

# **Aliança Nuclear Verde - ESTUDO DE DESENVOLVIMENTO DE UMA ESTAÇÃO DE TRATAMENTO MÓVEL PARA A DRENAGEM ÁCIDA DE MINAS (DAM) E RECUPERAÇÃO DE URÂNIO**

**Arthur de Souza<sup>1</sup>, Danielle Carvalho<sup>1</sup>, Julia Palhares<sup>1</sup>, Marcela de Lima<sup>2</sup> e Pedro Carvalho<sup>1</sup>.**

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Química, PUC-MG; <sup>2</sup> Departamento de Engenharia de Defesa IME-RJ;

## **RESUMO**

O presente estudo desenvolve uma estação de tratamento móvel para a drenagem ácida de minas (DAM), focada na recuperação de urânio e na utilização da água para fins industriais. A DAM é um problema ambiental crítico em áreas de mineração, onde o tratamento inadequado pode comprometer a qualidade ambiental e a saúde pública. O sistema proposto incorpora etapas de precipitação com lama de cal de carbureto, decantação, filtração, peneira molecular e biossorção com microalgas, resultando na adequação do pH da DAM, no tratamento do efluente, na remoção de metais pesados e, por fim, na recuperação de urânio. A pesquisa também avalia a viabilidade do projeto através de ferramentas de empreendedorismo, como o Canvas Modelo de Negócios, análise de mercado, plano de marketing e plano operacional. O projeto básico inclui o desenvolvimento do diagrama de fluxo e balanço de massa do processo. A proposta visa não apenas mitigar os impactos ambientais da DAM, mas também contribuir para a segurança energética do Brasil, oferecendo uma solução sustentável e inovadora para a recuperação de urânio em minas descomissionadas e ativas.

Palavras chave: Drenagem ácida de minas, tratamento móvel, recuperação de urânio, sustentabilidade.

### **1. Introdução**

O urânio é um elemento essencial para a geração de energia nuclear, sendo utilizado como combustível em reatores nucleares. No Brasil, a mineração de urânio começou em 1982, em Poços de Caldas, Minas Gerais. Foram mineradas cerca de 1200 toneladas de urânio, as quais abastecem a Usina de Angra 1 por 13 anos. Atualmente, essa mina encontra-se em descomissionamento, o que envolve um conjunto de atividades complexas e

de longo prazo para garantir a segurança radiológica e ambiental. Sendo assim, no momento atual brasileiro, a mineração de urânio em atividade está localizada na Província Uranífera de Lagoa Real, na Bahia - nela, estima-se 87 mil toneladas de urânio (GOV, 2020; INB, 2024).

Durante a mineração desse elemento energético, o mineral é retirado da terra e triturado. Em seguida, para liberar o elemento urânio do mineral em que ele está contido, realiza-se um ataque químico, o qual pode ser feito utilizando soluções ácidas ou básicas (Almeida Neto, 2000). No decorrer da mineração e beneficiamento do urânio, ocorre a drenagem ácida de mina (DAM). Ela é considerada um dos mais sérios problemas ambientais ligados à atividade minerária, não só do urânio mas de outros diversos elementos. A DAM é um fenômeno que acontece quando rochas contendo minerais sulfetados são extraídas do subsolo e, ao serem expostas na superfície, passam por um processo de oxidação, por reagirem com a água e o oxigênio presentes na atmosfera. Esse rejeito líquido de pH extremamente baixo, age na dissolução de outros metais presentes na matéria mineral, ou seja, é frequentemente rico em metais pesados (Mello et al, 2014; Silvas, 2010).

Uma vez gerada, a DAM possui capacidade de prejudicar a qualidade da água, do solo, do ar e, portanto, causar danos à saúde humana e à biodiversidade. Em Poços de Caldas-MG, a mineração de urânio gerou DAM durante seu funcionamento e continua produzindo com o descomissionamento. Essa água ácida contém radionuclídeos como urânio e tório, além de elementos como manganês, zinco, flúor e ferro em concentrações acima dos níveis permitidos para descarga (Ladeira, 2007; Mello et al, 2014; Silvas, 2010).

Diante desse cenário, o objetivo deste trabalho é propor uma estação de tratamento móvel capaz de tratar o rejeito da DAM de Caldas e Província da Lagoa Real, podendo permitir a reutilização de água, o desenvolvimento tecnológico de infraestrutura sustentável e a recuperação de recursos valiosos como o urânio. Além de tratar esse rejeito em específico, a tecnologia se trata de uma plataforma que pode ser adaptada para atender outras minerações no país.

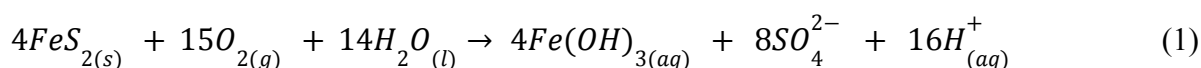
Nesse sentido, a recuperação do urânio, e potencialmente de outros materiais de interesse, a partir da DAM representa uma possibilidade de agregar valor ao processo de tratamento, além de minimizar a geração de lodo radioativo e evitar a contaminação humana devido à toxicidade química do urânio (Ladeira, 2007). Todos esses benefícios vão de encontro com as metas para atender aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS),

mostrando que é possível criar uma solução que beneficie a economia, o meio ambiente e a sociedade.

## 2. Referência Bibliográfica

### 2.1. Drenagem ácida de minas

A drenagem ácida de minas (DAM) é um tipo de efluente que ocorre quando minerais sulfurosos são expostos a oxigênio e água, levando a sua oxidação (Equação 1). Este processo então gera ácido sulfúrico que pode dissolver metais e outras substâncias na região, formando assim um efluente com uma alta concentração de metais pesados e elevada acidez. Embora seja natural, atividades de mineração intensificam a formação de DAM, aumentando a exposição dos minerais ao ar, água e microrganismos (Simate, 2014).



A contaminação de águas subterrâneas e águas pluviais por este efluente, pode causar um alto risco para a saúde humana. Metais pesados como chumbo, arsênio e cádmio podem causar danos neurológicos, falências de órgãos e aumentar ocorrências de cânceres. Em relação à vida aquática e vegetações, pode diminuir a biodiversidade, de forma que espécies mais sensíveis podem ser extintas da região (Simate, 2014).

### 2.2. DAM em minas de urânio no Brasil

O Brasil apresenta diversas jazidas de urânio espalhadas pelo território, porém somente duas localidades foram ou estão sendo efetivamente utilizadas, são elas a mina de Caldas-MG e a mina Caetité-BA (INB,2024). O presente estudo foi realizado baseado na mina descomissionada de Caldas, localizada no estado de Minas Gerais, onde há problemas significativos decorrentes da DAM. A Tabela 1 apresenta a composição química e concentrações dos compostos presentes neste efluente. Observa-se que diversos elementos estão acima do valor permitido pelo CONAMA 357, reforçando a necessidade de tratamento e alta possibilidade de recuperação de urânio.

**Tabela 1** - Análise química e radioquímica da água ácida de minas

Determination	Acid mine water <sup>a</sup>	Permissible level
U	12.0	0.02
Th	0.8	b
<sup>226</sup> Ra	3.5 Bq L <sup>-1</sup>	b
Mn	173.0	1.0
Ca	158.0	b
Mg	8.9	b
Al	170.4	b
Zn	41.0	5.0
Fe	180	15.0
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1400	b
F <sup>-</sup>	110	10.0
SiO <sub>2</sub>	57.0	b
pH	2.7	6.0–9.0

<sup>a</sup> Unless when indicated units are expressed in mg L<sup>-1</sup>, except pH.

<sup>b</sup> Permissible level not defined by Brazilian legislation CONAMA 357/2005

Fonte: Mello, 2006

### 2.3. Métodos de remediação da DAM

À medida que os impactos ambientais relacionados à DAM se tornaram visíveis ao longo dos anos, muitas pesquisas têm sido feitas para remediar este problema. Os métodos de remediação consistem no tratamento da DAM e são classificados em ativos ou passivos. Os métodos ativos são aqueles que envolvem tecnologias que demandam intervenção de operadores e sistemas de engenharia para o monitoramento e controle do tratamento. Já os métodos passivos, são aqueles que utilizam processos naturais de remoção química, biológica e física e requerem pouca intervenção para operar [1]. Os métodos ativos permitem um tratamento a curto prazo, apesar de envolver custos mais elevados que os tratamentos passivos. Estes, por sua vez, são mais sustentáveis, mas menos efetivos [2]. Conseqüentemente, a combinação de ambos os métodos para o tratamento da DAM pode oferecer vantagens em relação ao custo-benefício do processo.

#### 2.3.1. Precipitação química

O método de precipitação química consiste na adição de reagentes químicos para elevar o pH da DAM a um ponto em que íons metálicos dissolvidos formam compostos insolúveis que podem ser facilmente removidos Othman *et al* (2023). Entre os reagentes utilizados, a cal hidratada é muito comum devido à alta disponibilidade e custo relativamente inferior aos demais reagentes alcalinos, entretanto apresenta um problema relacionado à alta geração de lama. Dessa forma, estudos têm sido realizados a fim de substituir esses reagentes

por subprodutos industriais, reutilizando estes resíduos e gerando benefícios ecológicos e econômicos .

Othman *et al* (2023) estudou o uso de lama de cal de carbureto (CHL), subproduto da geração de gás acetileno contendo aproximadamente 94% de CaO, como agente precipitante, obtendo eficiências acima de 90% na remoção de Al, Fe, Mn e Zn até pH 9,5. A reação (2) representa a reação de dissociação da cal em contato com a água.



A maioria dos metais pesados se precipitaram como hidróxidos até pH 9. As reações a seguir representam a precipitação dos íons metálicos dissolvidos de zinco (3), manganês (4), alumínio (5) e ferro (6). A remoção de sulfato ocorre a partir da precipitação do gesso (7), mas apenas parte do sulfato é possível de ser removida, devido à solubilidade deste precipitado (Tolonen *et al*, 2014).



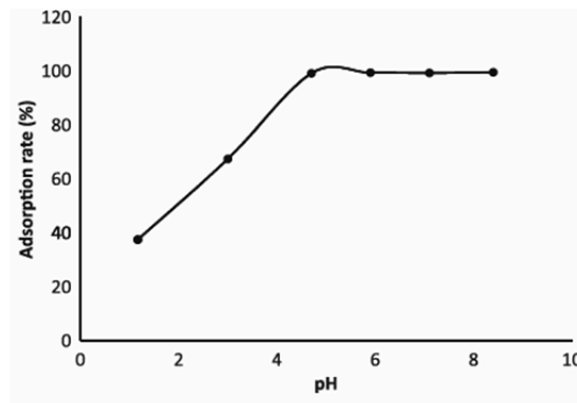
### 2.3.2. Peneiras moleculares

A utilização de peneiras moleculares é um processo de tratamento avançado que envolve a separação de contaminantes com base no tamanho das moléculas, utilizando materiais que possuem cavidades e poros de tamanho uniforme, como as zeólitas e sílica. Essa técnica é eficaz para remover metais, como o urânio, de soluções aquosas, aproveitando a alta seletividade dos poros para sorver contaminantes específicos. O processo é influenciado por fatores como pH e a presença de ânions, podendo ser otimizado para maximizar a recuperação de metais. Trata-se de uma solução eficiente e sustentável para o tratamento de efluentes industriais e de mineração (Barrer,1949).

A recuperação de urânio é possível a partir do uso de peneiras moleculares feitas de sílica nanoporosa (SEPEHRIAN, 2012). Este material é capaz de retirar em torno de 90% do

urânio presente no meio, em pH acima 5 (Figura 1), o que torna necessário uma etapa de neutralização prévia do rejeito a ser tratado. Com o tempo, as peneiras lentamente se saturam devido à acumulação de urânio, necessitando de um processo de dessorção e recuperação. Nesta fase, pode ser utilizada uma solução HCl para realizar uma limpeza, obtendo um concentrado de urânio, possibilitando a reutilização das peneiras.

**Figura 1** - Efeito do pH na sorção do urânio na sílica nanoporosa



Fonte: SEPEHRIAN, 2012

### **2.3.3. Tratamento biológico / bioadsorção**

O tratamento com microalgas apresenta uma solução promissora para melhorar a qualidade da água, devido à sua capacidade de absorver e metabolizar uma ampla variedade de poluentes como, metais pesados e compostos orgânicos. Essa técnica se trata de um processo natural e sustentável, que contribui para redução de emissão de gases efeito estufa. Nas etapas do processo, é fundamental selecionar espécies de microalgas adequadas para cada tipo de tratamento (ALCÁNTARA 2014)

## **3. Metodologia**

O presente estudo combina abordagens relacionadas ao empreendedorismo e inovação com aspectos técnicos, industriais e de gestão.

### **3.1. Sistema proposto de de tratamento da água da DAM**

O presente estudo propôs um sistema tecnológico móvel para o tratamento da Drenagem Ácida de Mina (DAM), com foco na produção de água utilizável e na recuperação de urânio. Os processos selecionados, fundamentados em estudos anteriores, são: precipitação seguida por decantação e filtração, peneiras moleculares e bioadsorção.

### **3.2. Empreendedorismo e inovação**

Para avaliar a viabilidade do projeto, foram utilizadas ferramentas de empreendedorismo, incluindo o Canvas Modelo de Negócios, análise de mercado e plano operacional.

### **3.3. Projeto básico**

O projeto básico da estação de tratamento móvel foi desenvolvido considerando os aspectos técnicos e operacionais do processo. Foi elaborado um diagrama de fluxo e balanço de massa do processo, a fim de determinar a concentração final das espécies após o tratamento, avaliando o potencial de recuperação de urânio e o uso da água tratada como água de classe 3.

## **4. Resultados e discussão**

### **4.1. Empreendedorismo e inovação**

#### **4.1.1. Canvas modelo de negócios**

O Canvas Modelo de Negócios foi elaborado (Apêndice A), detalhando os principais componentes da estrutura empresarial proposta.

#### **4.1.2. Análise de mercado**

Com o aumento da demanda por diversificação da matriz energética, os investimentos em tecnologias seguras têm colocado a geração nuclear no centro das políticas energéticas globais (MME, 2020). Segundo dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB 2023), o mercado de urânio ganha destaque, especialmente no Brasil, que possui a oitava maior reserva de urânio, com potencial para estar entre as cinco maiores reservas mundiais, considerando as áreas ainda inexploradas.

As iniciativas estão alinhadas com o Plano Nacional de Energia (PNE) 2050, que promove a intensificação das atividades de prospecção de minerais estratégicos, como o urânio, visando fortalecer a base energética nuclear do Brasil. Isso posiciona o país a atender à crescente demanda global por energia limpa e segura, consolidando sua importância no cenário internacional do setor nuclear. Para atender às exigências da Política Nuclear Brasileira (PNB), estabelecida pelo Decreto nº 9.600, de 5 de dezembro de 2018, é fundamental abordar os objetivos do setor de mineração, no que se diz respeito ao reaproveitamento de urânio e a gestão de rejeitos nucleares.

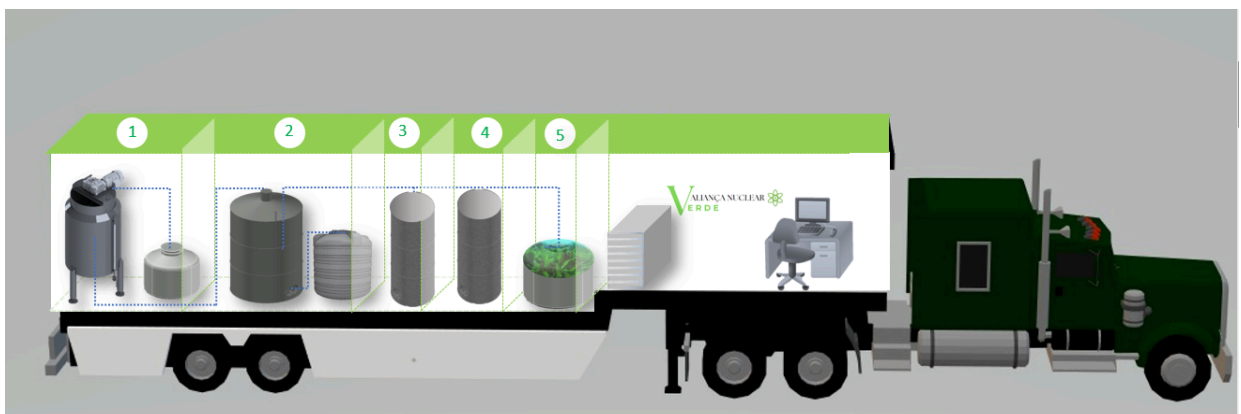
A Aliança Nuclear Verde (ANVerde) surge estrategicamente nesse contexto, oferecendo uma solução inovadora e sustentável. Através de caminhões móveis equipados com tecnologia inovadora, a empresa trata a drenagem ácida de mina (DAM). Dessa forma, o reaproveitamento de urânio e a gestão responsável de rejeitos estão em consonância com os objetivos da PNB, que visam não apenas a sustentabilidade econômica, mas também a segurança e a proteção do meio ambiente.

Além de resolver a questão da DAM, essa solução contribui diretamente para os ODS 6 (Água Potável e Saneamento), ao recuperar águas contaminadas, o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao oferecer uma tecnologia portátil e eficiente de tratamento ambiental e o ODS 12 (Consumo e Produção Responsáveis), uma vez que o sistema transforma resíduos em recursos valiosos, como o urânio, promovendo uma economia circular na mineração e minimizando os impactos ambientais.

#### 4.1.3. Plano operacional

O caminhão móvel ANVerde foi desenvolvido para oferecer uma solução flexível e adaptável para o tratamento da DAM, sua mobilidade faz com que seu custo seja reduzido. Essa abordagem permite atender a diferentes demandas de vazão, adaptando-se a operações de variadas escalas, desde pequenas minas até grandes empreendimentos. O *layout* do caminhão é otimizado, incorporando todos os componentes essenciais para o processo de tratamento, incluindo um sistema de captação, módulos de peneiras moleculares para a separação de urânio e outros metais, além de unidades de tratamento e destino seguro da água purificada (Figura 2).

**Figura 2** - Imagem representativa do sistema de tratamento móvel



Fonte: Autores

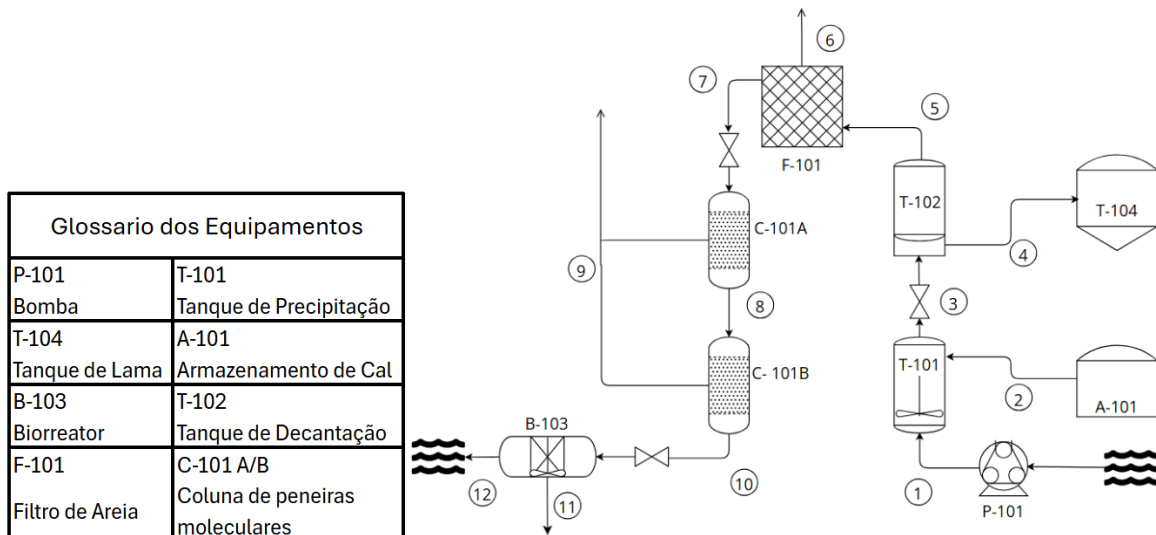


## 4.2. Projeto básico

### 4.2.1. Diagrama de fluxo de processo (PFD)

A Figura 3 representa o diagrama fluxo de processo do sistema de tratamento móvel proposto e todas as correntes adjacentes ao processo principal.

**Figura 3** - Diagrama de fluxo de processo



Fonte: Autores

### 4.2.2 Balanço de massa

A Tabela 2 representa o balanço de massa de todas as espécies presentes na DAM da região de Caldas-MG e no processo de tratamento. A numeração das correntes está de acordo com o PFD representado na Figura 3.

**Tabela 2.** Balanço de massa do processo de tratamento da DAM

Espécies	Vazão das correntes (kg/h)										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
H <sub>2</sub> O	9.081,9	156,0	9.240,7	26,5	9.214,2	-	9.214,2	-	9.214,2	-	9.214,2
U	0,110	-	0,110	-	0,110	-	0,110	0,095	0,014	-	0,014
Th	0,007	-	0,007	-	0,007	-	0,007	-	0,007	-	0,007
Mn	1,579	-	0,016	-	0,016	-	0,016	-	0,016	-	0,016
Ca	1,443	8,811	7,054	-	7,054	-	7,054	-	7,054	4,585	2,469
Mg	0,081	0,217	0,298	-	0,298	-	0,298	-	0,298	0,182	0,116
Al	1,556	-	0,016	-	0,016	-	0,016	-	0,016	-	0,016
Zn	0,374	-	0,004	-	0,004	-	0,004	-	0,004	-	0,004
Fe	1,643	-	0,016	-	0,016	-	0,016	-	0,016	0,002	0,014
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	12,782	-	5,113	-	5,113	-	5,113	-	5,113	-	5,113
F <sup>-</sup>	1,004	-	1,004	-	1,004	-	1,004	-	1,004	-	1,004
OH <sup>-</sup>	-	7,781	0,001	-	0,001	-	0,001	-	0,001	-	0,001
SiO <sub>2</sub>	0,520	0,347	0,867	0,694	0,173	0,123	0,050	-	0,050	-	0,050
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0,173	0,173	0,139	0,035	0,025	0,010	-	0,010	-	0,010
Fe(OH) <sub>2</sub>	-	-	2,621	2,097	0,524	0,373	0,151	-	0,151	-	0,151
Mn(OH) <sub>2</sub>	-	-	2,532	2,025	0,506	0,361	0,146	-	0,146	-	0,146
Al(OH) <sub>3</sub>	-	-	4,453	3,562	0,891	0,634	0,256	-	0,256	-	0,256
Zn(OH) <sub>2</sub>	-	-	0,563	0,451	0,113	0,080	0,032	-	0,032	-	0,032
CaSO <sub>4</sub>	-	-	10,869	8,695	2,174	1,548	0,626	-	0,626	-	0,626
<b>TOTAL</b>	<b>9103</b>	<b>173</b>	<b>9276</b>	<b>44</b>	<b>9232</b>	<b>3</b>	<b>9229</b>	<b>0,10</b>	<b>9229</b>	<b>5</b>	<b>9224</b>

Fonte: Autores

Sabendo que nas minas de Caldas-MG são gerados aproximadamente 80.000 m<sup>3</sup> por ano (ESTANISLAU,2019), a vazão de alimentação do processo de tratamento (corrente 1) foi definida considerando um cenário ideal de funcionamento do caminhão durante 24 horas/dia, tratando todo este volume ao longo de 1 ano. Considerando a temperatura da água como 25°C e invariável durante todo o processo, a densidade utilizada nos cálculos para a DAM foi de 997 kg/m<sup>3</sup>. Dessa forma, a vazão mássica de alimentação obtida foi de 9.103 kg/h. A caracterização química qualitativa e quantitativa da DAM da região de Caldas está representada na Tabela 1.

O agente precipitante utilizado foi o CHL, cuja especificação química está descrita na tabela 3. A corrente 2 representa a adição de uma solução contendo 10% em massa de CHL à DAM no tanque de precipitação, conforme realizado por Tolonen *et al* (2014). A vazão mássica de solução foi calculada visando obter um pH resultante de 8,7 na mistura, buscando uma alta eficiência de precipitação dos metais mantendo o pH próximo da neutralidade. As algas analisadas neste estudo foram da espécie *Chlorella vulgaris*, devido à sua capacidade de retenção de íons de cálcio e magnésio. Já as peneiras moleculares utilizadas foram de sílica nanoporosa, devido à sua capacidade de retenção de urânio. O estudo foi feito utilizando duas colunas de peneiras moleculares em série, a fim de se aumentar a retenção de urânio da DAM.

**Tabela 3** - Composição química do CHL

Composto Químico	CaO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Percentual (%)	94	3	2	1

Fonte: [4]

As eficiências utilizadas nos cálculos do balanço de massa estão representadas na **Tabela 4**.

Tabela 4 - Eficiência dos processos utilizados para tratamento da DAM

Equipamento	Objetivo	Eficiência	Referência
Tanque de precipitação	Precipitação de Fe <sup>2+</sup> , Zn <sup>2+</sup> , Al <sup>3+</sup> e Mn <sup>2+</sup>	99%	Othman <i>et al</i> (2023)
	Remoção de SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	60%	Tolonen <i>et al</i> (2014)
Decantador	Decantação de sólidos suspensos	80%	Falco <i>et al</i> (2020)
Filtro de areia	Remoção de sólidos não decantados	71,2%	Mesquita <i>et al</i> (2019)
Peneiras moleculares	Retenção de urânio	97%	Sepehrian <i>et al</i> (2012)
Biorreator	Retenção de íons: Ca <sup>2+</sup>	65%	Pires (2019)
	Mg <sup>2+</sup>	61%	
	Fe <sup>2+</sup>	13%	

A Tabela 5 compara a concentração das espécies presentes na água antes e após o tratamento. Observa-se que houve uma redução da maioria dos compostos químicos, principalmente do urânio. Por outro lado, houve um aumento significativo de concentração de íons cálcio e magnésio devido ao uso do CHL na precipitação.

**Tabela 5** - Análise da eficiência do processo de tratamento proposto

Espécie	Concentração (mg/L)		Variação
	Inicial	Final	
U	12,00	0,01	-99,9%
Th	0,80	0,79	-1%
Mn	173,00	1,72	-99%
Ca	158,00	268,46	70%
Mg	8,90	12,63	42%
Al	170,40	1,69	-99%
Zn	41,00	0,41	-99%
Fe	180,00	1,55	-99%
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1400,00	555,94	-60%
F <sup>-</sup>	110,00	109,20	-1%
SiO <sub>2</sub>	57,00	5,43	-90%
pH	2,70	8,70	-

Fonte: Autores

De acordo com o sistema de tratamento proposto, a capacidade máxima de recuperação de urânio é de aproximadamente 959 kg/ano. Considerando o valor do urânio como R\$981,907/kg, isso é equivalente a aproximadamente R\$ 941.530,00/ano.

A água final foi comparada com padrões necessários para ser considerada uma água de classe 3, diversos elementos atingiram a concentração necessária para entrar nesta classificação porém o manganês, o sulfato e flúor apresentaram concentrações superiores.

## 5. Conclusões e recomendações

O Brasil se destaca como um país com grande potencial na mineração de urânio, o que justifica o desenvolvimento deste projeto. A solução móvel proposta visa atender a demanda crescente por tecnologias sustentáveis, agregando valor com a recuperação de urânio, e posicionando o país de forma estratégica no cenário global da energia nuclear.

O sistema de tratamento móvel demonstrou um potencial significativo no tratamento de DAM, permitindo a recuperação de urânio e uma melhoria relacionada à redução dos compostos químicos presentes. A recuperação de urânio não só contribui para a mitigação dos impactos ambientais, mas também representa uma oportunidade econômica significativa, considerando o valor do urânio no mercado.

Contudo, observou-se que alguns elementos não atingiram a concentração necessária para classificar essa água como classe 3, mostrando a necessidade de otimização ou desenvolvimento de mais etapas de tratamento. Ademais, este trabalho não entrou no mérito relacionado aos rejeitos gerados na etapa de filtração, abrindo uma nova vertente a ser considerada.

## REFERÊNCIAS

ARAÚJO, Sandrine Ferraz. Estudo da utilização de lama grossa de aciaria no tratamento de drenagem ácida de mina sintética e real em escala laboratorial. 2020. 220 f. Tese (Doutorado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

AVELAR, É. C. Modelagem da extração por solventes de urânio em meio sulfúrico com Alamine®336 na ausência e na presença de íons cloreto. [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

Barrer, R. M. (1949). Molecular-sieve action of solids. *Quarterly Reviews, Chemical Society*, 3(4), 293. doi:10.1039/qr9490300293

Brasil retoma produção de urânio. Disponível em:

<<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/12/brasil-retoma-producao-de-uranio>>. Acesso em: 21 set. 2024.

DE ALMEIDA NETO, J. F. Análise exergética do ciclo do combustível nuclear: etapa da mineração até a obtenção do concentrado de urânio (yellow cake). [s.l.] Universidade Federal de Minas Gerais, 2000.

Augusto Estanislau, et al. “Caracterização Mineralógica de Rejeitos E Determinação Dos Potenciais de Geração E de Neutralização de Drenagem Ácida Da Mina de Urânio Osamu Utsumi (Caldas- MG).” *Resumos Do...*, 30 Nov. 2019, <https://doi.org/10.20396/revpibic2720192470>. Accessed 24 Sept. 2024.

FALCO, Salvatore; BRUNETTI, Giuseppe; GROSSI, Giovanna; MAIOLO, Mario; TURCO, Michele; PIRO, Patrizia. Solids Removal Efficiency of a Sedimentation Tank in a Peri-Urban Catchment. *Sustainability*, v. 12, n. 17, p. 7196, 3 set. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/su12177196>.

GOV BRASIL. Brasil retoma produção de urânio. Disponível em:

<https://www.gov.br/pt-br/noticias/energia-minerais-e-combustiveis/2020/12/brasil-retoma-producao-de-uranio#:~:text=Produ%C3%A7%C3%A3o%20de%20ur%C3%A2nio%20no%20Brasil,a%20Usina%20de%20Angra%201>. Acesso em: 02 ago. 2024.

INB - INDÚSTRIAS NUCLEARES DO BRASIL. Produção de Urânio. Disponível em: <https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Produ%C3%A7%C3%A3o>. Acesso em: 05 ago. 2024.

INB Produção. Disponível em:

<<https://www.inb.gov.br/Nossas-Atividades/Ur%C3%A2nio/Produ%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 21 set. 2024.

LADEIRA, Ana Claudia Queiroz; GONÇALVES, Carlos Renato. Influence of anionic species on uranium separation from acid mine water using strong base resins. *Journal Of Hazardous Materials*, [S.L.], v. 148, n. 3, p. 499-504, set. 2007. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.03.003>.

MELLO, Jaime W. Z., DUARTE, Helio, LADEIRA, Ana Cláudia. Origem e controle do fenômeno drenagem ácida de mina. *Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola*, São Paulo, n. 8, p. 19-23, 2006. Disponível em: <http://qnesc.sbq.org.br/online/cadernos/08/06-CTN4.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.

MESQUITA, Marcio; DEUS, Fábio Ponciano de; TESTEZLAF, Roberto; DIOTTO, Adriano Valentim. Removal efficiency of pressurized sand filters during the filtration process. *Desalination And Water Treatment*, v. 161, p. 132-143, set. 2019. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.5004/dwt.2019.24285>.

MME – Ministério de Minas e Energia. Plano Nacional de Energia 2050. Brasília: MME, 2020. Disponível em: <https://www.mme.gov.br/>. Acesso em: 02 set. 2024.

OTHMAN, Anuar; MAMAT, Che Rozid; IBRAHIM, Ismail; ROZI, Mohd Syahrir Mohd. The Mixture of Limes in Acid Mine Drainage Treatment. *Malaysian Journal Of Fundamental And Applied Sciences*, [S.L.], v. 19, n. 4, p. 668-678, 27 ago. 2023. Penerbit UTM Press. <http://dx.doi.org/10.11113/mjfas.v19n4.2759>.

PEREIRA SILVA, P. H. PROCESSO DE BENEFICIAMENTO DO URÂNIO VISANDO A PRODUÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA. [s.l.] Universidade Estadual do Paraná, 2011.

PIRES, Tamires de Almeida. Avaliação do uso de microalgas na remoção de nutrientes e metais de efluente contendo soro de queijo. 2019. 98 f. Dissertação (Mestrado em

Engenharia Química) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019. DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2020.3010>

R. LAMARSH, J.; J. BARATTA, A. Introduction to Nuclear Engineering. 3. ed. [s.l.] Prentice Hall, 2001.

SEPEHRIAN, H.; SAMADFAM, M.; ASADI, Z. Studies on the recovery of uranium from nuclear industrial effluent using nanoporous silica adsorbent. *International Journal of Environmental Science and Technology*, v. 9, n. 4, p. 629–636, 20 abr. 2012

SILVAS, Flávia Paulucci Cigana. Biotecnologia aplicada ao tratamento de drenagem ácida de mina. 2010. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-29112010-161100/publico/Dissertacao\\_Flavia\\_Paulucci\\_Cigana\\_Silvas.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3133/tde-29112010-161100/publico/Dissertacao_Flavia_Paulucci_Cigana_Silvas.pdf). Acesso em: 01 ago. 2024.

TOLONEN, Emma-Tuulia; SARPOLA, Arja; HU, Tao; RÄMÖ, Jaakko; LASSI, Ulla. Acid mine drainage treatment using by-products from quicklime manufacturing as neutralization chemicals. *Chemosphere*, v. 117, p. 419-424, dez. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.07.090>.

WIBOWO, Yudha Gusti; FADHILAH, Rahmat; SYARIFUDDIN, Hutwan; MARYANI, Anis Tatik; PUTRI, Intan Andriani. A Critical Review of Acid Mine Drainage Treatment. *Jurnal Presipitasi: Media Komunikasi dan Pengembangan Teknik Lingkungan*, [S.L.], v. 18, n. 3, p. 524-535, 18 set. 2021. Institute of Research and Community Services Diponegoro University (LPPM UNDIP). <http://dx.doi.org/10.14710/presipitasi.v18i3.524-535>.

## **APÊNDICE A - CANVAS MODELO DE NEGÓCIO**

