indireta.

Chan, Dyah e Abdullah (2015) desenvolveram um secador solar de câmara de secagem de coletor integrado, conforme representado na Figura 4, composto por uma estrutura transparente de policarbonato, uma placa solar e um ventilador para promover o fluxo de ar no interior da câmara. Complementarmente, o protótipo incorpora um secador tipo estufa equipado com um aquecedor solar a vácuo, composto por tubos conectados a

um boiler para a recirculação de água, conforme demonstrado na Figura 5, configurando-se assim como um secador misto (Nayanita, Shaik e Muthukumar, 2022).

Considerando esses elementos, o secador aproveita a energia solar direta e indiretamente:

- Por meio da absorção direta da energia por meio de uma placa preta localizada no teto da cabine da estufa.
- No sistema de aquecimento de tubo a vácuo, cada tubo consiste em duas camadas de vidro, sendo que a camada interna é revestida por uma camada seletiva, que absorve a radiação solar e evita a perda de calor para o ambiente. O espaço entre as duas camadas é mantido a vácuo, o que reduz significativamente a perda de calor por condução e convecção. O ar pré-aquecido entrará na câmara de secagem promovendo a secagem do lodo.
- As dimensões do protótipo são as seguintes: 70 cm de largura por 1200 cm de profundidade. O equipamento apresentará uma estrutura geométrica retangular com uma inclinação de 30°. Possui um exaustor na saída, com capacidade para deslocar esse ar ambiente na entrada do boiler até a saída da câmara de secagem. A estrutura deve ser composta por vidro temperado de 4mm na parte superior e nas duas laterais, enquanto a parte frontal e traseira serão construídas com estrutura metálica preenchida com manta cerâmica, e pintadas na cor preto fosco, com o intuito de maximizar a absorção da energia solar.

Diferentemente dos modelos convencionais de aquecedor solar nos quais a água circula de acordo com a demanda de água aquecida, nesse protótipo a água fica parada, circulando apenas dentro do boiler. De acordo com a incidência solar, a camada inicial de água fria irá diminuir proporcionalmente ao longo do dia, até que o boiler fique totalmente preenchido com a água aquecida próxima aos 100°C. O ar entra pelo lado direito do equipamento por meio dos 8 tubos de cobre de 22mm que devem ser responsáveis por conduzir o ar aquecido pela água presente no boiler. O exaustor deve ser dimensionado levando em consideração as perdas de cargas para permitir a circulação do ar no misturador localizado do lado esquerdo e logo após o ar é, então, direcionado para a câmara de secagem por meio de um duto flexível para exaustão em alumínio 15 x 200 cm.

O protótipo deve ser construído em 2 etapas: Primeira etapa: montagem dos tubos de cobre transversalmente no boiler (Figura 4). Segunda etapa: Construção da estufa (greenhouse) baseada nos estudos de Chan *et al.* (2015) ilustrado na Figura 5.

Figura 4: Principais componentes do secador solar tipo estufa.



Fonte: Chan *et al.* (2015)

Figura 5: Boiler modificado com inserção de tubos de cobre para o Protótipo 2 do secador solar.



Fonte: Acervo dos autores.

A adoção de secadores solares de lodo no Brasil e no mundo traria inúmeros benefícios. Em primeiro lugar, ela pode reduzir substancialmente o impacto ambiental da eliminação de resíduos, minimizando o volume de lamas geradas e aumentando o teor de materiais sólidos mediante a redução da humidade. Isto, por sua vez, colabora para minimizar a dependência de métodos convencionais de deposição em aterro, contribuindo para uma abordagem de gestão de resíduos mais sustentável. Em segundo lugar, a secagem solar apresenta uma alternativa econômica e energeticamente eficiente em comparação com os métodos de secagem tradicionais. Como a energia solar está prontamente disponível no Brasil e em muitas outras regiões do mundo, o aproveitamento desse recurso renovável para processos de secagem pode levar a economias significativas em custos de energia e despesas operacionais.

Vale destacar que durante o desenvolvimento do projeto, os doutorandos realizam a escrita de artigos técnicos, para compor a tese final. A escrita geralmente é fruto de discussões com diversos colaboradores, muitos deles de outras instituições de pesquisas e universidades do Brasil ou do exterior, tais como UFVJM, UNIFEI e LUT.

3 O PAPEL DOS PROTÓTIPOS NO PROCESSO DE ENSINO-APRENDIZAGEM

A construção de protótipos desempenha um papel categórico no processo de aprendizado, especialmente em campos técnicos e científicos. Ao criar protótipos, os

estudantes têm a oportunidade de aplicar conceitos teóricos em um contexto prático, permitindo uma compreensão mais profunda e tangível dos princípios subjacentes. Além disso, a iteração por meio da construção de protótipos promove a resolução de problemas práticos e o desenvolvimento de habilidades práticas, proporcionando uma abordagem completa para a aprendizagem que complementa os métodos tradicionais de ensino. Estudos como o de Muljo, Perbangsa e Pardamean (2017) e Woodward *et al.* (2024) destacam como a construção de protótipos pode melhorar a compreensão conceitual e promover a criatividade e inovação entre os estudantes.

Além de seu impacto no aprendizado, a metodologia de construção de protótipos também desempenha um papel fundamental no desenvolvimento de pesquisa científica. Protótipos permitem aos pesquisadores testarem e validarem suas hipóteses de forma prática, fornecendo uma experiência valiosa que podem informar o design e a implementação de experimentos mais complexos. A iteração rápida proporcionada pela construção de protótipos também facilita a experimentação e a descoberta, permitindo aos pesquisadores explorar uma variedade de abordagens e refiná-las ao longo do tempo. Estudos como os de Abrishami *et al.* (2021) e Woodward *et al.* (2024) ressaltam como a construção de protótipos é uma ferramenta essencial para a pesquisa em engenharia, promovendo a inovação e o avanço do conhecimento científico.

Ao desenvolver protótipos, os estudantes de pós-graduação têm a oportunidade de explorar novas ideias, testar hipóteses e validar resultados em um ambiente controlado. Isso não apenas promove uma compreensão mais profunda dos fenômenos estudados, mas também possibilita a obtenção de dados empíricos que podem sustentar argumentos teóricos e contribuir para a literatura científica. Além disso, a colaboração com outras universidades oferece uma vantagem adicional, permitindo o compartilhamento de recursos, expertise e perspectivas multidisciplinares que podem enriquecer a pesquisa e promover a inovação, como é o caso da parceria entre a UFMG e a UFV. Estudos como os de Muljo, Perbangsa e Pardamean (2017) e Martin *et al.* (2022) destacam a importância da construção de protótipos como uma ferramenta valiosa para a pesquisa científica, enquanto trabalhos como o de Scott (2005) exploram os benefícios da colaboração interinstitucional para o avanço do conhecimento acadêmico.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho abordou a construção de protótipos como uma estratégia para desenvolver habilidades e promover uma compreensão aprofundada de processos de secagem. A sustentabilidade, particularmente relacionada à economia circular, é abordada mediante a aplicação dos protótipos em processos industriais, como a secagem de lodos, visando a redução de resíduos e o aproveitamento de recursos. A 4ª Revolução Industrial é representada pela utilização de sensoriamento nos protótipos, incorporando inteligência artificial para otimizar os processos industriais. Além disso, a empregabilidade é enfatizada pela aplicação prática dos protótipos em ambientes industriais reais, enquanto a metodologia ativa promove a autonomia de aprendizagem dos alunos, preparando-os para os desafios do mercado de trabalho moderno.

É trazido um exemplo de integração entre educação, pesquisa e práticas industriais para promover a adoção de princípios de economia circular. Desta forma, apresenta-se um incentivo para o desenvolvimento de práticas mais eficientes e sustentáveis de tratamento de resíduos, a partir de uma metodologia capaz de facilitar o aprendizado e a análise da secagem do lodo industrial. Além disso, ao identificar os benefícios e desafios

associados à construção de protótipos específicos para este fim, esta pesquisa pode orientar futuros esforços no sentido de aprimorar os métodos de secagem e maximizar o aproveitamento de recursos.

Ao demonstrar como a construção de protótipos pode, este trabalho fornece um incentivo para o desenvolvimento de práticas mais eficientes e sustentáveis de tratamento de resíduos. Além disso, ao identificar os benefícios e desafios associados à construção de protótipos específicos para este fim, esta pesquisa pode orientar futuros esforços no sentido de aprimorar os métodos de secagem e maximizar o aproveitamento de recursos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRISHAMI, S.; GOULDING, J.; RAHIMIAN, F. Generative BIM workspace for AEC conceptual design automation: prototype development. *Engineering, Construction and Architectural Management*, v. 28, n. 2, p. 482-509, 2021.

CARDOSO, M.; CHANIN, R. M. The history of Engineering Education: learning from the past to design the future. *Research, Society and Development*, v. 11, n. 11, e364111133606, 2022. DOI: 10.33448/rsd-v11i11.33606. Acesso em: 8 may. 2024.

CHAN, Y., DYAH, N., ABDULLAH, K. **Performance of a Recirculation Type Integrated Collector Drying Chamber (ICDC)**. *Solar Dryer Energia Procedia*, 2015.

GHERGHEL, A.; TEODOSIU, C.; DE GISI, S. A review on wastewater sludge valorization and its challenges in the context of circular economy. *Journal of Cleaner Production*, v. 228, p. 244-263. 2019.

GONÇALVES, L.M. *et al.* Solar Drying of Sludge from a Steel-Wire-Drawing Industry. *Energies* 2023, v. 16, n. 17, p. 1-18, 2023.

GORJIAN, S. *et al.* **Recent Advancements in Technical Design and Thermal Performance Enhancement of Solar Greenhouse Dryers**. *Sustainability*, 2021.

MARTIN, M. L. *et al.* Supervised contrastive learning over prototype-label embeddings for network intrusion detection. *Information Fusion*, v. 79, p. 200-228, 2021.

MULJO, H. H.; PERBANGSA, A. S.; PARDAMEAN, B. Online learning prototype for higher education. *International Conference on Information Management and Technology (ICIMTech)*, Special Region of Yogyakarta, Indonesia, p. 49-53, 2017.

NAYANITA, K.; SHAIK, S. R.; MUTHUKUMAR, P. Comparative study of Mixed-Mode Type and Direct Mode Type Solar Dryers using Life Cycle Assessment. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*. 2022.

PRAKASH, O.; KUMAR, A. **Design, development and testing of modified greenhouse dryer under natural convection**. *Heat Transfer Research*. 2014.

RAMAKRISHNA, S. *et al.* Emerging Industrial Revolution: Symbiosis of Industry 4.0 and Circular Economy: The Role of Universities. **Science, Technology and Society**, v. 25. 2020.

ROBERTS, K. *et al.* **Applying circular economy thinking to industry by integrating education & research activities**. Detritus. 2018.

SANTOS, M. E. *et al.* Augmented Reality Learning Experiences: Survey of Prototype Design and Evaluation. **IEEE Transactions on Learning Technologies**, v. 7, n. 1, p. 38-56. 2014.

SANTOS, R. A *et al.* Aproveitamento térmico de coletor solar na desinfestação de substrato. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v. 16,n. 2, p. 219-223, 2021.

SCOTT, W.. **Institutional Theory: Contributing to a Theoretical Research Program**. Chapter prepared for Great Minds in Management: The Process of Theory Development, Oxford UK, Oxford University Press. 2005.

SILVA, D.P. *et al.* Avaliação de custos da secagem de polpa de frutas em estufa de laboratório e biorreator secador solar. *In*: Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe, 2023, Sergipe. **Anais [...]**. Sergipe: Universidade Federal de Sergipe, 2023.

SIMO-TAGNE, M. *et al* (2019). Numerical analysis and validation of a natural convection mix-mode solar dryer for drying red chilli under variable conditions. **Renewable Energy**, v.151. p. 659-673. 2019.

SINGH, P.; SHRIVASTAVA, V.; KUMAR, A. **Recent developments in greenhouse solar drying: A review**, **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. 2018.

SLIMANI, M. E. *et al.* R.,Study and modeling of energy performance of a hybrid photovoltaic/thermal solar collector: Configuration suitable for an indirect solar dryer. **Energy Conversion and Management**, v. 125, 2016.

WOODWARD M. *et al*, **How to co-design a prototype of a clinical practice tool: a framework with practical guidance and a case study**. **BMJ Quality & Safety**;v. 33, p. 258-270.2024.

DEVELOPMENT OF PROTOTYPES FOR INDUSTRIAL SLUDGE DRYING: FROM THE PERSPECTIVES OF SENSING AND CIRCULAR ECONOMY

Abstract: *The article addresses the development of prototypes for industrial sludge drying, focusing on sensing and circular economy perspectives. The efficient drying of industrial sludge is crucial to minimize environmental impacts and reduce operational costs. Two solar dryer prototypes were developed and tested for this purpose. The first prototype used a hybrid active indirect solar dryer, while the second incorporated a solar heating system with vacuum tubes. The results indicate that the use of solar energy is a promising alternative for industrial sludge drying, reducing drying time and increasing energy efficiency. Additionally, prototype construction plays a fundamental role in the teaching-learning process, allowing students to apply theoretical concepts in practice and develop skills in research and development. The integration of sensing technologies with dryer prototypes promotes sustainability and prepares future engineers for the challenges of the circular economy and the 4th Industrial Revolution.*

Keywords: *Industrial sludge drying, Prototypes, Circular economy, Sensing*

