FUNDAÇÃO PARA O DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO DA ENGENHARIA
NÚCLEO DE PESQUISA PARA A PEQUENA MINERAÇÃO RESPONSÁVEL

DIONE MACEDO
HASSAN SOHN
OSWALDO MENTA SIMONSEN NICO

PANORAMA NACIONAL DA MINERAÇÃO ARTESANAL E EM PEQUENA ESCALA DE OURO

VOLUME X

AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TÉCNICAS
AO USO DE MERCÚRIO

SÃO PAULO
FEVEREIRO/2025

DIONE MACEDO
HASSAN SOHN
OSWALDO MENTA SIMONSEN NICO

PANORAMA NACIONAL DA MINERAÇÃO ARTESANAL E EM PEQUENA ESCALA DE OURO

VOLUME X

AVALIAÇÃO DAS ALTERNATIVAS TÉCNICAS AO USO DE MERCÚRIO

Estudo realizado no âmbito do Projeto "Desenvolvimento do Plano de Ação Nacional para a Mineração Artesanal e em Pequena Escala de Ouro no Brasil", financiado pelo Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), implementado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) e em apoio ao Ministério de Minas e Energia da República Federativa do Brasil.

GEFID 10860 - S1-32GFL-000749
Ctt. 2137

SÃO PAULO
FEVEREIRO/2025

Projeto Desenvolvimento do Plano de Ação Nacional para a Mineração Artesanal e em Pequena Escala de Ouro no Brasil

Coordenações do Projeto

Hassan Sohn
Articulação Institucional

Giorgio Francesco Cesare de Tomi
Técnica

Oswaldo Menta Simonsen Nico
Financeira

Carlos Henrique Xavier Araujo
Atividades de Campo

Ébida Rosa Santos
Comunicação

Dione Macedo
Organização e Sistematização

Equipe de Campo

Carlos Henrique Xavier Araujo

Deborah Goldemberg

Januaria Pereira Mello

Carlos Eduardo Porto Andrade

Rodrigo Daniel de Miranda Matos

Geoprocessamento
João Vitor Santos

Apoio Operacional
Elisangela Romanelli Terenci

As opiniões, conclusões, recomendações ou quaisquer afirmações emitidas neste trabalho são de exclusiva e inteira responsabilidade do(s) consultor(es) responsáveis pela sua elaboração, não exprimindo necessariamente a opinião da Fundação para o Desenvolvimento Tecnológico da Engenharia (FDTE), ou do Fundo Global para o Meio Ambiente (GEF), ou do Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) ou do Ministério de Minas e Energia da República Federativa do Brasil.

Todos os dados e conteúdo escrito do presente relatório estão protegidos pela Licença *Creative Commons* Atribuição Não Comercial 4.0 Internacional (CC BY-NC 4.0). Os leitores são livres para compartilhar e adaptar o material, mas devem fazer as devidas citações, fornecer um link para o material original e indicar se foram feitas alterações. O material publicado não pode ser utilizado para fins comerciais, nem de forma discriminatória, degradante ou distorcida.

Foto de capa: fotomontagem com mudas de pau-de-balsa e bateia contendo ouro obtido em processo de separação usando o extrato da planta.

Este trabalho é dedicado a todos os profissionais acadêmicos e técnicos que não limitaram sua atuação à mera descrição de problemas, mas atuaram proativamente ao longo dos anos no desenvolvimento de soluções para redução e potencial eliminação do uso de mercúrio pela atividade garimpeira de ouro e não há dúvida que mesmo a menor contribuição pessoal foi decisiva para a proteção da saúde humana e do meio ambiente e resgate da dignidade de milhões de mineradores e de suas famílias, no Brasil e no Mundo.

AGRADECIMENTOS

Os autores expressam o seu agradecimento às seguintes instituições, pela contribuição inestimável para a realização deste trabalho:

Federação das Cooperativas de Mineração do
Estado de Mato Grosso - FECOMIM

Federação das Cooperativas de Garimpeiros
do Pará - FECOGAP

Departamento de Desenvolvimento Sustentável na Mineração
do Ministério de Minas e Energia (MME/SGM/DDSM)

Global Mercury Partnership (UNEP/GMP)

Equipe das Embrapas Florestas e Agrossilvipastoril

Equipe do Projeto Ochroma

Expressa-se especial agradecimento aos dirigentes e pessoal técnico das cooperativas garimpeiras que receberam a equipe de projeto em suas instalações.

Registra-se também o agradecimento ao Prof. Giorgio de Tomi por compartilhar seu conhecimento no capítulo sobre a coexistência como estratégia alternativa de acesso à recursos para a MAPE de ouro.

RESUMO

Este documento é parte integrante do conjunto de diagnósticos temáticos que compõe o “panorama nacional da mineração artesanal e em pequena escala de ouro” e analisa de modo crítico as alternativas tecnológicas citadas na literatura disponível ou em desenvolvimento que poderiam potencialmente reduzir ou eventualmente eliminar o uso de mercúrio na mineração artesanal e em pequena escala (MAPE) de ouro brasileira, partindo de uma contextualização geral pela apresentação simplificada de conceitos básicos de recuperação de minério de ouro, para a partir daí apresentar as potencialidades e desafios de cada possível alternativa.

Palavras-chaves: alternativas tecnológicas; redução ou eliminação do uso de mercúrio; mineração artesanal e em pequena escala.

MACEDO, Dione; SOHN, Hassan; NICO, Oswaldo Menta Simonsen. **Panorama nacional da mineração artesanal e em pequena escala, vol. X: avaliação das alternativas técnicas ao uso de mercúrio**. São Paulo: FDTE, fev. 2025.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETEM	Centro de Tecnologia Mineral
CI	cianetação intensiva
COOGAVEPE	Cooperativa dos Garimpeiros do Vale do Rio Peixoto
CooperPoconé	Cooperativa de Desenvolvimentos Minerais de Poconé
INCHEM	Internationally Peer Reviewed Information on Chemicals
MAPE	mineração artesanal e em pequena escala
MCT	Ministério de Ciência e Tecnologia
n.a.	não se aplica
n.d.	não determinado
OCB	Organização das Cooperativas Brasileiras
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMS	Organização Mundial de Saúde
RPM	rotações por minuto
ton.	tonelada

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Escala ASTM de granulometria em “mesh” 10
Tabela 2. Denominação usual no Brasil do tipo de ouro conforme a granulometria . 11
Tabela 3. Quadro comparativo de alternativas para o uso de mercúrio 73
Tabela 4. Benefícios e desafios associados a implantação de modelos de coexistência entre MAPE e mineração industrial 96
Tabela 5. Etapas de estruturação e implantação de um arranjo de coexistência 98
Tabela 6. Exemplos de projetos de coexistência entre MAPE e mineração industrial 99
Tabela 7. Recomendações de ações no âmbito alternativas técnicas para compor o Plano de Ação Nacional 103

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição de partículas e seu impacto no grau de liberação do ouro 8
Figura 2. Graus de liberação do ouro e necessidade de cominuição prévia à concentração 9
Figura 3. Fluxograma genérico do processo de extração de ouro aluvionar com calhas concentradoras 12
Figura 4. Seção da calha com *rifles* demonstrando a retenção de partículas 16
Figura 5. Exemplo da calha riflada de construção artesanal 17
Figura 6. Exemplo de calha tradicional de construção artesanal 18
Figura 7. Exemplo de calha riflada portátil fabricada em metal 19
Figura 8. Exemplo de calha riflada para uma segunda etapa de concentração desenvolvida por garimpeiros 19
Figura 9. Esquema geral de funcionamento de uma espiral concentradora 21
Figura 10. Calhas espirais trabalhando em conjunto na China 21
Figura 11. Exemplo de espiral concentradora portátil e regulável 22
Figura 12. Ilustração do funcionamento de uma calha estrangulada 23
Figura 13. Esquema de funcionamento de um concentrador cônico Reichert 24
Figura 14. Exemplo de um concentrador cônico Reichert 25
Figura 15. Esquema simplificado de funcionamento de um jigue de crivo 27
Figura 16. Esquema ilustrativo de funcionamento de um jigue 27
Figura 17. Exemplos de jigues comerciais 28
Figura 18. Concentradores centrífugos tipo Knelson e Falcon lado a lado 29
Figura 19. Centrifuga instalada como etapa intermediária de concentração de ouro em garimpo no Mato Grosso. 30
Figura 20. Exemplo de centrífuga helicoidal comercial 32
Figura 21. Esquema de funcionamento de uma mesa concentradora plana. 33
Figura 22. Esquema de funcionamento de uma mesa vibratória 34
Figura 23. Mesa concentradora desenvolvida pela COOGAVEPE e parceiros 35
Figura 24. Representação esquemática de um classificador espiral 36
Figura 25. Exemplo de um classificador espiral 37
Figura 26. Ilustração das partes e do funcionamento e de um hidrociclone 38
Figura 27. Hidrociclone em garimpo 39
Figura 28. Arranjos cicloclassificadores com hidrociclones 40
Figura 29. Arranjo “aranha” de hidrociclones 40
Figura 30. Ilustração detalhada do aeroclassificador Sturtevant Whirlwind 42
Figura 31. Sistema de aeroclassificação da Mineração Heureka, no município de Nossa Senhora do Livramento 44
Figura 32. Rifles de minério de ferro formados na placa Cleangold 46
Figura 33. Calha Cleangold portátil 47
Figura 34. Minerador artesanal preparando placa mercurizada na Nicarágua 48
Figura 35. Placas de cobre eletrorevestidas de prata usadas para remoção de mercúrio de solos na Colômbia 49
Figura 36. Liberação do ouro encapsulado por meio de microondas 50
Figura 37. Equipamento de micro-ondas utilizado para a recuperação de ouro 51
Figura 38. Reator de lixiviação tipo Pelicano 56
Figura 39. Estrutura química da alfa-ciclodextrina e aspectos do seu uso experimental para recuperação de partículas de ouro 60
Figura 40. Processamento de ouro com bórax no norte das Filipinas 63

Figura 41. Aspectos físico-químicos, microbiológicos e minerais envolvidos na biolixiviação 64
Figura 42. Processo tradicional de uso de seiva de pau-de-balsa. 67
Figura 43. Equipe do Projeto Ochroma em ação de capacitação comunitária.....68
Figura 44. Pesquisa da EMBRAPA para melhoramento de matrizes de pau-de-balsa, em SINPOP/MT.....69
Figura 45. Faixa granulométrica de eficiência de processo físicos para concentração ou recuperação de ouro 79
Figura 46. Faixa granulométrica de eficiência de processos químicos, biológicos e de pirometalurgia para recuperação de ouro.....80
Figura 47. Fluxograma simplificado de melhoria de operação da MAPE de ouro para a redução do uso de mercúrio.....92
Figura 48. Exemplo de arranjo de coexistência entre mineradores da MAPE e empresas de mineração industrial.....97

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS iii
RESUMO iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS v
LISTA DE TABELAS vi
LISTA DE FIGURAS vii
1. INTRODUÇÃO 1
2. OBJETIVO 4
3. METODOLOGIA 5
4. REFERENCIAL TEÓRICO 6
4.1. Noções Gerais Sobre o Processamento Mineral do Ouro 6
4.1.1. Grau de liberação do ouro 7
4.1.2. Granulometria do ouro 10
4.2. Fluxo Genérico Para Processamento de Ouro Adotado pela MAPE no Brasil 11
4.3. Eficiência do Uso de Mercúrio na Recuperação de Ouro 12
5. POTENCIAIS ALTERNATIVAS PARA OTIMIZAR A CONCENTRAÇÃO E A RECUPERAÇÃO DO OURO 14
5.1. Processos Físicos 14
5.1.1. Equipamentos de concentração gravítica 14
5.1.1.1. Calhas concentradoras 15
5.1.1.2. Calha concentradora espiral 20
5.1.1.3. Calhas estranguladas e cones Reichert 23
5.1.1.4. Jigues 25
5.1.1.5. Concentradores centrífugos 28
5.1.1.6. Centrífuga horizontal Younge 31
5.1.1.7. Centrífugas helicoidais 31
5.1.1.8. Mesas concentradoras 33
5.1.1.9. Classificadores espirais 36
5.1.1.10. Hidrociclones 38
5.1.1.11. Aeroclassificador 41
5.1.2. Separação magnética e eletrostática 45
5.1.3. Placas magnetizadas Cleangold 45
5.1.4. Placas amalgamantes (placas mercurizadas) 47
5.1.5. Liberação do ouro refratário por microondas 50
5.2. Processos Químicos 52
5.2.1. Lixiviação por cianetação 52
5.2.2. Lixiviantes alternativos ao cianeto 56
5.2.2.1. Tioureia 56
5.2.2.2. Tiossulfato 57
5.2.2.3. Tiocianato 58
5.2.2.4. Haletos 59
5.2.2.5. Lixiviantes patenteados alternativos ao cianeto 59
5.2.3. Lixiviação assistida com alfa-ciclodextrina 60
5.2.4. Lixiviação assistida por aminoácidos (glicina) 61
5.3. Processos Pirometalurgicos 62
5.3.1. Pirometalurgia com bórax 62
5.4. Processos Biotecnológicos 63
5.4.1. Biolixiviação, biooxidação ou lixiviação bacteriana 63
5.4.2. Lixiviação com uso de plantas cianogênicas 65

5.4.3. Bioextrator elaborado com extrato de pau-de-balsa....66
5.5. Nanotecnologia....70
5.6. Quadro Comparativo entre as Alternativas Potenciais....72
6. ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS PARA A REDUÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DO USO DE MERCÚRIO....81
6.1. Abordagem Tecnológica....81
6.2. Desafios da Abordagem Tecnológica....82
6.2.1. Desafios técnicos....83
6.2.2. Desafios organizacionais....85
6.2.3. Desafios econômicos....87
6.3. Escolha da Alternativa para Redução ou Substituição do Uso de Mercúrio....89
6.4. Implementação de Estratégias Técnicas para Redução ou Eliminação do Uso de Mercúrio na MAPE....90
6.5. Coexistência Como uma Alternativa Potencial de Acesso a Recursos Para Redução Ou Eliminação do Uso de Mercúrio....93
6.5.1. Modalidades de coexistência na MAPE de ouro....95
6.5.2. Benefícios e desafios da coexistência....96
6.5.3. Implementação de modelos de coexistência....97
6.5.4. Exemplos de arranjos de coexistência....98
6.5.5. Análise....102
7. RECOMENDAÇÕES....103
8. CONSIDERAÇÕES FINAIS....106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS....108

1. INTRODUÇÃO

Apesar de notoriamente danosa para o ambiente, comunidades de entorno e principalmente para os próprio mineradores, a amalgamação com mercúrio é amplamente utilizada pela da mineração artesanal e em pequena escala (MAPE) de ouro em todo o planeta devido a sua simplicidade, baixo custo e eficiência relativa (em especial quanto a rapidez da separação do metal precioso), mesmo consideradas as dificuldades crescentes de obtenção do insumo em decorrência da repressão à importação clandestina do metal e os riscos ambientais e econômicos envolvidos.

Para reduzir o uso de mercúrio nessa atividade, intervenções financiadas pelos governos e por doadores privados, promoveram, nas últimas décadas, a busca de soluções tecnológicas destinadas a fornecer alternativas ao processo de amalgamação (KEANE et al., 2023). De acordo com o Banco Mundial (2020 apud KEANE et al., 2023), os primeiros programas de eliminação de mercúrio pela MAPE de ouro foram implementados nas décadas de 1980 e 1990 e, a partir daí, foram levantadas e identificadas inúmeras tecnologias sem mercúrio; no entanto, a revisão da literatura feita por KEANE et al. (2023) mostra pouca documentação abordando a aplicabilidade para a MAPE de ouro em termos de eficiência, desafios e lacunas.

A razão histórica para essa lacuna de conhecimento da humanidade é que a grande maioria dos estudos viando avanços técnicos na segurança operacional e ambiental da produção de ouro foi enfocada na grande mineração e geraram soluções a priori inviáveis para a MAPE em função da menor capacidade de investimento dos garimpeiros, dificuldade de adaptação a métodos de maior complexidade e, principalmente, da mobilidade intrínseca da atividade, que diferente da produção industrial, caracteriza-se por em regra esvair os depósitos explorados em poucos meses ou no máximo alguns anos.

Apenas recentemente — basicamente a partir da primeira década do Século XX — as especificidades da MAPE de ouro começaram a ser seriamente consideradas para a busca de soluções compatíveis, em decorrência da constatação de que a atividade é a maior contribuinte individual para o incremento da contaminação global por mercúrio e a conscientização de que as milhões de pessoas

ao redor do planeta que a ela se dedicam e que dela dependem de seu sustento, não teriam condições de sozinhas buscarem alternativas técnicas.

Para atender a MAPE de ouro no planeta em geral e em específico no Brasil, as eventuais alternativas tecnológicas ao uso mercúrio devem ser amplamente disponibilizáveis, econômica acessíveis, de fácil implementação e operação, com demanda reduzida de energia (pois em muitos casos esta é dependente de geração isolada a partir de geradores termoelétricos móveis a diesel), custo operacional baixo, logística de insumos viável e com atributos de mobilidade. Além disso, cada potencial alternativa deve considerar as limitações de treinamento para seu uso e considerar a tradição de transmissão oral e informal de conhecimento, que tendem a causar certas distorções em determinados aspectos, por vezes críticos, para a segurança ou eficiência da operação.

Uma primeira geração das possíveis soluções e caracteristicamente composta por adaptações em menor escala de tecnologias e metodologias usadas na mineração industrial e padeceram da característica falta de capacitação dos mineradores artesanais em todo mundo, que sequer tinham conhecimento dos vários equipamentos existentes que poderiam aumentar a eficiência do seu trabalho e a reduzir a dependência do mercúrio, aliada a inacessibilidade dessas alternativas decorrente da inexistência de oferta local de tais equipamentos, já que a atividade se desenvolve normalmente nas regiões mais isoladas de países com economias restritas e frágeis.

Emergiu daí a constatação de que, além de todas os aspectos anteriormente listados, as alternativas para promover a redução de mercúrio na MAPE de ouro tem que ser replicáveis localmente ou dispor de cadeias de fornecimento eficientes para essas condições de isolamento físico e econômico.

Nos últimos anos, por consequência, os esforços para construção de alternativas enfocaram mais em soluções de substituição direta do mercúrio, por meio de substâncias que pudessem prover uma substituição mais ou menos direta.

Apesar do desafio imposto pela já mencionada lacuna de informações em muitos casos, no presente volume busca-se fornecer uma visão geral do cenário de tecnologias de processamento de ouro que dispensam o uso de mercúrio[1], partindo

[1] Alternativas para redução do uso de mercúrio dentro do contexto das técnicas atuais utilizadas na MAPE de ouro do Brasil são discutidas no volume de diagnóstico operacional.

de um subsídio inicial de conceitos necessários para uma melhor compreensão do conteúdo desenvolvido, para a partir daí apresentar as alternativas identificadas na literatura especializada, ainda que duvidosas, analisando-as em termos de desempenho técnico, complexidade, potencial aplicabilidade e desafios de implementação associados, para o fim de identificar as opções mais promissoras que a curto ou médio prazo poderiam progressivamente substituir o uso de mercúrio na MAPE de ouro no contexto Brasileiro, e assim subsidiar estudos complementares e investimentos futuros.

Adicionalmente, ao final, são feitas algumas considerações sobre as estratégias de implementação que poderiam apoiar a introdução das tecnologias escolhidas.

2. OBJETIVO

Identificar e descrever as alternativas técnicas existentes para substituição do uso de mercúrio na MAPE de ouro; avaliar a respectiva adequação em termos de disponibilidade, acessibilidade econômica, viabilidade operacional, segurança operacional e ambiental, equivalência ou superioridade ao uso de mercúrio em termos de fluxo de processamento e taxas de recuperação de ouro dentro do contexto mineralógico nacional; hierarquizar tais alternativas em termos de implementabilidade dentro do cenário nacional; e propor estratégias e recomendações que facilitem tal implementação, com vistas a subsidiar a elaboração o Plano Nacional de Ação para a MAPE de Ouro na eleição das melhores estratégias para redução e progressiva eliminação do uso de mercúrio nessa atividade.

3. METODOLOGIA

O presente trabalho foi elaborado a partir do levantamento amostral da literatura técnica disponível para identificar estudos técnicos relacionados à aplicação de alternativas ao uso mercúrio na MAPE de ouro, com ênfase na identificação de experiências de sucesso, complementada por visitas de campo a locais em que estivessem sendo desenvolvidas ou testadas alternativas dessa natureza.

A abordagem utilizada levou em conta questões consideradas essenciais para a avaliação dessas alternativas, que foram estruturadas com base na proposta dos estudos de GRAYSON (2007) e KEANE et al. (2023).

4. REFERENCIAL TEÓRICO

4.1. NOÇÕES GERAIS SOBRE O PROCESSAMENTO MINERAL DO OURO

Diferentemente de épocas passadas em que o ouro ocorrente se apresentava na forma de grandes pepitas que poderiam ser facilmente separadas de modo manual após simples bateamento do cascalho, no mundo contemporâneo os depósitos remanescentes se mostram cada vez mais dependentes de processos complexos de processamento mineral, para a obtenção do metal precioso.

Em linhas gerais e didáticas, sem prejuízo de abordagens formalmente melhores das disciplinas da Engenharia de Minas, podemos estabelecer que o processamento mineral se inicia com a preparação do minério, que pode se restringir a simples homogeneização das partículas a um tamanho adequado às etapas subsequentes (adequação granulométrica) ou envolver estágios de concentração onde as propriedades diferenciadoras entre o ouro e os minerais a ele associados e a ganga — usualmente a diferença de densidade e de hidrofobicidade (natural ou induzida) — serão utilizados para a separação das partículas livres ou continentes de ouro das demais (PERES et al., 2002).

A preparação pode abranger etapas de britagem[2], peneiramento[3], cominuição[4] e classificação[5], tudo dependendo do minério que se apresenta e da economicidade de cada uma dessas fases no contexto específico.

Uma vez que o minério foi submetido à redução de tamanho, promovendo a liberação adequada dos seus minerais, é possível passar a etapa de concentração mineral propriamente dito, no qual será realizada a separação das espécies minerais, gerando matéria-prima com teor da substância mineral desejada em teor adequado para sua comercialização.

---

[2] Britagem: fragmentação bruta progressiva dos blocos obtidos na lavra gerando blocos menores até o ponto de gerar um material homogêneo, mas ainda grosseiro, que possa ser cominuído de modo eficiente.

[3] Peneiramento: método de separação física de materiais baseado no tamanho geométrico desigual de suas partículas, por meio de peneiras individuais ou progressivas, com abertura de malha adequada.

[4] Cominuição: operação de “fragmentação fina” (pulverização) do minério, visando gerar partículas adequadas a processos eficientes de concentração e separação; pode resultar em partículas na ordem de micrometros e promover a liberação do minério (PERES et al., 2002; LUZ e LINS, 2010).

[5] Classificação: método de separação física de materiais baseado na velocidade de transporte de suas partículas em um meio fluído líquido ou gasoso (água ou ar, por exemplo), diretamente ligada a densidade do material ou sua resistência de deslocamento ao meio.

Podemos considerar a concentração como a operação inicial do processo de separação da matéria prima mineral objetivando aumentar o teor do minério de interesse no material processado, gerando um “concentrado” com a finalidade de aumento geral de eficiência com redução significativa do uso de insumos para a etapa seguinte de recuperação, que será, neste contexto, a operação “refinada” de segregação da substância mineral desejada (no caso o ouro), dos contaminantes ainda contidos do concentrado (ganga). Opta-se por separar a “concentração” da “recuperação” porque a adequação e eficiência da primeira operação é essencial para a MAPE de ouro, pois é essencial para reduzir as perdas de metal precioso (com consequente aumento de rentabilidade da atividade), e para, principalmente, reduzir o consumo de mercúrio[6] e consequentemente os riscos e efeitos de emissão e liberação do metal tóxico.

LUZ e LINS (2010) citam que as propriedades físicas, químicas e físico-químicas dos materiais, tais como massa específica (ou densidade), suscetibilidade magnética, condutividade elétrica, química de superfície, cor, radioatividade, forma, etc. permitem a sua separação seletiva. Em termos de técnicas de separação, isso resultará em métodos gravíticos, amalgamantes, eletrostáticos, magnéticos, de flotação, de lixiviação, térmicos, dentre outros[7].

Após a separação, usualmente a matéria-prima mineral é comercializável — como ocorre com o ouro oriundo da queima do amálgama (doré). Entretanto, é possível acrescentar ao conceito de processamento mineral do ouro a etapa de purificação (usualmente feita nas casas de compra ou nos laboratórios vinculados às instituições financeiras), na qual metais contaminantes em pequena proporção são removidos para gerar ouro com o máximo de pureza (99,99%), também conhecido como ouro 24 K (quilates).

4.1.1. GRAU DE LIBERAÇÃO DO OURO

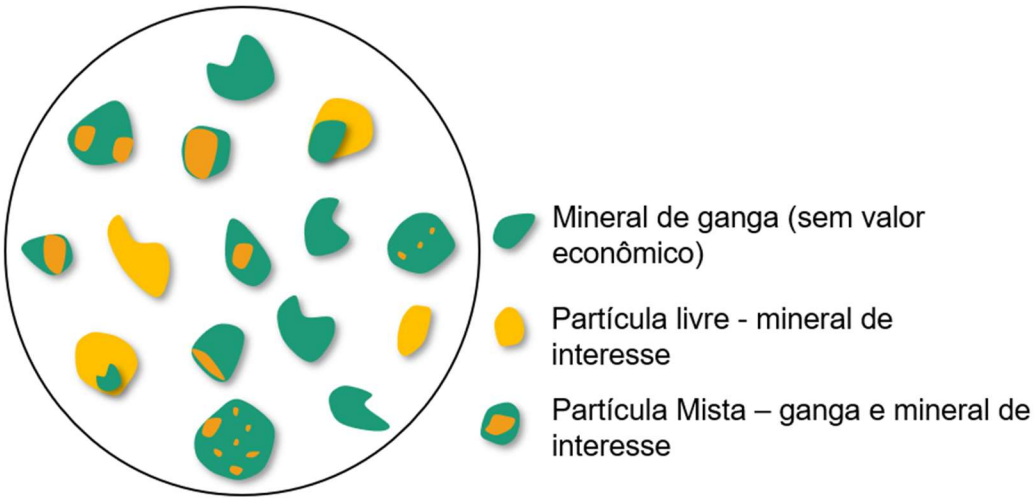
O ouro é encontrado nos minérios em teores da ordem de algumas g/ton., associado a diversos minerais, comumente na forma metálica em ligas com a prata e metais do grupo da platina (GRANATO, 1986). A definição da rota tecnológica para o

[6] Segundo MARTINEZ et al. (2021), processos de concentração consorciados podem reduzir a massa a ser amalgamada a 0,1% do volume do mineral bruto.
[7] Essas técnicas podem sofrer classificações diversas, por exemplo segundo a rota de processo metalúrgico.

tratamento dos minérios visando a extração do ouro, inclui fatores econômicos e técnicos, destacando-se as características mineralógicas da matriz e algumas propriedades físicas e químicas do metal, que, em última instância, delimitam o conjunto de operações passíveis de utilização no processamento (GRANATO, 1986).

O nível de separação entre as partículas de ouro e os minerais associados é designado como grau de liberação, é um primeiro fator importante para a escolha do tipo de concentração a ser adotado (LINS, 1992). Sua avaliação é feita a partir de técnicas específicas, como por exemplo a microscopia eletrônica de varredura (MEV), análise que ajuda a determinar o tamanho das partículas liberadas e o grau de liberação do ouro. A Figura 1 ilustra graficamente as possibilidades de apresentação das partículas de ouro em termos de liberação, sinteticamente classificadas como partículas livres de ouro, partículas continentes de impurezas (ganga) no seu interior, partículas contidas no interior de grânulos de impureza e partículas ligadas a impurezas, mas que possuem superfícies livres.

Figura 1. Distribuição de partículas e seu impacto no grau de liberação do ouro



Fonte: Elaborado pelos autores.

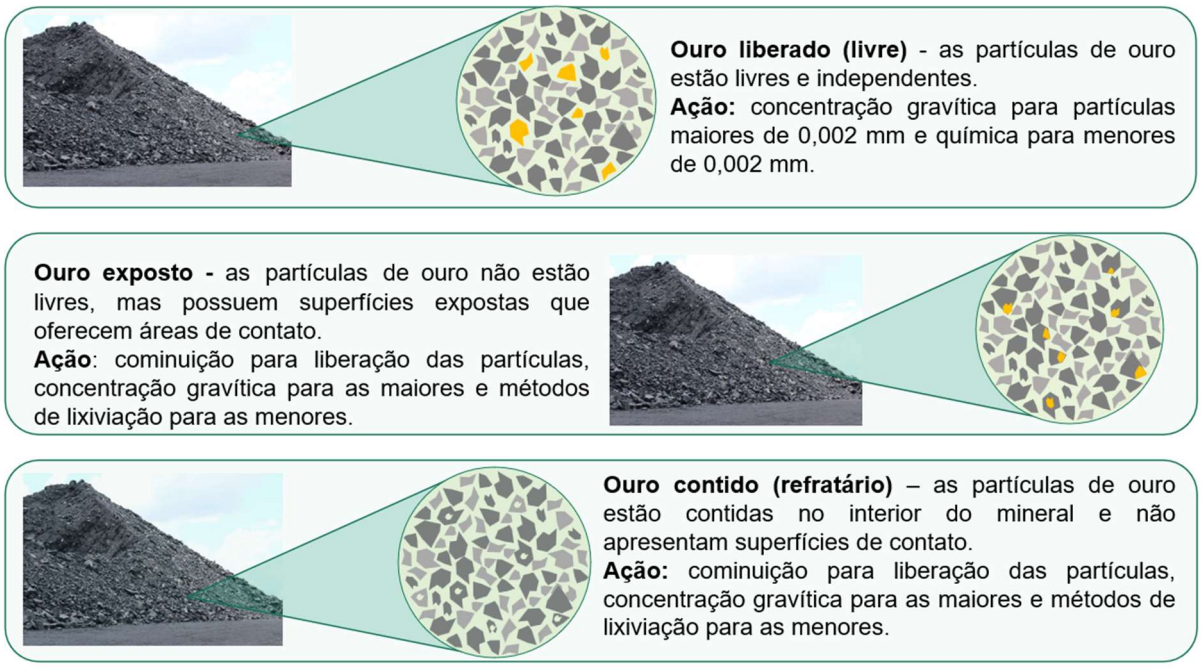
A partir do conhecimento do grau deliberação do ouro, poderá ser definida a técnica mais adequada para sua separação. Neste sentido, por exemplo, depósitos contendo ouro livre — como os depósitos aluvionares que eram largamente encontrados na maioria das regiões garimpeiras tradicionais do Brasil nos anos 1970-1990 — podem ser geralmente concentrados e separados por métodos gravíticos, aproveitando a maior densidade do ouro em relação ao material não interessante.

Minérios apresentando predominância de partículas de ouro ligada à ganga, mas com superfícies livres (superfícies de contato) — como geralmente ocorre em depósitos eluvionares e coluvionares) — podem até ser passíveis de concentração gravítica posterior a uma etapa prévia de cominuição (moagem) que seja capaz de causar a sua liberação, mas podem ser necessários processos físicos, químicos ou bioquímicos para atingir a liberação do ouro.

Já os minérios que contém o ouro encapsulado — que constituem o chamado ouro refratário típico de jazidas primárias — irão requerer sempre um processo de liberação, ainda que parcial, que permita sua posterior separação pelos métodos disponíveis. Logo, a cominuição prévia é essencial neste tipo de mineralização.

Uma síntese da relação entre o grau de liberação de ouro e a necessidade de cominuição prévia é apresentada na Figura 2 a seguir:

Figura 2. Graus de liberação do ouro e necessidade de cominuição prévia à concentração



Fonte: elaborado pelos autores.

4.1.2. GRANULOMETRIA DO OURO

Outro fator essencial para a definição do método de processamento mais eficiente para a produção de ouro é o tamanho médio das partículas ocorrentes no depósito, referido como granulometria. Este parâmetro é tradicionalmente determinado e controlado por meio de peneiramento e permite avaliar a efetividade do uso de determinados equipamentos e processos (como será visto no decorrer deste trabalho).

Devido ao método de determinação, a granulometria é geralmente referida em uma escala progressiva “mesh” (malhas), expresso com o símbolo “#” — referindo-se ao número de fios da peneira — que tem sua equivalência em milímetros e polegadas expressa na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1. Escala ASTM de granulometria em “mesh”

Malhas da Peneira	Tamanho máximo das partículas passantes	
Mesh (#)	Polegadas (in.)	mm
18	0,0394	1,0000
20	0,0331	0,8410
25	0,0278	0,7070
30	0,0234	0,5950
35	0,0197	0,5000
40	0,0165	0,4200
45	0,0139	0,3540
50	0,0117	0,2970
60	0,0098	0,2500
70	0,0083	0,2100

Malhas da Peneira	Tamanho máximo das partículas passantes	
Mesh (#)	Polegadas (in.)	mm
80	0,0070	0,1770
100	0,0059	0,1490
120	0,0049	0,1250
140	0,0041	0,1050
170	0,0035	0,0880
200	0,0029	0,0740
230	0,0025	0,0630
270	0,0021	0,0530
325	0,0017	0,0440
400	0,0015	0,0370

Fonte: elaborado pelos Autores.

Segundo SANTOS E BRAGA (2010), existem várias classificações conceituais baseadas na granulometria de ouro, variáveis conforme local e época. Segundo os costumes predominantes no Brasil, essa classificação pode ser expressa segundo a Tabela 2 a seguir:

Tabela 2. Denominação usual no Brasil do tipo de ouro conforme a granulometria

Denominação do tipo de Ouro	Faixa de peneiramento (mesh)	Faixa de Tamanho (mm)
Grosseiro	até 35	> 0,500
Médio	35 – 100	0,500 – 0,149
Fino	100 – 270	0,149 – 0,053
Ultrafino	Maior que 270	< 0,053

Fonte: elaborado pelos Autores baseados em SANTOS E BRAGA (2010).

A título de comparação, o menor tamanho usualmente visível a olho nu para o ser humano é de cerca de 0,1 mm (100 µm), o que significa que não conseguimos enxergar partículas classificadas acima de 140 mesh. Por outro lado, 200 mesh é usualmente considerado o limite de eficiência da maioria dos equipamentos concentradores gravíticos e da própria amalgamação por mercúrio.

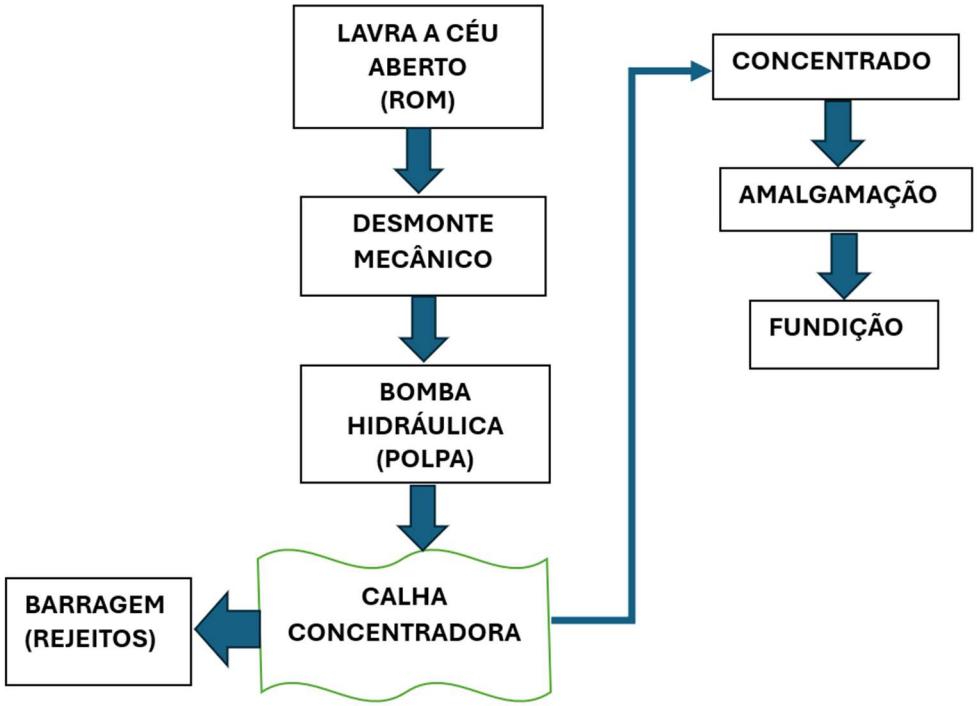
4.2. FLUXO GENÉRICO PARA PROCESSAMENTO DE OURO ADOTADO PELA MAPE NO BRASIL

O processamento mineral de ouro no Brasil apresenta uma significativa variedade de fluxos como resultado da consolidação de práticas costumeiras diferenciadas, ritmos de evolução operacional distintos e realidades mineralógicas diferenciadas entre as diversas regiões garimpeiras, inclusive em decorrência da migração da extração do minério secundário para as jazidas primárias em alguns locais. As variadas técnicas que compõem essa diversidade de fluxos são objeto de análise aprofundada no volume de diagnóstico operacional da MAPE, mas, para fins meramente ilustrativos, é importante resgatar o procedimento mais genérico.

A amalgamação com mercúrio seguida da decomposição térmica do amálgama é o método de recuperação de ouro ainda mais largamente usado no país, em que pese já existam exemplos relevantes de aplicação da lixiviação com uso de cianeto de sódio e algumas outras técnicas.

Como fluxograma genérico do processo mais tradicional de extração de ouro aluvionar no Brasil, podemos adotar o que foi apresentado no recente trabalho de SOBRADIEL e GOMES (2021), exposto na Figura 3 a seguir:

Figura 3. Fluxograma genérico do processo de extração de ouro aluvionar com calhas concentradoras



Fonte: SOBRADIEL e GOMES (2021)

4.3. EFICIÊNCIA DO USO DE MERCÚRIO NA RECUPERAÇÃO DE OURO

O uso de mercúrio para amalgamação é uma solução simples, rápida, economicamente viável e relativamente eficiente para recuperação de ouro de depósitos secundários e primários, após processos de preparação simples (eventualmente nenhum), o que a torna atraente para os mineradores artesanais mesmo diante da baixa recuperação e dos danos causados à saúde dos próprios mineradores, dentre outros.

O grau de eficiência deste método é altamente influenciado pelo grau de liberação do ouro e pela sua granulometria, assim como pela presença de

contaminantes que encapsulam o ouro (óleos lubrificantes, graxas, óleos combustíveis, material orgânico), ou que aderem ao mercúrio (argilas, talco, grafite), e pela própria proporção insuficiente ou excessiva de mercúrio em relação ao material a ser tratado.

A amalgamação é ineficiente quando as partículas de ouro estão inclusas dentro de grumos de outra substância (como ocorre em minérios sulfetados) e quando as partículas de ouro parcialmente incrustradas apresentam superfícies de contato muito pequenas, ou ainda quando estas estão recobertas com capas de óxidos ou hidróxidos geradas pelo intemperismo. O método também é incapaz de capturar partículas menores que 0,74 mm (200 mesh)[8].

A quantidade de variáveis que não são controladas em operações artesanais, e o próprio uso de métodos empíricos onde planejamento e controles técnicos não existem, causa uma grande variabilidade no grau de eficiência da amalgamação com mercúrio para a recuperação de ouro. Neste projeto, por exemplo, os resultados dos balanços metalúrgicos em concentrados de minérios aluvionares e coluvionares, amalgamados se apresentam em uma faixa de eficiência média de recuperação de ouro de 42,5% a 48,8% (vide volume de diagnóstico de aspectos operacionais). Comparativamente, HYLANDER et al. (2007), VEIGA et al. (2009), CORDY et al. (2011) e VERBRUGGE et al. (2021) (apud PELIZARI e MESQUITA, 2023) reportam graus de eficiência de recuperação de ouro na faixa de 25% a 35% quando todo o minério é amalgamado.

Comparados a processos mais sofisticados hoje usados pela indústria, as taxas de recuperação do método de amalgamação, ainda que realizadas sobre o concentrado, continuam pífias, o que certamente fornece uma larga margem para convencimento dos mineradores. Se o fato de que não existem níveis seguros de exposição ao mercúrio e os danos crônicos à saúde dos mineradores, que efetivamente ocorrerão, não é suficiente para demover a MAPE de aceitar este risco, certamente a demonstração de que métodos mais elaborados e responsáveis podem chegar a dobrar a produção e seus rendimentos, será, com certeza, decisiva para apoiar o rápido abandono do uso do metal tóxico.

[8] Estima-se que os depósitos de ouro aluvionar remanescentes no Brasil são todos constituídos de ouro ultrafino (>200 mesh), o que faz a eficiência da amalgamação com mercúrio um método atualmente ineficiente para as condições brasileiras.

5. POTENCIAIS ALTERNATIVAS PARA OTIMIZAR A CONCENTRAÇÃO E A RECUPERAÇÃO DO OURO

5.1. PROCESSOS FÍSICOS

Os processos utilizados nas frentes de lavra pela MAPE de ouro desempenham um papel crucial na extração do minério, especialmente em operações de pequeno porte e aquelas informais, características comuns em diversas regiões do Brasil. Esses métodos baseiam-se na separação mecânica e gravítica, aproveitando as propriedades físicas do ouro, como sua alta densidade e resistência à oxidação, para isolá-lo de materiais menos densos.

Entre as técnicas mais empregadas estão o desmonte manual ou mecanizado de solos e rochas, seguido do peneiramento e da concentração gravítica, como a utilização de bateias, calhas concentradoras e mesas vibratórias. Esses métodos, embora eficientes em termos de custo e simplicidade, muitas vezes apresentam desafios ambientais e sociais, como a contaminação de cursos d'água e os impactos na saúde dos trabalhadores. Compreender esses processos é essencial para promover práticas mais sustentáveis e responsáveis na MAPE de ouro.

Os principais tipos de equipamentos utilizados nesses processos são descritos neste item, seguidos de considerações sobre sua efetividade e custo-benefício, sempre que possível.

5.1.1. EQUIPAMENTOS DE CONCENTRAÇÃO GRAVÍTICA

A concentração gravítica pode ser definida como um processo no qual partículas de diferentes densidades, tamanhos e formas são separadas uma das outras por ação da força de gravidade, de forças centrífugas ou de ambas. É uma das mais antigas formas de processamento mineral (LINS, 2010).

Trata-se de uma técnica amplamente utilizada em garimpos para separar partículas de ouro com base em suas diferenças de densidade em relação ao material bruto. Além das calhas, existem diversos equipamentos que empregam esse princípio, variando em complexidade, custo e eficiência.

Equipamentos de concentração gravítica de finos baseiam-se em vários mecanismos, sendo que sua limitação implica que os equipamentos que usam apenas

este princípio apresentam capacidade muito baixa (LINS, 2010). Para mineradores em pequena escala, o investimento inicial baixo é uma vantagem, mas há necessidade de capacitação e uso de equipamentos complementares para maximizar a recuperação de ouro, principalmente em regiões como a Amazônia brasileira (LINS, 2010).

MARTINEZ et al. (2021) destacam que a concentração por gravidade pode reduzir a quantidade de material a ser amalgamado ou tratado térmica ou quimicamente para extrair ouro de concentrados, e que, em casos muito raros e específicos, esta pode ser uma solução para reduzir definitivamente, mas não eliminar completamente, a utilização de mercúrio na MAPE de ouro.

A eficiência dos equipamentos de concentração gravítica depende de uma variedade de fatores como taxa de alimentação, faixa granulométrica, porcentagem de sólidos, dentre outros. O desempenho de qualquer deles está relacionado com a adequada escolha e controle dos fatores anteriormente citados, dentro de resultados aceitáveis de recuperação e enriquecimento.

A otimização do uso dessas tecnologias, acompanhada por capacitação técnica contínua e eventual acesso ao crédito para sua viabilização operacional, pode promover uma MAPE de ouro com o uso reduzido ou livre de mercúrio. Daí a importância de revisitar alguns equipamentos já em uso em maior ou menor amplitude na MAPE, mas que podem ser objeto de aperfeiçoamentos técnicos e operacionais com resultados significativos.

5.1.1.1. Calhas concentradoras

As calhas concentradoras (*sluices*) são equipamentos amplamente utilizados em garimpos para o tratamento de materiais como cascalho, areia e saibro, sendo essenciais na separação de partículas de ouro do material bruto[9].

Constitui-se de uma estrutura geralmente feita de madeira ou metal formada de um canal inclinado (calha), de seção transversal retangular, cujo fundo apresente certa resistência ao fluxo de água, causando a retenção das partículas mais pesadas (incluindo o ouro) na base resistente ao fluxo e o carreamento da parcela leve (de lama e areia) pelo fluxo livre (LINS, 2010). Originalmente o dispositivo era equipado

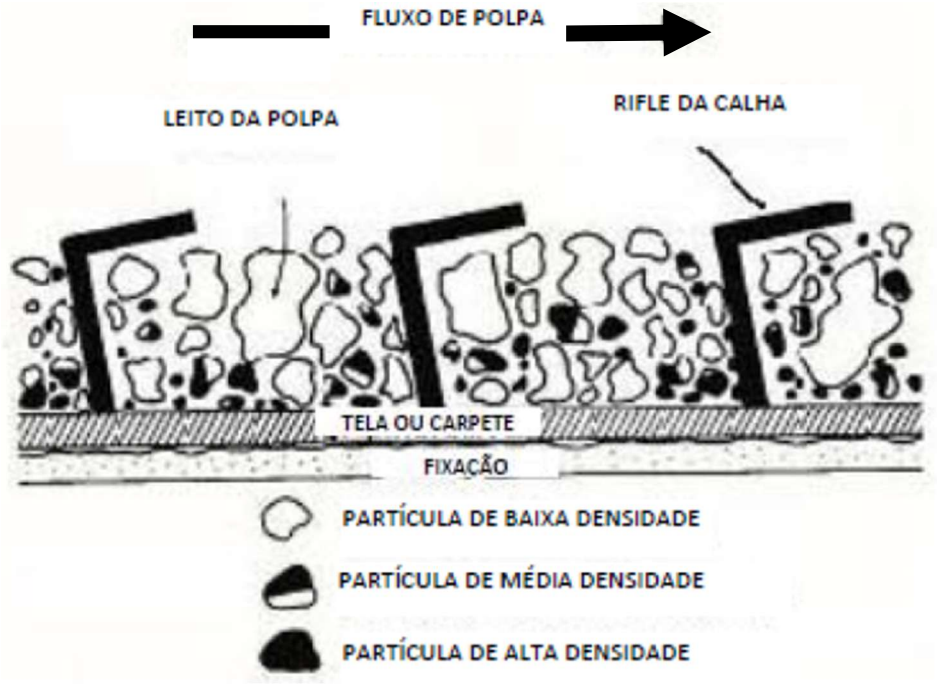
[9] O uso desse equipamento já era disseminado no século XVI.

com trastes transversais (conhecidos como *riffles*), que com o tempo foram substituídos ou complementados por tecidos, fibras, borrachas estriadas e, atualmente, carpetes e malhas metálicas recobrindo o fundo da calha.

Embora não sejam mais tão comuns, a adição de *riffles* ou barras transversais cria zonas adicionais de turbulência para melhorar a retenção de partículas de ouro de maior granulometria e pode apresentar ganhos significativos de eficiência em relação ao uso apenas de carpetes.

Na Figura 4 é ilustrado como as partículas de alta densidade ficam retidas nos "riffles" e no carpete e as Figuras 5 "a"-"d" apresentam aspectos de uma versão artesanal desse equipamento:

Figura 4. Seção da calha com *rifles* demonstrando a retenção de partículas



Fonte: Santos e Braga, 2010.

Figura 5. Exemplo da calha riflada de construção artesanal

Foto: Oswaldo Menta Simonsen Nico.

O processo se inicia com a alimentação de minério sob a forma de polpa diluída em uma caixa receptora na parte superior do equipamento (por isso também é conhecido como *sluice box*), com a água em fluxo contínuo, causando a sedimentação das partículas pesadas ao longo do leito da calha, enquanto as leves são carregadas pela água. Periodicamente o processo é interrompido para a remoção do material retido (concentrado), que poderá sofrer novos processos de concentração ou ser diretamente enviado à separação, conforme as circunstâncias.

Diversas variáveis estão envolvidas na operação deste equipamento, já que sua eficiência está ligada a adequação da velocidade diferencial entre as partículas da parcela a ser concentrada e aquela da parcela a ser carreada, que pode ser

influenciada tanto pela densidade das substâncias, como pelo tamanho das partículas e pela velocidade do fluxo de água, por exemplo. Na MAPE, tais fatores são avaliados com base na experiência, e fatores como inclinação, dimensões da calha, e velocidade de alimentação da polpa são ditados pelas habilidades individuais.

SOBRADIEL e GOMES (2021), em estudo sobre o uso de calhas na região de Peixoto de Azevedo/MT, observaram que o equipamento possui boa eficiência apenas para partículas até 60 mesh (0,25 mm), apresentando inconsistência para a captura de partículas abaixo desta granulometria e nenhuma efetividade abaixo de 100 mesh (0,149 mm), resultando em perdas significativas de ouro. Logo, de acordo com esses autores, trata-se de um método barato e de fácil manuseio, mesmo que represente, muitas vezes, uma baixa recuperação.

Os custos de implementação são baixos até porque podem ser feitas a partir de materiais facilmente encontráveis na natureza. Modelos comerciais são ainda considerados baratos, dependendo dos materiais. Os custos operacionais são baixos, principalmente em áreas com fácil acesso de água.

Existem inúmeras variações deste dispositivo, de modelos artesanais (Figura 6), a equipamentos portáteis para micro-operações (Figura 7), e até modelos elaborados para uma segunda etapa de concentração para obtenção de um concentrado mais refinado, com maior teor de ouro (Figura 8).

Figura 6. Exemplo de calha tradicional de construção artesanal

Foto: Carlos Henrique Xavier Araujo.

Figura 7. Exemplo de calha riflada portátil fabricada em metal

Foto: Carlos Henrique Xavier Araujo.

Figura 8. Exemplo de calha riflada para uma segunda etapa de concentração desenvolvida por garimpeiros

Foto: Matheus Felipe Pfeifer/COOGAVEPE, 2024.

5.1.1.2. Calha concentradora espiral

Neste dispositivo, o plano de escoamento da calha tem o formato de uma espiral descendente de seção transversal semicircular, e a resistência inercial ao fluxo curvilíneo causa um efeito centrífugo gradiente inversamente proporcional à densidade das partículas que separa o ouro do material bruto. Muito embora sejam comercializadas espirais com características diferentes − diâmetro, perfil do canal e modo de remoção do concentrado − conforme o fabricante e o fim a que se destina, os mecanismos de separação atuantes são similares (LINS, 2010).

Na alimentação a velocidade da polpa varia de zero, na superfície do canal, até um valor máximo na interface com o ar, devido ao escoamento laminar, e o resultado final é que no plano vertical, os minerais pesados estratificam-se na superfície do canal, com baixa velocidade, e os minerais leves tendem a estratificar-se na parte superior do fluxo, nas regiões de maiores velocidades (LINS, 2010).

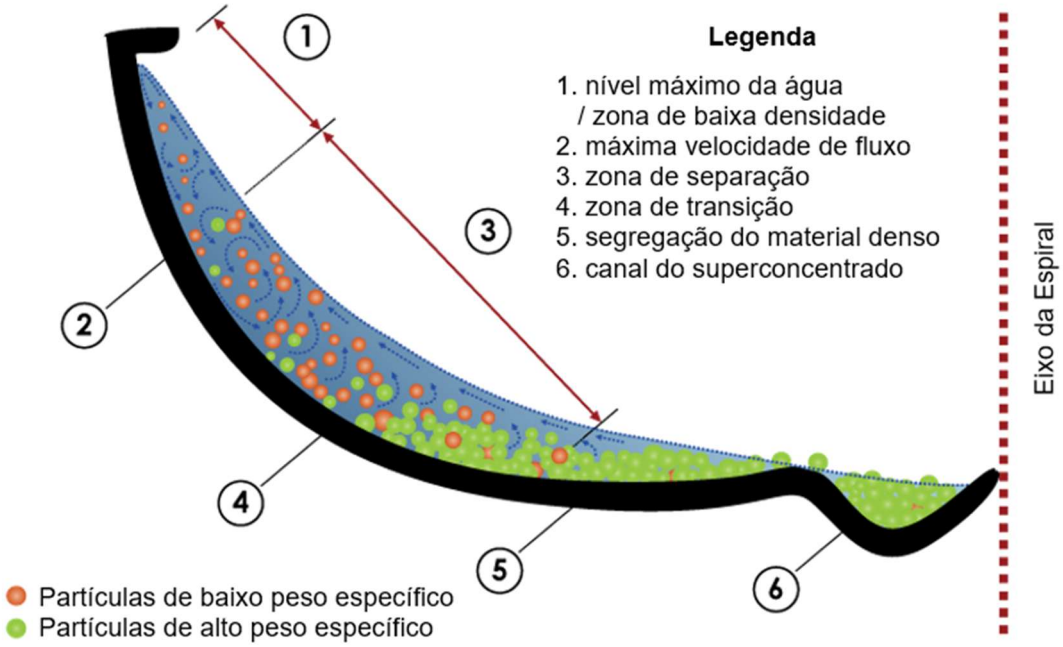
A trajetória helicoidal causa também um gradiente radial de velocidade no plano horizontal, que tem um efeito menor na trajetória dos minerais pesados e substancial na dos minerais leves, que devido à força centrífuga, tendem a ter uma trajetória mais externa (LINS, 2010).

A resultante desses mecanismos é a possibilidade de se remover os minerais pesados por meio de algumas aberturas reguláveis existentes na parte interna do canal (LINS, 2010).

Similarmente as calhas retilíneas, podem apresentar tamanhos variados (de grande escala a portáteis), mas diferem, em qualquer caso, pela vantagem de dispensar o uso de carpetes ou superfícies resistentes aos movimentos (uma maior velocidade de fluxo pode ser, inclusive, desejável) e de poderem ser facilmente associadas em série ou em paralelo, dado que comparativamente ocupam muito pouco espaço.

A Figura 9 mostra o princípio de funcionamento e a Figura 10 um arranjo múltiplo de calhas em espiral em um sítio com volume mais significativo de movimentação de minério, ao passo que a Figura 11. mostra um modelo portátil que permite escalonamento vertical de outras unidades similares:

Figura 9. Esquema geral de funcionamento de uma espiral concentradora



Fonte: IMSC Group (adaptada pelos Autores).

Figura 10. Calhas espirais trabalhando em conjunto na China

Foto: livre divulgação.

Modernas variantes portáteis deste dispositivo (Figura 11), são escalonáveis (podem ser empilhadas em várias unidades para aumentar a capacidade de processamento) e permitem a regulagem do passo, tornando-as adaptáveis a uma maior faixa de ocorrências minerais e aplicáveis a minérios primários, rejeitos e materiais pré-concentrados. Segundo LINS (2010), a capacidade de uma espiral simples é normalmente de 2 t/h, semelhante à mesa oscilatória, mas ocupando uma área muito menor (LINS, 2010), podendo recuperar partículas de ouro com tamanhos entre 0,1 e 2 mm, com recuperações de até 90% em condições ideais.

Dentre suas limitações, estão eficiência reduzida para partículas de ouro menores que 0,1 mm; a alimentação deve ser uniformemente classificada para evitar perdas; e requerem um fluxo contínuo e abundante de água.

Podem ser viáveis para MAPE de ouro, inclusive em modelos mais simples, representando uma redução do uso de mercúrio. São também eficientes para operações maiores integradas a circuitos de processamento como concentradores centrífugos.

Figura 11. Exemplo de espiral concentradora portátil e regulável

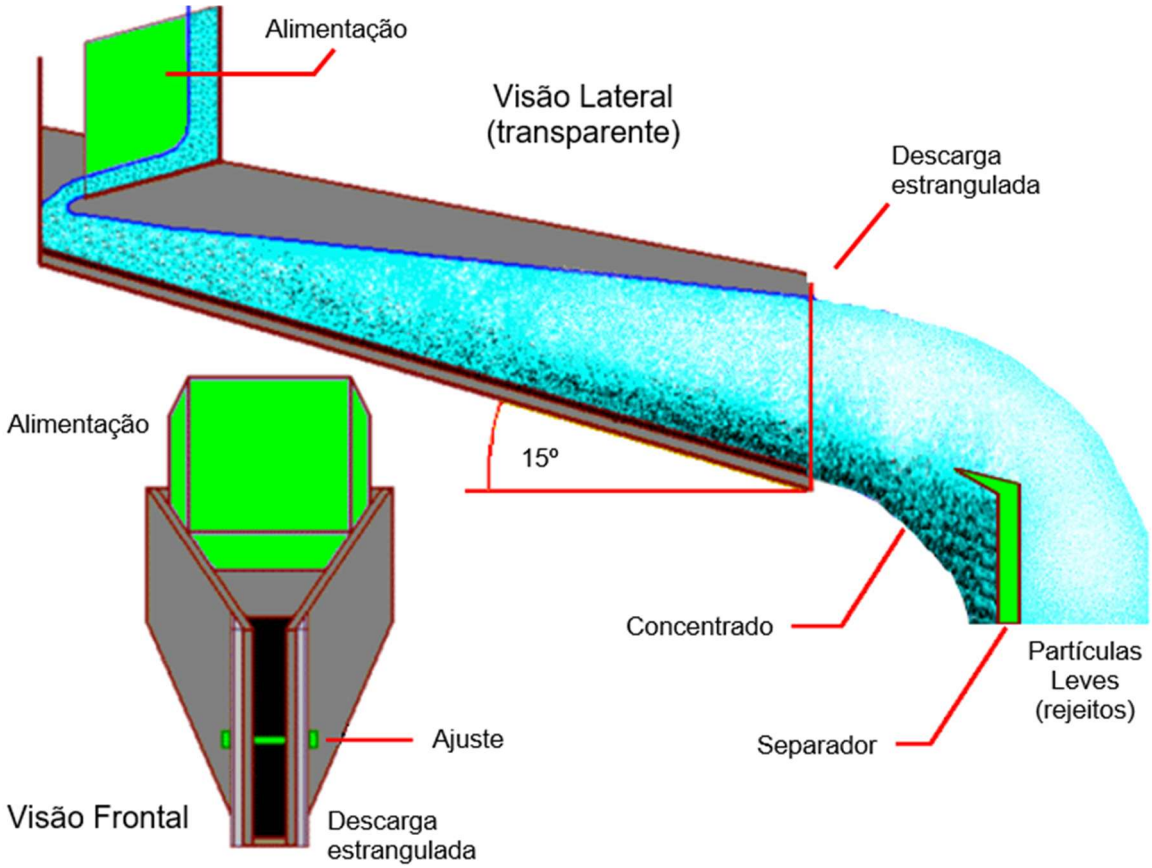
Foto: livre divulgação.

5.1.1.3. Calhas estranguladas e cones Reichert

A calha estrangulada (*pinched sluice*) é uma estrutura simples que consiste em uma calha inclinada, que estrangula o fluxo de minério ou poupa em determinadas seções, forçando a separação, por efeito combinado dos fenômenos da sedimentação retardada e da consolidação intersticial. A alimentação é feita pela extremidade superior mais larga, e à medida que o material desce pela calha, a parcela mais densa tenderá a se concentrar na parte inferior do fluxo, de movimento mais lento, e a parcela leve na parte superior de maior velocidade até que, ao final do trajeto, um simples separador poderá segregar as duas partes, como mostrado na Figura 12.

Sua aplicação na MAPE nunca foi popular e sua eficiência de recuperação de metais densos não deve superar 70% (GRAYSON, 2007), tornando-a uma opção individualmente desinteressante, sem prejuízo de poder compor sistemas complexos de concentração.

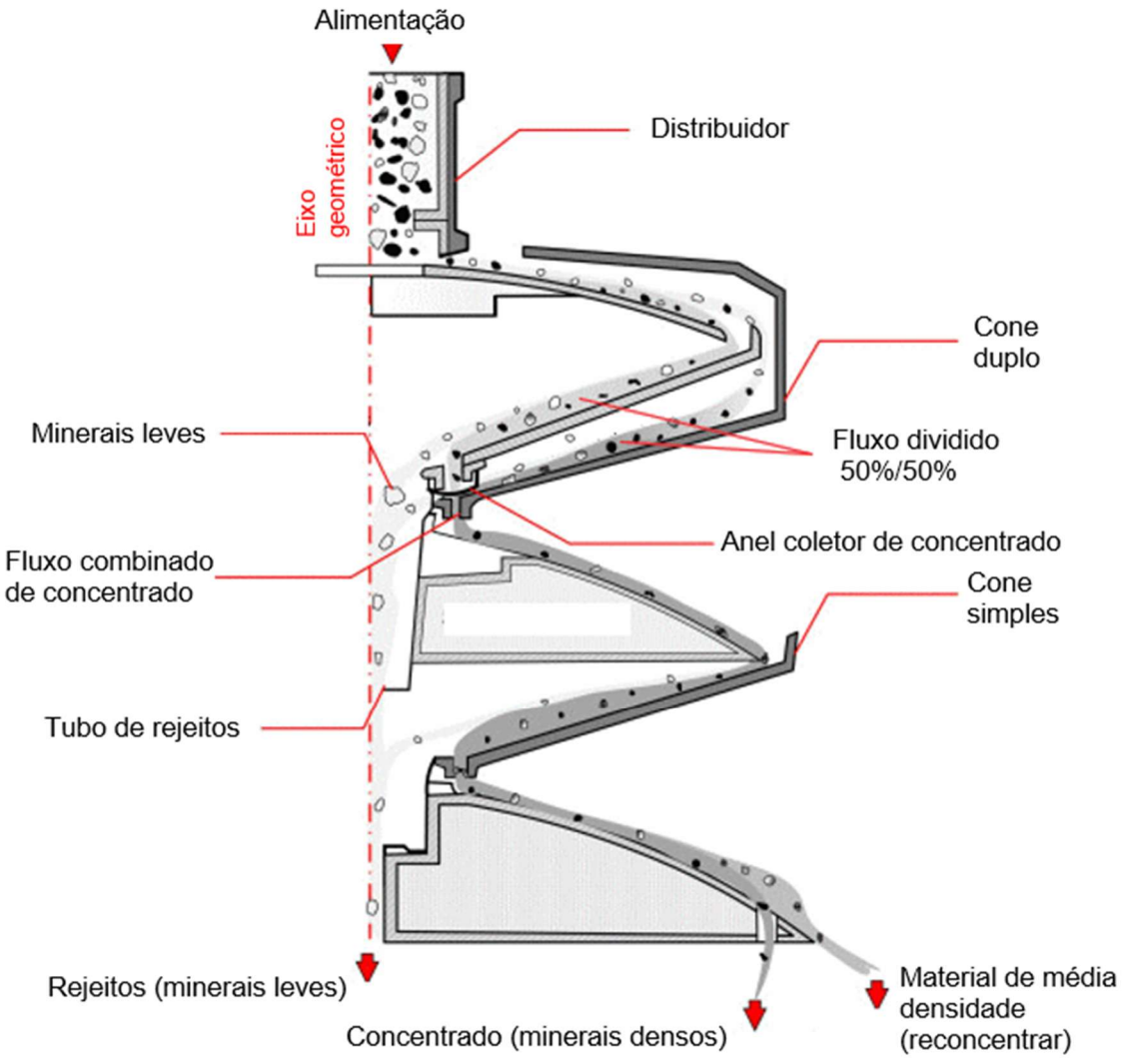
Figura 12. Ilustração do funcionamento de uma calha estrangulada



Fonte: GRAYSON, 2007 (adaptado pelos Autores).

Uma evolução do conceito das calhas estranguladas é o concentrador cônico Reichert desenvolvido na Australia em 1968. Este dispositivo funciona como se várias calhas estranguladas fossem colocadas em círculo, com a seção de alimentação no centro, gerando um cone em cuja a borda inferior se localiza uma bacia dupla de captação (dois funis concêntricos arranjados como anéis de captação), que por sua vez alimentarão um novo cone simples, que alimentará um funil simples, e assim sucessivamente em tantas estágios repetidos quanto desejado, em um arranjo que fará os materiais leves correrem pelo eixo central do equipamento (os tubos os diversos funis), e o concentrado mais denso será direcionado para as bordas do equipamento (Figuras 13 e 14)

Figura 13. Esquema de funcionamento de um concentrador cônico Reichert



Fonte: WILLS e FINCH, 2016, adaptado pelos Autores.

Figura 14. Exemplo de um concentrador cônico Reichert

Fonte: GRAYSON, 2007 e Foto Histórica não creditada.

Concentradores Reichert fabricados em fibra de vidro foram usados experimentalmente por mineradores de ouro aluvionar na Austrália e foram capazes de recuperar mais de 85% das partículas de ouro maiores do que 75 µm, e mais de 44% das partículas de menor tamanho, até o limite de 45 µm.

Seu desenho exótico dificultaria sua fabricação artesanal, mas poderiam ser úteis em regiões que não dispõe de energia, pois são relativamente leves, transportáveis e podem ser escalonados de diversas formas, sendo úteis para concentração inclusive de ouro refratário (que depois poderia ser tratado em uma central adequada).

5.1.1.4. Jigues

Jigues, também conhecidos como “resumidoras”, são equipamentos que utilizam a variação pulsada de fluxo ascendente e descendente de água (ou de outro fluido) para separar materiais mais pesados e mais leves, no qual o leito é estratificado de acordo com diferenças de densidade entre seus componentes (SAMPAIO et al., 2016 apud RAPOSO, 2023; LUZ e LINS, 2010).

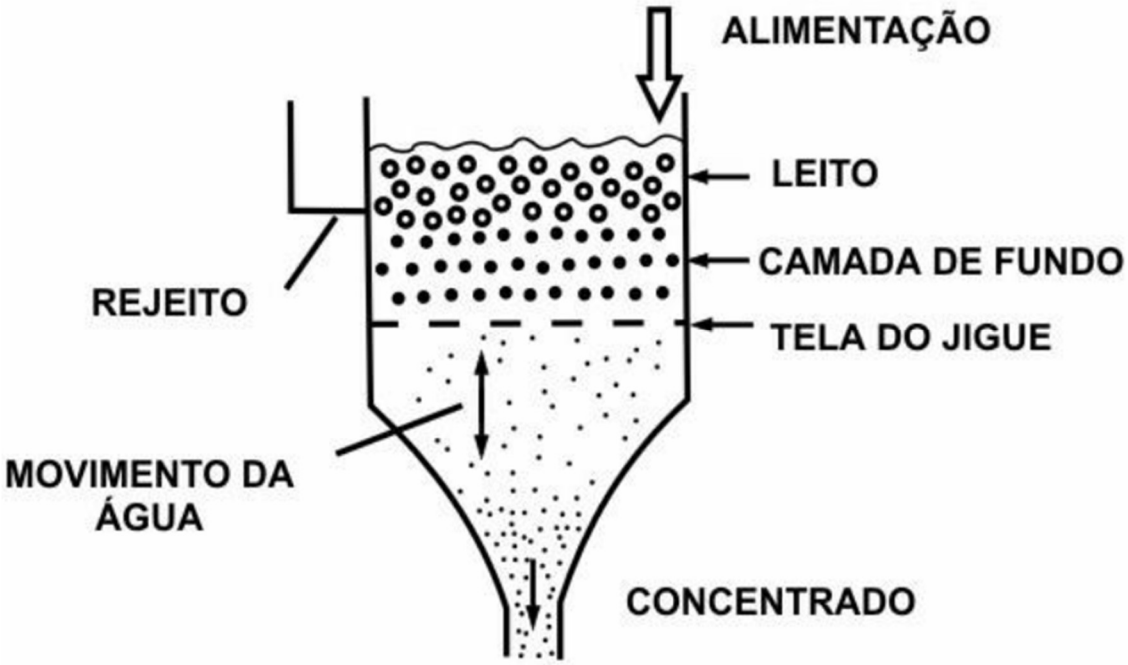
A jigagem, é uma das operações de concentração gravítica mais importantes e é um método bem conhecido desde tempos remotos, tendo sido incialmente aplicado na concentração de minérios grosseiros, carvões, e na reciclagem de resíduos sólidos (LOCKHART, 1984; BURT; MILLS, 1984; SAMPAIO et al., 2016; AMBRÓS et al., 2017; AMBRÓS, 2020; SAMPAIO et al., 2021 apud RAPOSO, 2023), inicialmente usado na MAPE para recuperação de partículas maiores de ouro (geralmente pepitas) de material de minério superdimensionado (*Appropriate Process Technologies* 2022 apud KEANE et al., 2023). Atualmente a jigagem também é aplicável para materiais mais finos quando equipado com peneiras ou telas adequadas (jigues concentradores, em oposição aos jigues classificadores), podendo ser de grande utilidade para o incremento da concentração de minério proveniente das calhas, por exemplo.

Existem várias maneiras de gerar a oscilação vertical do fluido de transporte do minério (polpa), por exemplo mediante ação mecânica direta na parte superior ou inferior do equipamento (o mais comum nos garimpos, devido a robustez), ou pela variação de pressão pneumática em uma câmara de compressão, dentre outros. Da mesma forma, o método de separação de partículas pode diferir do simples uso de separadores que conduzem as partículas pesadas assentadas no leito de uma calha no equipamento e as leves em suspensão na água por circuitos diferentes, até o uso de peneiras ou telas (crivos) que retêm as partículas maiores, enquanto as menores são carreadas pela oscilação vertical do fluido através destas. Essas variações, claro, levam a uma grande variedade de equipamentos, como exemplificado nos esquemas das Figuras 15 e 16

O uso de jigues na MAPE (de ouro, gemas, cassiterita, etc.) é bastante vantajoso por ser de fácil operação, eficiente e relativamente barato para implantar e manter. Dependem evidentemente de energia e um local adequado para operar.

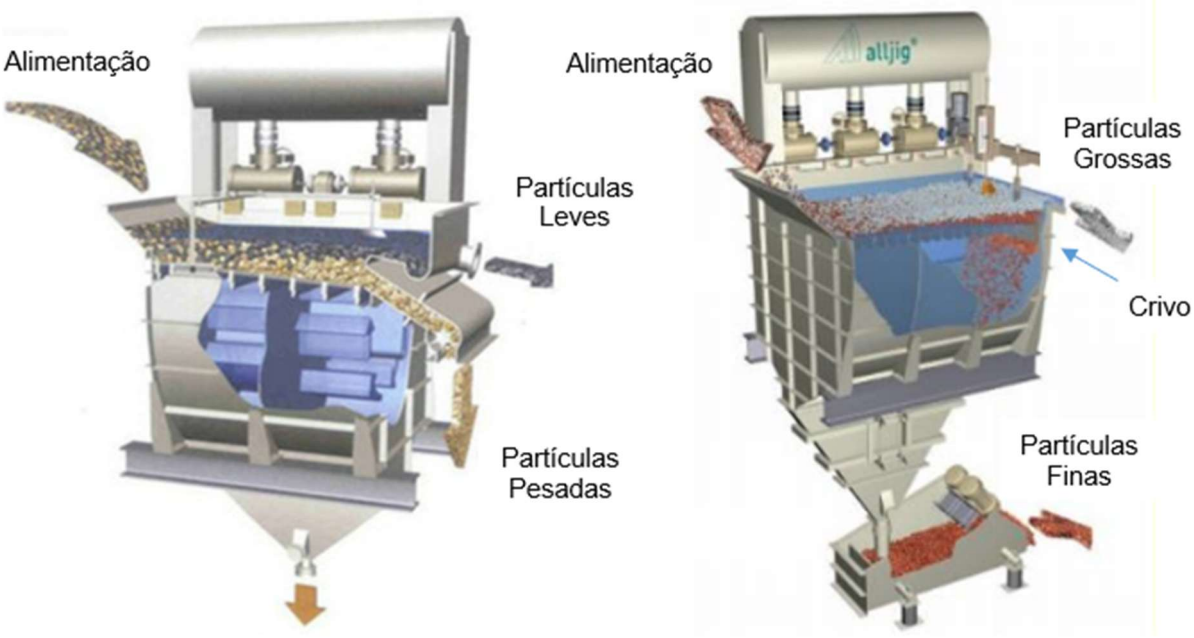
Por outro lado, o chamado jigue centrífugo, desenvolvido na Australia 1985, que combina o efeito de variação pulsada do fluxo de água com os efeitos centrífugos e apresenta desempenho superior aos jigues convencionais na recuperação de partículas mais finas de ouro, não aparenta ter potencial para uso na MAPE por ser complexo e não disponível, podendo ser substituído pela associação de um jigue e uma centrífuga provavelmente com maior sucesso.

Figura 15. Esquema simplificado de funcionamento de um jigue de crivo



Fonte: LINS, .

Figura 16. Esquema ilustrativo de funcionamento de um jigue



Fonte: divulgação adaptado pelos Autores.

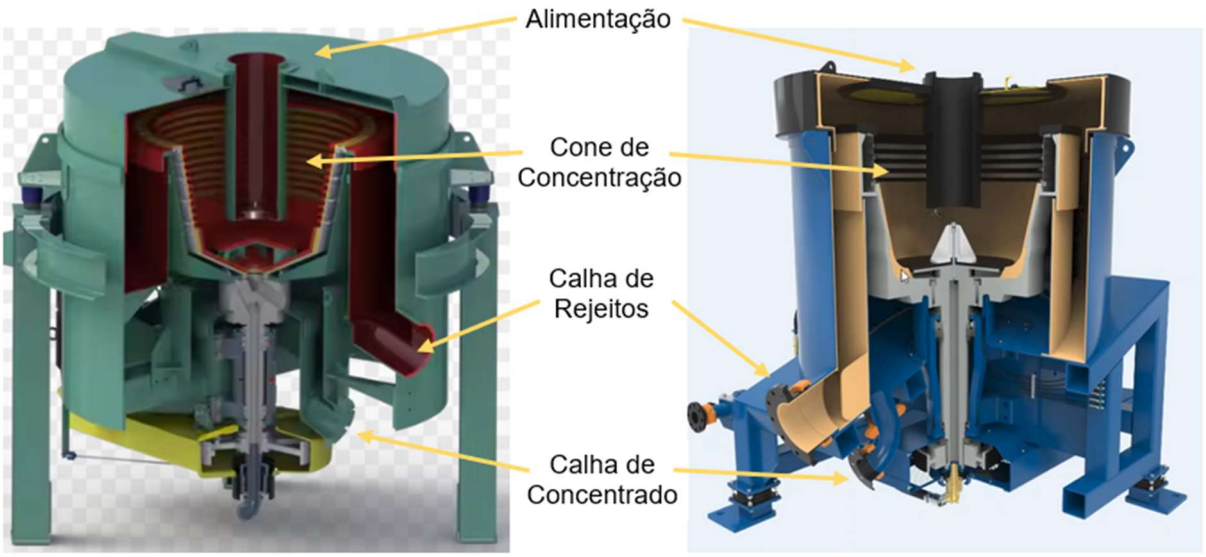
Figura 17. Exemplos de jigues comerciais

Foto: divulgação.

5.1.1.5. Concentradores centrífugos

Os concentradores centrífugos foram desenvolvidos em 1937 e consistem, basicamente, em uma cuba giratória equipada com ranhuras e sulcos nas suas paredes internas e dutos de saída em níveis diferentes. Conforme o equipamento recebe a alimentação de polpa de minério, a rotação da cuba gera uma força centrífuga que resulta na separação dos materiais pesados (por exemplo, ouro) e dos leves em regiões distintas do fluxo. A separação de minerais leves e pesados é frequentemente auxiliada pela injeção de água pressurizada que mantém a fluidização das partículas pesadas nas ranhuras (KEANE et al., 2023). Exemplos incluem o concentrador tipo Knelson, criado para tratamento de metais preciosos de granulometria fina, e o Concentrador Falcon, desenvolvido posteriormente capaz de gerar forças centrífugas até cinco vezes maiores (LINS, 2010) (Figura 18). Outros exemplos de equipamentos de concentração centrífuga são o jigue centrífugo, o *muti–gravity separator* (MGS), e até pequenos equipamentos mais simples como o concentrador Knudsen e o Blue Bowl (que teriam aplicação em operações muito reduzidas).

Figura 18. Concentradores centrífugos tipo Knelson e Falcon lado a lado



Fonte: divulgação adaptado pelos Autores.

Os concentradores centrífugos destacam-se dos outros equipamentos utilizados na concentração de minérios de granulometria fina pela elevada eficiência, e as razões de enriquecimento obtidas com os concentradores centrífugos avançados permitem a redução do número de estágios de separação necessários e a simplificação do circuito de concentração (SAMPAIO e TAVARES, 2005 apud BRAGA, 2005).

A operação do concentrador Knelson, por exemplo, é contínua por um período de 8 a 10 h para minérios auríferos, até que os anéis estejam ocupados predominantemente por minerais pesados (quanto maior a proporção de minerais pesados na alimentação, menor será o período de operação do concentrador); esta variável deve ser otimizada de acordo com as características de cada minério a ser tratado (LUZ e LINS, 2010).

Registra-se a aplicação da concentração centrífuga a vários tipos de minérios, para recuperação de finos de cassiterita, scheelita, separação de pirita fina de carvões, entre outros (LINS, 2010). Por possuírem elevada capacidade unitária de processamento, os concentradores centrífugos podem ter custos de operação e manutenção relativamente baixos (SAMPAIO e TAVARES, 2005 apud BRAGA, 2005); e SOBRADIEL e GOMES (2021) recomendaram que os mineradores de pequeno

porte da região de Peixoto de Azevedo considerem a substituição de calhas concentradoras por centrífugas dos tipos Knelson e Falcon.

MARTINEZ et al. (2021) salientam que os concentradores centrífugos podem trabalhar eficientemente e simultaneamente partículas grossas e finas de ouro e permitem um rendimento de recuperação do metal precioso maior que qualquer outro equipamento de separação por gravidade usado pela MAPE, além de reduzir a massa de concentrado para menos de 0,1% da massa original (reduzindo, portanto, de imediato a necessidade de uso de mercúrio). Apesar disso, representam um custo maior e exigem um nível maior de treinamento e organização operacional, que reduzem o interesse de alguns mineradores que consideram “muito complicados de usar".

Figura 19. Centrifuga instalada como etapa intermediária de concentração de ouro em garimpo no Mato Grosso.

a. visão geral da instalação; b. detalhe interno do equipamento.

Foto: Carlos Henrique Xavier Araujo.

Devido à sua eficiência, os concentradores centrífugos vêm sendo utilizados com sucesso em diversos garimpos na região de Peixoto de Azevedo, ampliando a eficiência na recuperação de ouro.

5.1.1.6. Centrífuga horizontal Younge

A centrífuga horizontal Younge foi desenvolvida no Canadá durante os anos 1980 especificamente para extração de ouro de depósitos aluvionares, sendo formada por um cilindro giratório equipado com dois conjuntos de riffles em sua parede interna, um arranjado longitudinalmente ao longo de todo o seu comprimento do cilindro, e o segundo posicionado em ângulos retos em relação aos primeiros, para formar anéis ao redor da parede. A polpa mineral é introduzida no aparelho com uma relação de diluição de 1:1 entre água e sólidos, pela extremidade de alimentação levemente elevada, e o movimento rotacional de alta velocidade faz com que as partículas densas fiquem presas às paredes, retidas pelos rifles, enquanto as mais leves caem em cascata carreadas pela água e acabam em um vórtice central, migrando pelos "compartimentos" limitados pelos rifles anelares, até serem ejetadas na saída.

Trata-se de um equipamento relativamente pequeno e facilmente transportável e que tem menor dependência de nivelamento da base. No protótipo básico, o cilindro tinha 1,50 m de comprimento, por 40 cm de diâmetro, girava entre 140 e 170 RPM, e era capaz de processar 8 ton/hora de minério (4 m³). Uma versão maior, com 2,30 m de comprimento e 50 cm de diâmetro, processava até 20 ton/hora (10 m³). Em ambos os casos, em funcionamento ótimo, era capaz de altas taxas de desempenho na captura de ouro com partículas entre 70 µm e 1,5 mm.

Embora pouca divulgada, essa solução tem potencial para ser usada em regiões carentes de energia (pois pode ser alimentado por geradores a diesel) e é perfeitamente ajustável às condições da MAPE.

5.1.1.7. Centrífugas helicoidais

Uma variação interessante das centrífugas horizontais, que mantém suas vantagens, aumenta a sua eficiência e foi popular na América do Norte durante os anos 1990, são as chamadas centrífugas helicoidais (*helix cylinder*). Similarmente aos modelos horizontais convencionais, esses equipamentos são construídos a partir de um tubo longo e estreito, levemente inclinado, que recebe alimentação de polpa na extremidade elevada e descarrega na parte inferior. A diferença está nos rifles inseridos nas paredes internas do tubo, dispostos em um arranjo espiralado ao longo

do corpo do equipamento para gerar o efeito de um parafuso de Arquimedes. Devido ao rápido movimento giratório, os materiais densos ficarão presos nas bordas do cilindro e serão dirigidos pelos rifles helicoidais para as bordas da extremidade superior do cilindro, onde serão descarregados continuamente como concentrado, eliminado a necessidade de paradas do equipamento. A partículas leves, por sua vez, ficarão em suspensão na água, serão transportadas pelo vórtice central, até serem ejetadas como um jato contínuo de rejeitos no tubo axial inferior.

Figura 20. Exemplo de centrífuga helicoidal comercial

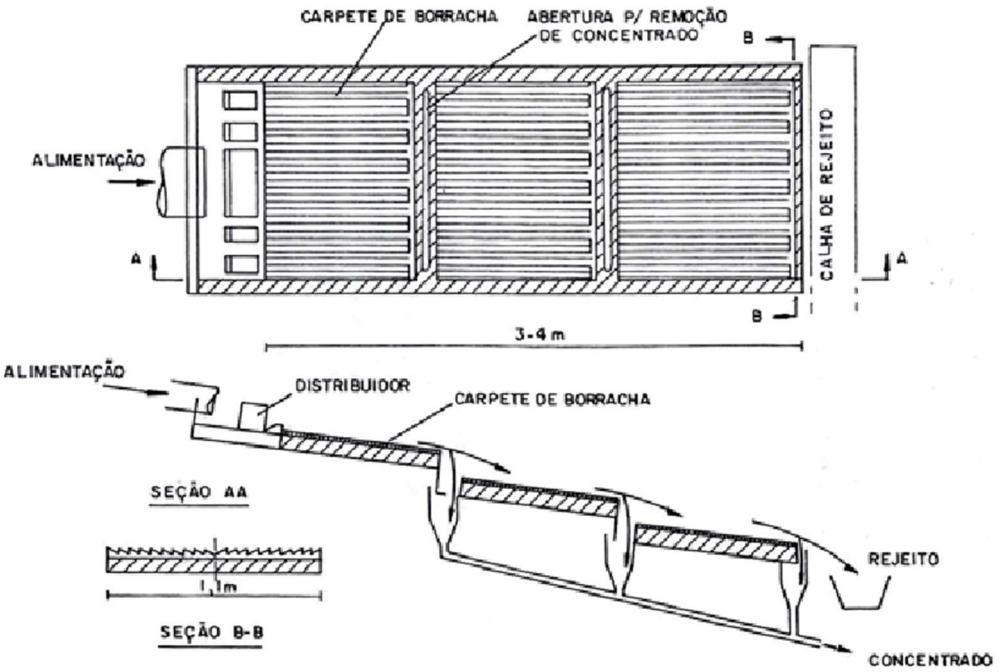
Foto: www.extrac-tec.com

Assim como outros equipamentos, os cilindros helicoidais podem ser projetados para granulometrias crescentes, para aumento da precisão do concentrado, ampliando seu potencial de aplicabilidade quando usados em conjunto.

5.1.1.8. Mesas concentradoras

As mesas de concentração gravítica são equipamentos interessantes para a MAPE devido a sua eficiência, simplicidade e custo acessível. Modelos mais simples, conhecidos como mesas planas, utilizam apenas a ação da gravidade e o efeito de fluxo laminar para separar materiais por diferença de densidade e podem ser consideradas uma versão mais sofisticada das calhas simples. A Figura 21 ilustra o seu princípio geral de funcionamento.

Figura 21. Esquema de funcionamento de uma mesa concentradora plana.

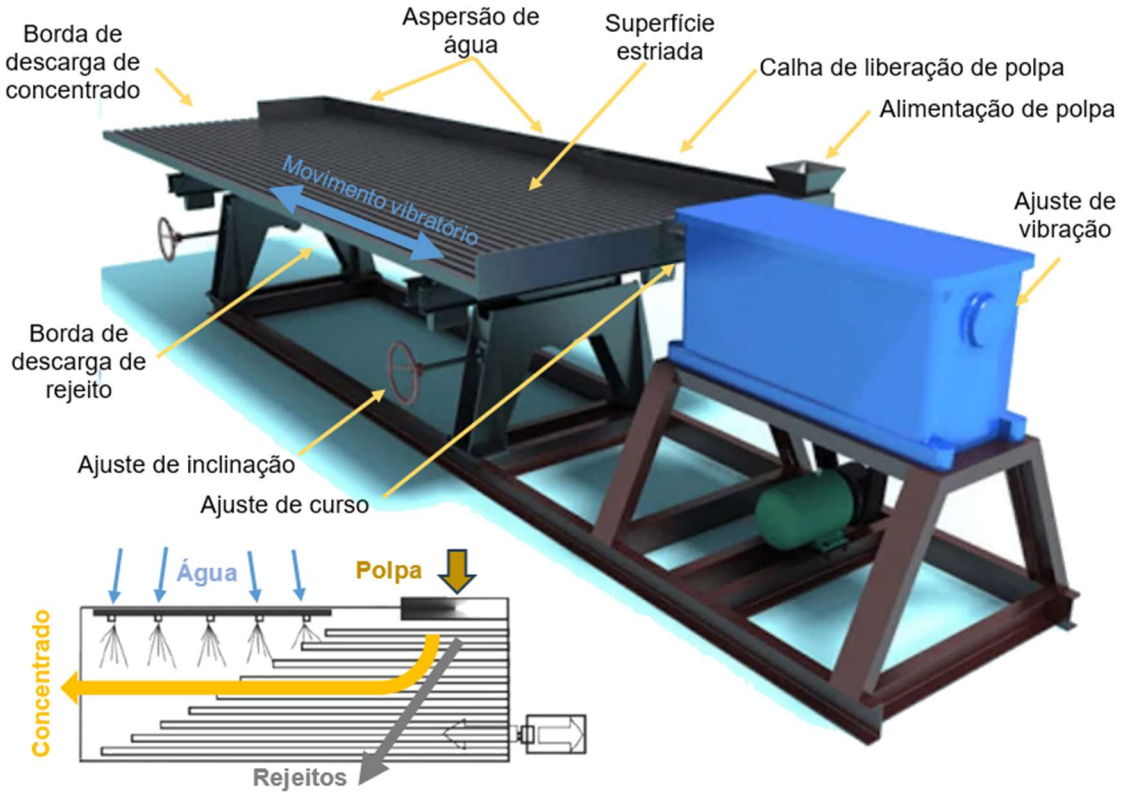


Fonte: Lins, 2010

Mesas simples, sem prejuízo de que possam ser eventualmente uma solução otimizada para calhas concentradoras em alguns casos, têm sua eficiência largamente superada pelas mesas vibratórias (*shaking tables*), equipamentos de resumo, sem o uso de mercúrio, que operam separando partículas de ouro de outros materiais, através de diferenças de densidade, movimento vibratório e fluxo de água.

Como ocorre com outros equipamentos, existem diversos modelos de mesas vibratórias, como as dos tipos Gemini e Holman-Wilfley. A estrutura de todas, no entanto, é similar e consiste em uma plataforma plana inclinada, montada sobre um mecanismo de vibração que gera movimentos oscilatórios rápidos (Figura 22).

Figura 22. Esquema de funcionamento de uma mesa vibratória



Fonte: divulgação adaptado pelos Autores.

No funcionamento da mesa vibratória, o material a ser processado é alimentado na plataforma da mesa, geralmente uma mistura de minério triturado e água. O mecanismo de vibração faz com que a mesa vibre, criando uma camada fluidizada do material sobre sua superfície. Devido à diferença de densidade, o ouro se move para a parte mais baixa da mesa, enquanto os materiais mais leves são deslocados para a parte superior. Durante o processo, o ouro se concentra em sulcos ou ranhuras ao longo da parte inferior da mesa.

As mesas vibratórias mecanizadas podem ser usadas para concentrar ouro sem mercúrio (ESDAILE e CHALKER, 2018), a exemplo dos testes que vem sendo realizados pela COOGAVEPE no Norte do Estado do Mato Grosso, que disponibilizou inicialmente o equipamento para uso de seus cooperados no Centro Tecnológico da entidade, com destaque para estarem sendo consideradas as características específicas da mineração de ouro na região (Figura 23).

Figura 23. Mesa concentradora desenvolvida pela COOGAVEPE e parceiros

Foto: COOGAVEPE, 2024.

De acordo com informações verbais, o modelo de mesa vibratória em teste pela COOGAVEPE **tem dispensado o uso de mercúrio e obtém o mesmo rendimento de recuperação de ouro** e o tempo de operação depende do volume de concentrado a ser processado, mas uma média é de 2 horas para um volume considerado rotineiro.

Segundo informado, o custo do protótipo foi de cerca R$ 150.000,00 (o que mantém o equipamento no patamar de ainda acessível), e a manutenção não é cara por ser um sistema simples.

As mesas vibratórias podem ser uma alternativa eficaz para substituição gradual do uso de mercúrio em garimpos. Para aumentar sua eficácia, é importante investir em treinamento operacional contínuo e manutenção, além de integrá-las a outros processos tecnológicos para lidar com desafios como a recuperação de partículas ultrafinas.

5.1.1.9. Classificadores espirais

Classificadores espirais são equipamentos aptos a operar na separação de materiais em uma faixa granulométrica de 0,833 a 0,074 mm (20 a 200 mesh), adequados a pequenas instalações e passíveis de arranjos móveis.

Constituem-se em uma calha inclinada, provida de um eixo central envolvido por uma ou mais hélices, as quais mantêm a polpa em suspensão por meio de movimento giratório. A alimentação de polpa é feita no nível inferior, o material mais pesado afunda e é transportado pelas hélices ao longo do declive para ser descarregado na parte superior do equipamento através de uma abertura no topo da calha. Por sua vez, o material mais fino transborda pela parte superior de uma bacia de sedimentação existente na parte inferior da estrutura (Figura 24). As condições operacionais são definidas por: velocidade de revolvimento ou arraste; altura e inclinação da calha; diluição da polpa.

Figura 24. Representação esquemática de um classificador espiral

Fonte: METSO, 2015, apud CORREIA e COUTO, 2018.

Figura 25. Exemplo de um classificador espiral

Foto: livre divulgação.

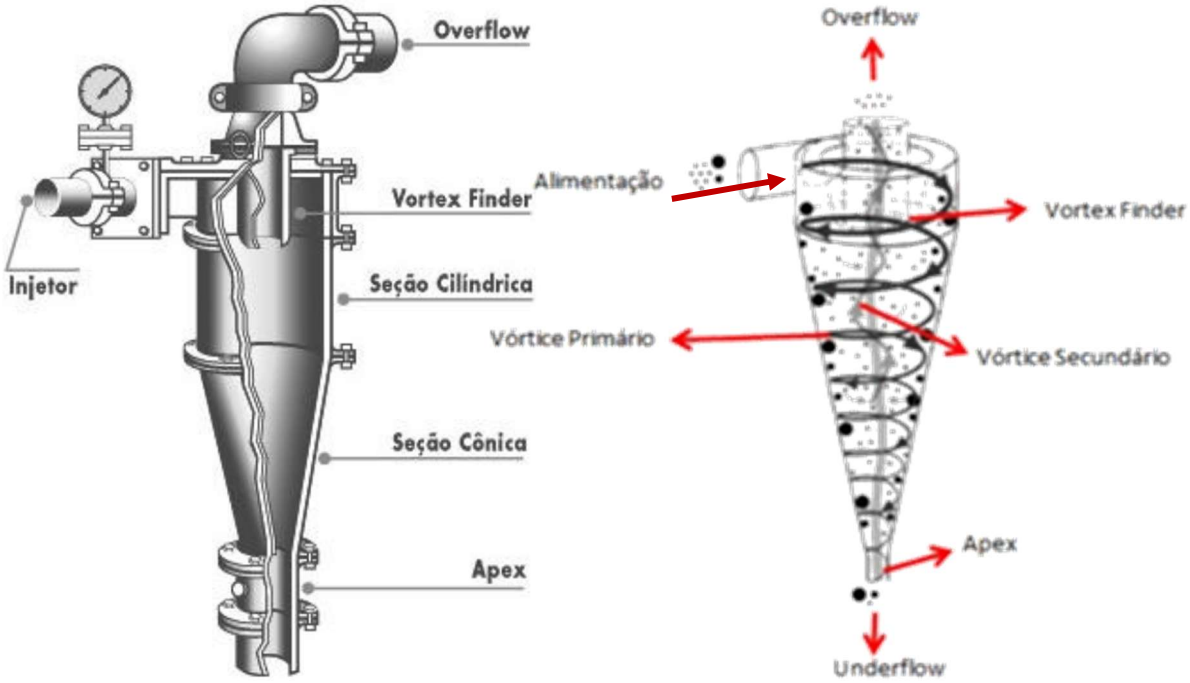
A velocidade de arraste e a inclinação da calha atuam diretamente na granulometria da classificação. Arrastes e inclinações menores, geram maior tempo de sedimentação e uma classificação mais fina; o oposto resultará em uma classificação mais grossa. A precisão da faixa de separação é uma característica operacional vantajosa dos classificadores mecânicos, mas exige controle da diluição da polpa e usualmente acarreta a necessidade de diluição antes do aparelho e espessamento após sua etapa, para compatibilizar com outros equipamentos. (CORREIA e COUTO, 2018).

Embora não seja um equipamento normalmente associado a MAPE de ouro, tem uso relativamente comum na atividade extração de areia, indicando que potencialmente seria uma alternativa transportável e eficiente para classificação remota quando outros processos de concentração não possam ser feitos de modo eficiente (como em mineralizações sulfetadas, por exemplo) e que permitiria um pré-concentrado para ser processado em centrais específicas.

5.1.1.10. Hidrociclones

São equipamentos versáteis, de capacidade elevada e sem partes móveis, com vasta aplicação na área de processamento mineral (SAMPAIO et al., 2005). Consistem-se basicamente em uma estrutura cilíndrica vertical, com um afunilamento em sua parte inferior, provida de tubos de alimentação e remoção de materiais leves montado tangencialmente na seção cilíndrica. A alimentação tangencial de polpa adequadamente diluída sob pressão causa um movimento de vórtice no fluído capaz de separar as partículas leves ou finas que são carreadas pera cima e saem pelo tubo de extração existente no topo do cilindro (*overflow*), das pesadas ou grossas (*underflow*) que irão se depositar no fundo do segmento cônico, de onde podem ser descarregadas por uma abertura em seu vértice (*apex*) (CARRISSO, 2004 apud SAMPAIO et al., 2005) (Figura 26).

Figura 26. Ilustração das partes e do funcionamento e de um hidrociclone



Fonte: CETEM (adaptado) e SALVADOR, BARROZO e VIEIRA, 2014.

Com relação às partículas, a área mais próxima à parede do hidrociclone é ocupada, predominantemente por partículas grossas e por partículas finas na região central, onde ocorre a mudança da seção cilíndrica para a cônica e o escoamento é invertido (KELLY, 1982 apud SAMPAIO et al., 2005). Na seção cônica há o

estrangulamento no *apex*, e a maior parte do fluxo, com menor quantidade de partículas, é descarregada no orifício oposto (*vórtex finder*), possibilitando a classificação, uma vez que a polpa da região central, do o*verflow*, tem mais partículas finas do que aquela do *underflow*.

As variáveis operacionais mais importantes são: porcentagem de sólidos, formas das partículas e pressão na alimentação; distribuição granulométrica do minério; e viscosidade e densidade da polpa (SAMPAIO et al., 2005).

Nos garimpos, os hidrociclones são comumente utilizados após a etapa de moagem, recuperando as frações mais grossas/pesadas, e descartando as frações mais finas/leves. Existe potencial para desenvolvimento de unidades transportáveis, que poderiam ser usadas com vantagem em regiões de difícil acesso por dispensarem o uso de energia própria e poderem ser facilmente adaptáveis aos sistemas de bombas hidráulicas atualmente em amplo uso no Brasil.

Figura 27. Hidrociclone em garimpo

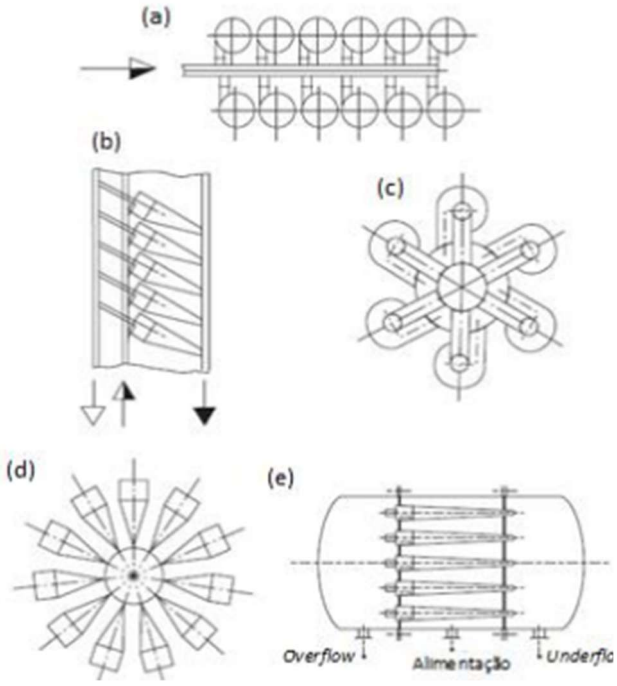
Fonte: Oswaldo Menta Simonsen Nico.

Outra característica vantajosa dos hidrociclones é que eles podem ser facilmente arranjados para operar em série formando um cicloclassificador (*cyclosizer*), para gerar saídas de várias granulometrias distintas ou um efeito de refinamento progressivo para aumento de eficiência (elutriação centrífuga), tudo

graças a geometria diferenciada de cada hidrociclone posto em série e com diâmetros decrescentes na tubulação de entrada (alimentação) e de saída (*vortex*) que resulta em velocidades crescentes da suspensão e forças centrífugas com intensidades progressivamente mais elevadas que implicam um decréscimo progressivo do tamanho limite de separação das partículas (WILLS, 1988 apud BRAGA e COUTO, 2005) e tudo isto sem perder o potencial de mobilidade e sem demandar muito espaço.

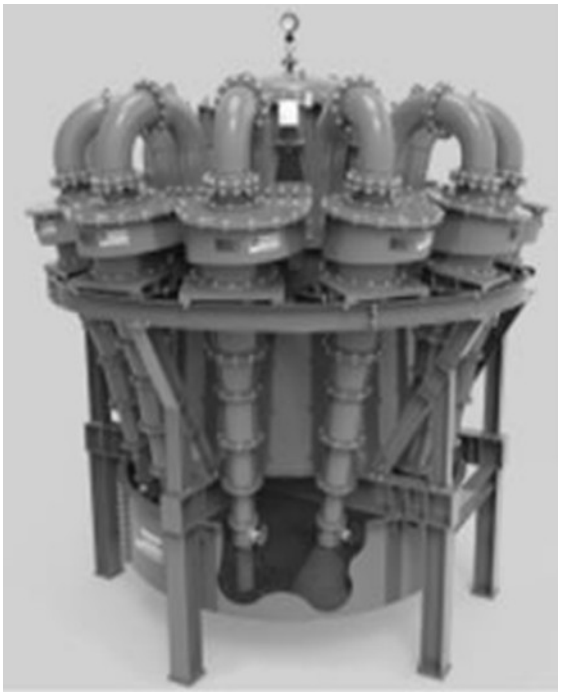
As unidades com mais de um hidrociclone podem ser unidas em 4 tipos de arranjos principais, conforme ilustrado na Figura 28, com pequenas variações entre cada tipo. Os dois primeiros tipos (a) e (b) são arranjos lineares, enquanto os outros dois (c) e (d) são arranjos circulares (SVAROVSKY, 2000 apud CORREIA e COUTO, 2018). O arranjo (c) é provavelmente o mais comum, conhecido como bateria de hidrociclones "aranha" (Figura 29).

Figura 28. Arranjos cicloclassificadores com hidrociclones



Fonte: CORREIA e COUTO, 2018

Figura 29. Arranjo “aranha” de hidrociclones



Fonte: FLSMIDTH KREBS, 2016 apud CORREIA e COUTO, 2018

Hidrociclones possuem um vasto leque de aplicações no processamento, que vão desde circuitos de preparação (moagem, deslamagem, lavagem), até classificação granulométrica na faixa fina e metalurgia do pó; dentre outras (cicloclassificadores) (WILLS, 1988 apud BRAGA e COUTO, 2005).

No contexto da mineração de ouro, cicloclassificadores são atualmente empregados como etapa intermediária para aumentar a eficiência de processos de concentração gravítica ou químicos. Entretanto, na hipótese de processamento de metais densos como ouro, cicloclassificadores de precisão **são reportados como capazes de classificar partículas até 4 µm** (muito acima de mesh 635) (WILLS, 1988 apud BRAGA e COUTO, 2005) — o que certamente os coloca em um patamar único dentro da classificação gravítica e os caracteriza como tendo um potencial proporcionalmente elevado para o banimento do uso de mercúrio.

Apesar do custo inicial e da necessidade de um refinamento operacional para garantir seu funcionamento ótimo, tanto hidrociclones, quanto cicloclassificadores, são ferramentas eficientes para o processamento aurífero e justificam o investimento pelo ganho de eficiência em operações de MAPE de maior porte. Sua potencialidade poderia ser aumentada, com o desenvolvimento de modelos especificamente projetados e dimensionados para as condições da atividade, que possivelmente seriam mais baratos.

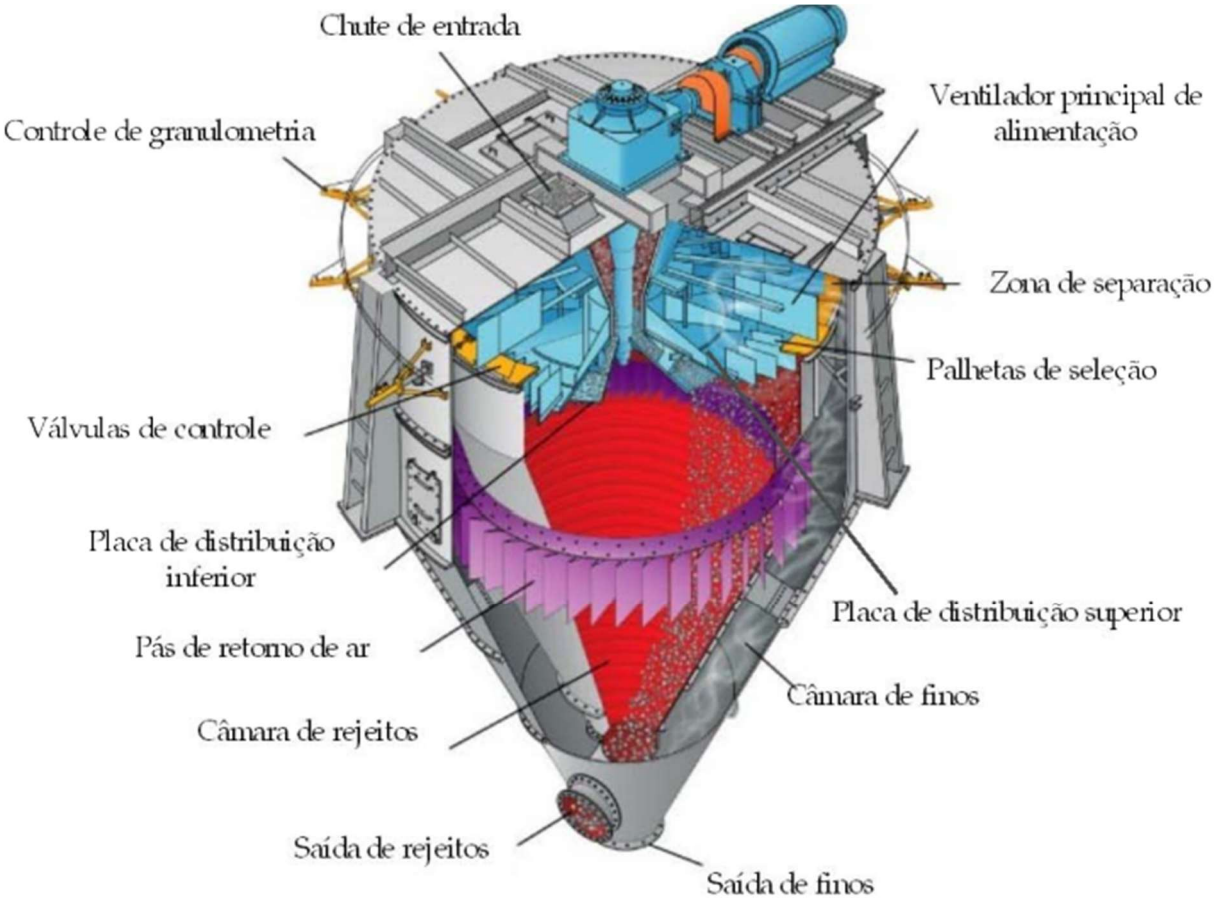
5.1.1.11. Aeroclassificador

Os aeroclassificadores são utilizados na separação e concentração de partículas com base em princípios físicos da força centrífuga, da força de arraste e da aceleração da gravidade (combinação que resulta na classificação de partículas, de acordo com o seu tamanho ou a sua densidade), usando o ar como meio fluido (BRAGA e COSTA, 2005). Essa classificação fornece os meios mais eficazes na classificação dos finos contidos na alimentação (materiais secos com granulometria abaixo de 100 µm) e obtenção de um produto final com menor quantidade de partículas grossas, sendo geralmente indicado para operação em circuito de moagem (no qual possui um desempenho ótimo na remoção da fração fina), com a vantagem de dispensar o uso de água (BRAGA e COSTA, 2005).

Os ajustes operacionais variam de acordo as características do material a ser separado: peso ou densidade, granulometria desejada no produto final, teor de umidade, percentual de finos na alimentação, método de alimentação, dentre outros.

Os cuidados especiais na operação estão relacionados com (i) a taxa de alimentação constante e controlada para manter inalterado o conteúdo de finos (recomendável entre 70 e 80% na alimentação); (ii) a condição do material a ser processado (seco e bem desagregado); e (iii) a retirada dos finos do separador, a ser feita com uma calha bem aberta e um tubo de exaustão pode ser acoplado à saída do produto para coletar ar contaminado de finos, terminando em um filtro de mangas (BRAGA e COSTA, 2005).

Figura 30. Ilustração detalhada do aeroclassificador Sturtevant Whirlwind



Fonte: BRAGA e COSTA, 2005.

O processo de aeroclassificação pode ser uma solução viável e sustentável em condições específicas. O sistema é baseado na recuperação de ouro livre, com boa taxa de recuperação, não apresentando eficiência satisfatória para minérios onde o ouro esteja aderido à óxidos ou a sulfetos. Dentre suas vantagens se destacam (i) a capacidade elevada de processamento na classificação granulométrica, significativamente maior que as tradicionais peneiras vibratórias; (ii) a construção simples; (iii) o baixo custo de manutenção associado à facilidade operacional; (iv) facilidade de controles externos de granulometria, sem a necessidade de parada do equipamento para ajuste do produto final (BRAGA e COSTA, 2005). Além disso, a flexibilidade operacional permitindo a separação inicial de partículas de tamanhos e densidades variáveis, a **capacidade de funcionamento com uso nulo (ou mínimo) de água (o que dispensa a necessidade de bacias de contenção ou barragens de rejeito)**, e a possibilidade de gerar um rejeito útil como um subproduto, são apontados como vantagens associadas a este tipo de equipamento.

Suas limitações envolvem, dentre outras, a necessidade de pré-classificação ou moagem do material para distribuição uniforme de tamanho e a baixa seletividade em minérios complexos (que pode comprometer seu uso como método primário para recuperação de ouro em mineralizações com altas proporções de minerais de densidade semelhante) (RING et al., 1986; BRASIL MINERAL, 2018; MOURA, 2022).

Em que pese esse tipo de equipamento ainda precisar de investimento em adequações específicas às realidades da MAPE e a sua aplicação ser sempre dependente de estudos específicos e significativo investimento para compor soluções integrativas, os aeroclassificadores têm bom potencial para complementar outras tecnologias na mineração de ouro e até para gerar fontes alternativas de renda que garantiriam sustentabilidade econômica pós exaurimento do ouro. Nesse sentido, a Equipe de Campo deste Projeto pode observar uma aplicação piloto de um equipamento desta natureza instalado em uma central de processamento mineral, denominado Ecogold System (desenvolvido pela Joares Equipamentos Industriais para a Mineração Eureka), durante a visita ao Município de Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso, em agosto de 2023, (Figura 31).

Figura 31. Sistema de aeroclassificação da Mineração Heureka, no município de Nossa Senhora do Livramento

a. operação de pré-concentração;
b. sistema de secagem e peneiramento confinado;
c. torre de aeroclassificação;
d. super concentrado de ouro livre;
f. detalhe em microscópio do ouro livre contido.

Fonte: Oswaldo Menta Simonsen Nico.

5.1.2. SEPARAÇÃO MAGNÉTICA E ELETROSTÁTICA

No Brasil e no mundo, a separação magnética e a separação eletrostática são ferramentas valiosas para preparar materiais, melhorar a qualidade do concentrado e promover práticas sustentáveis, especialmente quando integrada a outros métodos de extração e beneficiamento. A diferença entre ambas é que a primeira depende da suscetibilidade magnética dos minerais a serem processados, enquanto a segunda considera a condutividade elétrica dos mesmos, como a propriedade básica de separação (SAMPAIO et al. 2007).

Embora o ouro não possa ser recuperado diretamente por processos magnéticos (pois é um metal diamagnético), essa tecnologia é essencial para remover minerais contaminantes (como magnetita e hematita), antes ou após a concentração, em regiões com solos ricos em ferro, além de facilitar o gerenciamento de rejeitos.

ESDAILE e CHALKER (2018) citam que em algumas áreas do Sudeste da África, a concentração gravítica se mostrou inicialmente ineficiente pelo excesso de minério de ferro na mineralização e a alternativa encontrada foi a separação magnética prévia por meio de um imã para remover a magnetita e a hematita naturalmente ocorrentes do minério bruto. Eliminado o contaminante de densidade equivalente, o ouro passou a ser recuperável graviticamente, viabilizando o abandono da amalgamação com mercúrio.

5.1.3. PLACAS MAGNETIZADAS CLEANGOLD

As placas magnetizadas Cleangold são uma solução patenteada ofertada em vários modelos que basicamente são consistidos em folhas apropriadamente magnetizadas inseridas em uma calha de alumínio em um arranjo que cria um sistema de riflles aproveitando areias magnéticas e água, permitindo que o excesso de materiais passe enquanto o ouro fica retido nos rifles de areia magnética (Figura 32). Sua aplicação é obviamente preferencial em regiões de ocorrência de magnetita, mas o fabricante recomenda e orienta a adição de areias magnéticas ou grãos de ferro de fontes artificiais (por exemplo, ferro perdido na soldagem e moagem) caso o minério a ser trabalhado não contenha magnetita naturalmente.

Figura 32. Rifles de minério de ferro formados na placa Cleangold

Fonte: CLEANGOLD, 2025

A natureza dinâmica dos riffles permite que grandes quantidades de material sejam processadas, usando fluxo laminar e pequenas quantidades de água, com alta taxa de captura, permitindo que os concentrados sejam reduzidos e o ouro recuperado sem o uso de mercúrio ou cianeto com uma taxa de recuperação alegada pelo fabricante de pelo menos 90% do ouro em condições estáticas com material fino (CLEANGOLD, 2025).

Teoricamente é uma solução eficiente na recuperação por gravidade para a extração de partículas ultrafinas (na faixa dos mícrons) de ouro livre e outros minerais, incluindo platina e terras raras (“REE”). Testes foram realizados entre 2019 e 2020 com parceiros regionais do fabricante no Peru e na Guiana e apresentaram resultados aparentemente promissores na concentração e extração de ouro ultrafino de areias pretas (magnetita) “sem as perdas tipicamente associadas a produtos tóxicos ou sistemas convencionais caros que exigem grandes quantidades de água limpa, energia ou manutenção” (CLEANGOLD, 2025).

Em que pese estudos independentes ainda devam ser realizados para a aferição das suas limitações operacionais, real eficiência e durabilidade do equipamento, bem como o seu comportamento com mineralizações refratárias, esta pode ser uma solução interessante para contextos específicos da MAPE de ouro, por

ser relativamente barata (os preços dos produtos da Cleangold variam de US$ 40 para a menor unidade que substitui uma bateia – Figura 33 – a US$ 275 para a "calha de recuperação primária"), por pretensamente apresentar uma faixa mais ampla de captura de partículas mais finas de ouro e dispensar em tese o uso de produtos químicos (embora o uso descontrolado possa em determinadas circunstâncias causar o aumento de teor de ferro de solos anteriormente não férricos).

Figura 33. Calha Cleangold portátil

Fonte: CLEANGOLD, 2025

5.1.4. PLACAS AMALGAMANTES (PLACAS MERCURIZADAS)

Placas amalgamantes (*amagamating plates* ou *coated copper plates*) feitas de cobre e revestidas de mercúrio já eram utilizadas na extração de ouro na Califórnia na corrida ouro do século XIX, disseminando-se pelos países anglófonos como uma evolução do método de despejo direto de mercúrio nas calhas de concentração, e ainda hoje a técnica está uso para a extração de ouro em várias partes da América, como na Nicarágua, no Suriname e mesmo em alguns locais no Brasil.

O procedimento é relativamente simples e consiste em espalhar mercúrio puro diretamente sobre uma placa metálica (originalmente de cobre, mas também de liga de cobre-zinco e, atualmente, aço galvanizado e aço revestido de cobre) (Figura 34),

que pode ter sido previamente lavada com ácido nítrico para eliminar a oxidação e otimizar o processo. O mercúrio irá se ligar ao metal, formando uma fina camada de amálgama, e as placas assim preparadas serão posicionadas no fundo das calhas de concentração (com inclinação tradicional de 15º). A polpa homogeneizada é direcionada de modo contínuo, com velocidade controlada, sobre as placas e as partículas de ouro ao entram em contato com o mercúrio irão aderir à camada de amálgama. Periodicamente a operação é interrompida, as placas são raspadas para retirar o excesso amalgamado e reativadas com mais mercúrio. O material retirado é então pirolisado, para evaporar o mercúrio e deixar o ouro, como em um processo de amalgamação normal. Para reduzir as paradas, é prática comum que pequenas quantidades de mercúrio sejam misturadas à polpa no topo da calha, visando reativas a camada de amálgama durante a operação.

Figura 34. Minerador artesanal preparando placa mercurizada na Nicarágua.

Foto: reprodução do Youtbe.

Embora o uso de placas mercurizadas possa ser aparentemente eficiente para minérios que contenham ouro livre em partículas grosseiras, é um método anacrônico fortemente criticado pelo alto grau de liberação de mercúrio causado pelo atrito do minério (por exemplo VEIGA, SILVA e HINTON, 2002), mas também pela sobrealimentação do metal tóxico e evaporação decorrente do aquecimento da placa como um todo com maçarico para recuperar o ouro. Não são, portanto, uma alternativa

aceitável para a redução do uso do mercúrio (até porque, mesmo industrializadas, gerariam uma nova cadeia de consumo do metal tóxico, o que é inadmissível).

Inobstante, as placas mercurizadas deram origem a modernas placas eletrorevestidas (por eletrólise ou eletrodeposição) com cobre ou prata, que vem sendo indicadas como uma alternativa eficaz para descontaminação de rejeitos e solos contaminados com mercúrio (com o efeito colateral de recuperarem sobras de ouro dos mesmo materiais), em um procedimento bastante similar ao original, com a diferença que neste caso o material contaminado fluidizado é que será levado a uma calha e as partículas de mercúrio neste material irão aderir a superfície da calha por amalgamação com o metal de revestimento. O efeito colateral é que as partículas de ouro existentes poderão eventualmente amalgamar com o mercúrio depositado.

Após o processamento do material, as placas eletrorevestidas serão aquecidas em uma retorta ou capela até que o amálgama se degrade e o mercúrio evapore e possa ser recuperado em um condensador.

Experimentos realizados pelo CETEM em 2021 (SOBRAL e ARAÚJO, 2022) e a aplicação experimental de placas de cobre eletrorevestidas com prata na Colômbia (RODRIGUEZ e ESPINOSA, 2021) obtiveram resultados eficientes na descontaminação de solos (Figura 35).

Figura 35. Placas de cobre eletrorevestidas de prata usadas para remoção de mercúrio de solos na Colômbia

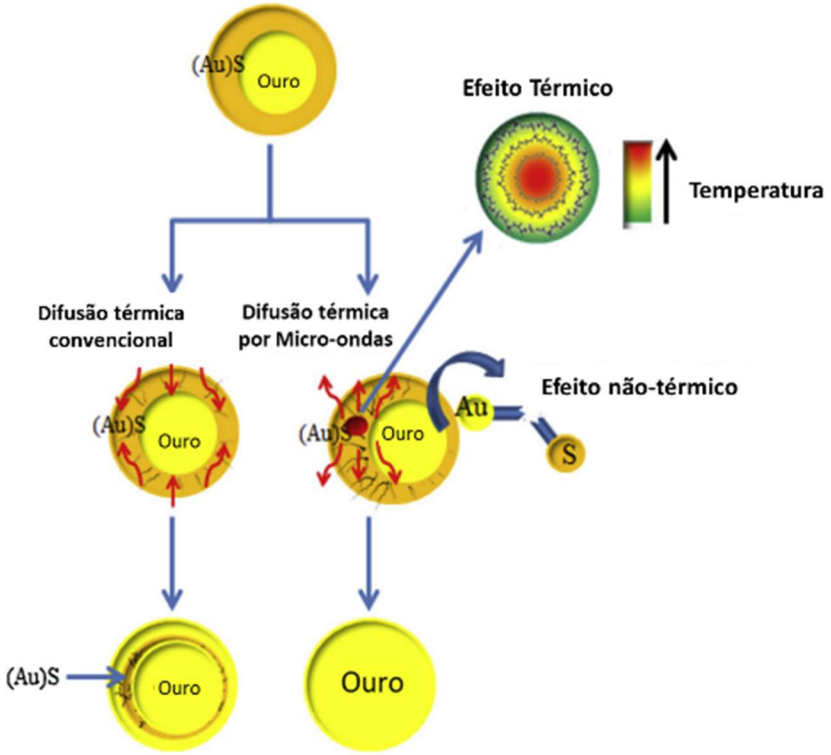
Fonte: Porjeto Pure Eath (RODRIGUEZ e ESPINOSA, 2021).

5.1.5. LIBERAÇÃO DO OURO REFRATÁRIO POR MICROONDAS

O processo utiliza radiação de micro-ondas, ondas eletromagnéticas com frequências geralmente na faixa de 300 MHz a 300 GHz, para aquecer seletivamente minerais contendo ouro, e pode alterar a matriz mineral, facilitando a liberação do ouro para posterior concentração.

Quando aplicadas a materiais, as micro-ondas interagem com os dipolos elétricos e íons, causando aquecimento. O aquecimento seletivo permite que os materiais contendo ouro aqueçam mais rapidamente em comparação com a ganga (matriz rochosa ou outros minerais não valiosos). Este aquecimento diferencial pode ser explorado para facilitar a liberação do ouro dos minerais de sulfeto ou de outros compostos mesmo estando encapsulado (Figura 35). Esta tecnologia trabalha como um catalisador para outros métodos, liberando ou expondo a partícula de ouro, aumentando a eficiência de métodos de concentração e principalmente da lixiviação por cianetação.

Figura 36. Liberação do ouro encapsulado por meio de microondas



Fonte: LI et. al, 2020

O processo mostra-se adequado para minérios refratários, onde os métodos convencionais apresentam limitações, podendo diminuir a necessidade de reagentes tóxicos em etapas de lixiviação, reduzir o consumo geral de energia elétrica (por redução de dispêndio em etapas mecânicas e químicas) e viabilizar a recuperação de ouro residual pelo aproveitamento de rejeitos. As limitações dessa tecnologia envolvem a necessidade de infraestrutura e dispositivos industriais de alta potência, a presença de minerais que respondam ao aquecimento por micro-ondas.

Embora atualmente distante da realidade da MAPE devido ao alto custo e, principalmente, necessidade de um nível maior de infraestrutura e de refinamento técnico operacional, é possível que esta tecnologia venha a se tornar popular nos próximos anos e seja utilizada a partir da migração da atividade econômica para a exploração de depósitos primários. A disponibilidade de tecnologia nacional já desenvolvida (Figura 34) e iniciando a sua comercialização reforça essa expectativa.

Figura 37. Equipamento de micro-ondas utilizado para a recuperação de ouro

Fonte: Innovatus Brasil

5.2. PROCESSOS QUÍMICOS

5.2.1. LIXIVIAÇÃO POR CIANETAÇÃO

O processo de lixiviação usa uma solução de cianeto de sódio ou potássio para dissolver o ouro, formando um complexo solúvel que pode ser facilmente recuperado. É geralmente utilizada para recuperar minérios de ouro sulfetados e, embora seja relativamente simples (se comparada a outros métodos alternativos), demanda necessariamente características específicas, como partículas de granulometria fina (< 0,10 mm) e exposição do mineral-minério ao cianeto (SOUZA e LINS, 1989 apud CARVALHO, 2023).

Nesta seção são descritos os principais tipos de sistemas de lixiviação por cianetação empregados no setor da MAPE. De modo geral, a lixiviação por cianeto pode ocorrer pelos seguintes métodos:

i. pilhas de estéril ou de rejeitos (*dump leaching*) e pilhas de minério (*heap leaching*);

ii. tanques estacionários (*vat leaching*) ou tanques com agitação mecânica (GRAYSON, 2007; STAPPER et al., 2021; OLIVEIRA et al., 2024);

iii. cianetação intensiva (STAPPER et al., 2021).

A lixiviação em pilhas é geralmente usada para reprocessar grandes volumes de rejeitos (*dump leaching*), empilhado em revestimentos impermeáveis ("almofada de lixiviação"), onde a solução de cianeto alcalino é pulverizada ou percolada de cima (topo da encosta) e deixada vazar através do material, dissolvendo o ouro conforme ele se move, sendo continuamente reciclada por dreno coletor (STAPPER et al., 2021). As concentrações de NaCN aplicadas em torno de 1:1.000 partes (menos concentradas do que aplicações para lixiviação em tanques ou lixiviação agitada). Esse tipo vem sendo utilizada sendo utilizada com baixas recuperações, alcançando valores da ordem de 50% a 85%, embora com baixos investimentos iniciais e baixos custos operacionais (OLIVEIRA et al., 2024).

De acordo com (STAPPER et al., 2021), outro tipo de lixiviação é a lixiviação em tanques (*vat leaching*), onde o minério moído é colocado em cubas, grandes tambores, tanques ou piscinas, sobre um revestimento de areia e/ou materiais filtrantes com um dreno abaixo, com adição de cal viva à superfície ou mistura com o minério, e solução alcalina de cianeto introduzida por mangueiras no topo dos

tanques. A solução de cianeto preenche os espaços dos poros, submergindo o minério e dissolvendo o ouro para formar uma solução de cianeto-ouro que passa pelo dreno e é bombeada de volta até que a solução não possa mais lixiviar ouro. Esse tipo de lixiviação permite maior controle de temperaturas, acidez (pH) e taxas de fluxo de solução, fornecendo vantagens significativas sobre a lixiviação em pilha e resultando em rapidez e eficiência quando comparada à lixiviação em pilha.

Para a lixiviação por agitação, tanques de aço (às vezes de cimento) são usados, normalmente de 2.000 a 20.000 litros, com a lama (25–50% de sólidos) e a solução acionadas mecanicamente por um impulsor com injeção de ar comprimido e adição de cal ou soda cáustica para manter o pH entre 10 e 12 (STAPPER et al., 2021).

Outro processo é de Cianetação Intensiva (CI), que possibilita a redução do volume de cianeto de sódio (NaCN) e de outros reagentes, bem como o tempo do processo que lixivia apenas um concentrado mineral produzido por flotação, centrifugação, lavagem, mesa vibratória, etc. A CI reduz a quantidade de polpa afetada por NaCN (rejeitos) que entra no fluxo de resíduos que deve ser gerenciado ativamente, com grande economia de custos. Pode ser operada de micro a escala semi-industrial (STAPPER et al., 2021).

Após a lixiviação do minério, o ouro é dissolvido na solução na forma de um complexo aquoso de ouro-cianeto $[Au(CN)_2]^-$. A partir dessa solução, o ouro metálico pode ser recuperado por diferentes métodos, incluindo:

i. adsorção em carvão ativado, que apresenta uma taxa de recuperação de aproximadamente 99,85%;

ii. adsorção em resinas de troca iônica, com recuperação de cerca de 96,31%; ou

iii. precipitação com pó de zinco, que alcança 99% de recuperação.

O método mais amplamente utilizado é a adsorção em carvão ativado, um processo de múltiplas etapas de extração e purificação do ouro. No primeiro estágio, ocorre o carregamento do carvão ativado, onde os complexos de ouro-cianeto são adsorvidos na superfície porosa do carvão, devido às interações físico-químicas favorecidas por sua estrutura. Esse processo pode ocorrer de duas formas principais: CIP (Carbon-in-Pulp), no qual o carvão ativado é adicionado à polpa após a lixiviação, e CIL (Carbon-in-Leach), onde a adsorção ocorre simultaneamente à lixiviação.

Após a saturação do carvão com ouro, ele é separado da polpa por peneiramento e encaminhado para a etapa de eluição, onde o ouro é tratado por meio de uma solução quente contendo cianeto de sódio e soda cáustica (NaOH), geralmente sob alta temperatura e pressão para aumentar a eficiência do processo. Isso resulta em uma solução eluída altamente concentrada em ouro, a partir da qual o metal é recuperado por eletrodeposição (eletro-obtenção). Nesse processo, uma corrente elétrica provoca a deposição do metal sobre catodos metálicos, geralmente de aço inoxidável. O material precipitado nos catodos é removido e submetido a uma digestão ácida, utilizando ácido sulfúrico concentrado, que dissolve impurezas como cobre, ferro e prata, deixando o ouro em sua forma metálica mais pura. A fração sólida resultante é lavada, seca e posteriormente enviada para a fundição para separar o ouro e eliminar qualquer resíduo remanescente. O produto final dessa etapa é o ouro doré, uma liga metálica contendo ouro e pequenas quantidades de prata e outros metais, que posteriormente é refinada por processos como a cloração de Miller ou eletrorrefino, a fim de atingir altos teores de pureza comercial.

A precipitação com pó de zinco, o processo Merrill-Crowe, envolve a remoção do oxigênio dissolvido na solução cianetada, seguida da adição de um pó fino de zinco. O ouro precipita na forma de partículas muito finas (< 50 μm), que são então recuperadas por filtração em um filtro de pré-revestimento. Embora esse método apresente alta eficiência (até 99%), ele é mais indicado para soluções com alto teor de ouro e baixo teor de impurezas (STAPPER et al., 2021).

Cabe destacar que embora os sistemas de lixiviação agitada tenham uma demanda maior por capital e conhecimento técnico, esses métodos têm maior recuperação de ouro e, como resultado, estão substituindo sistemas de lixiviação de tanques menos eficientes em muitas regiões ao redor do mundo onde a cianetação é comum pela MAPE (STAPPER et al., 2021).

Dentre os desafios para o setor da MAPE, estão o controle e monitoramento do pH da solução e, não importa a escala da operação, é fundamental que todos os trabalhadores, técnicos e operadores de NaCN, estejam adequadamente equipados e bem treinados para medir e monitorar os níveis de NaCN e pH – e entendam a necessidade de fazer isso (STAPPER et al., 2021). A solução de cianeto deve ser mantida fortemente alcalina para evitar a geração de gás cianeto de hidrogênio (HCN) altamente tóxico (GRAYSON, 2007).

Um dos principais riscos do uso de lixiviação em garimpos é a crescente utilização de piscinas de lixiviação sem um rigoroso controle de pH, pois a acidificação da solução pode levar à liberação do gás cianeto de hidrogênio, que é letal para humanos. Outro desafio é a concentração de cianeto adicionado para dissolver o ouro ser muito maior do que o requisito estequiométrico devido a diversas interferências, apesar do processo ser tão eficaz quanto a amalgamação e economicamente viável para minérios de baixo teor, considerando que a geologia do depósito, assim como a composição mineralógica do minério, determina as condições de lixiviação (OLIVEIRA et al., 2024).

O uso de cianetação para recuperar o ouro está aumentando na MAPE e, quando responsável, deve ser parte da solução (STAPPER et al. 2021 apud KEANE et al., 2023) e ainda que os efeitos na saúde humana estejam sendo estudados, tem potencial para substituir parcialmente o uso de mercúrio (GUIMARÃES et al., 2011; LEUNG e LU, 2016; NYANZA et al., 2017; KNOBLAUCH et al., 2020 apud CHENG et al., 2023), podendo ser considerada para projeções futuras.

No Brasil, esta tecnologia está começando a ser introduzida ainda de modo experimental em operações garimpeiras que migraram para a exploração do minério primário (refratário), na Região da Baixada Cuiabana, Estado do Mato Grosso. A Equipe de Campo do Projeto teve a oportunidade de realizar uma visita técnica à Cooperativa de Desenvolvimentos Minerais de Poconé (CooperPoconé), no município de Poconé, para conhecer o Reator de Lixiviação Intensiva tipo Pelicano (Figura 38), em fase final de testes dentro do processo de licenciamento ambiental. O equipamento opera um processo de lixiviação cíclica em circuito fechado com base numa solução de cianeto de sódio, com posterior separação do ouro por meio de eletrodeposição. A planta conta com uma unidade de tratamento, na qual ocorre a oxidação dos cianetos excedentes do processo e o tratamento dos efluentes e da solução lixiviante saturada, bem como recuperadas as partículas de ouro que ficaram retidas no sistema, com garantia de máxima eficiência no uso dos insumos e que não sejam emitidos poluentes para o meio ambiente (IN THE MINE, 2024).

Figura 38. Reator de lixiviação tipo Pelicano

Foto: Rafael Lacal, 2022.

5.2.2. LIXIVIANTES ALTERNATIVOS AO CIANETO

5.2.2.1. Tioureia

A tioureia [$CS(NH_2)^2$] é um composto orgânico classificado pelo INCHEM/OMS como "tóxico". O método da tioureia usa uma solução fraca de tioureia na presença de um agente oxidante que forma dissulfeto de formamidina, cujo papel é oxidar o ouro para formar um complexo ouro-tioureia em solução para, em seguida, precipitá-lo. O ferro férrico (Fe^{3+}) é usado por ser mais eficaz em comparação com peróxido de hidrogênio, peróxido de sódio, ozônio, permanganato de potássio (GRAYSON, 2007). A formamidina atua como um oxidante e como um agente complexante, fornecendo cerca de 50% dos ligantes para a complexação, tornando a lixiviação do ouro pela tioureia mais rápida do que a lixiviação por cianeto. Em uma etapa final, a formamidina se decompõe irreversivelmente em cianamida e enxofre elementar, sendo o enxofre um problema potencial por formar um revestimento “pegajoso” de grãos finos que pode inibir a lixiviação do ouro (GRAYSON, 2007).

A tioureia pode lixiviar >90% de ouro mais fino que cerca de 150 µm, mas é lenta para lixiviar ouro mais grosseiro e deve estar presente em excesso coma

proporção de agentes complexantes e oxidantes deve ser cuidadosamente ajustada para evitar oxidação excessiva e consequente uso excessivo de reagentes (GRAYSON, 2007).

O potencial da tioureia para dissolução de ouro só foi considerado uma alternativa ao cianeto nos últimos 20 anos, mas o alto custo em relação ao cianeto, a alta taxa de consumo durante o processo de lixiviação de ouro e o complicado processo de recuperação de ouro tornaram-se um obstáculo para sua adaptação comercial (LA BROOY et al., 1994 apud TORKAMAN et al., 2021).

5.2.2.2. Tiossulfato

Utiliza o tiossulfato de amônio ou sódio como lixiviante, sendo adequado para minerais refratários e materiais contendo ouro em solução sólida. Lixivia o ouro em soluções neutras ou ligeiramente alcalinas. Requer catalisadores como cobre e amônia. É considerado mais seguro e sustentável que o cianeto, apresenta baixa toxicidade e grande potencial para uso em minerais difíceis de tratar com cianeto (CARVALHO, 2023).

No entanto, o alto consumo de tiossulfato é um dos gargalos para a ampla industrialização, não sendo considerada não competitiva em relação à cianetação, caso o consumo controlado seja <10 kg/ ton. de minério (YEN et al., 1996 apud XU et al. 2017), uma vez que o consumo é geralmente maior que 25 kg/ton. de minério e, às vezes, até excede 100 kg/ton. de minério, como no caso de 165 kg/ ton. de minério para um minério de ouro contendo cobre (AYLMORE e MUIR, 2001 apud XU et al., 2017).

As principais razões para o consumo excessivo de tiossulfato são as seguintes: o tiossulfato é metaestável e facilmente oxidado por Cu(II) e, além disso, certos minerais associados podem acelerar sua oxidação (XEN et al., 2008 e XU et al., 2016 apud XU et al. 2017).

O tiossulfato foi introduzido na década de 1900 para fins de lixiviação de ouro em um procedimento conhecido como “Processo Von Patera” por (AYLMORE e MUIR, 2001 apud TORKAMAN et al., 2021); e que, embora se tenha tentado adotar esse método para fins comerciais, o alto consumo de reagente durante a extração e a lentidão do processo em comparação com a cianetação impediram que esse objetivo fosse alcançado (HILSON e MONHEMIUS, 2006 apud TORKAMAN et al., 2021).

São exemplos a comercialização de uma planta de lixiviação de tiossulfato na operação Goldstrike da Barrick Gold, além de um estudo com a aplicação da lixiviação agitada com tiossulfato em uma MAPE no Zimbábue, que atingiu cerca de 54% de extração de ouro (Manzila; Moyo; Petersen, 2022 apud CARVALHO, 2023).

5.2.2.3. Tiocianato

A lixiviação de tiocianato é particularmente eficaz em minério de ouro refratário de rocha dura rico em sulfeto porque o processo requer um ambiente extremamente ácido, o que é gerado pela quebra dos sulfetos no minério. A solução de tiocianato ácido é usada para lixiviar metais preciosos como um complexo de metal precioso-tiocianato e pode conter uma grande proporção molar de ferro férrico. O metal precioso é removido da solução de tiocianato grávida, transferindo os metais preciosos para o complexo de metal precioso-cianeto e, em seguida, carregando-o em material absorvente. O cianeto residual na solução de lixiviação de tiocianato é convertido em tiocianato para posterior lixiviação.

O tiocianato de amônio ou potássio é usado para lixiviar prata e ouro, onde a solução grávida é direcionada para uma calha vibratória e sulfeto de potássio é adicionado para precipitar sulfeto de prata, recuperado por sedimentação e filtragem. O líquido sobrenadante é direcionado para um tanque de reação para recuperação de ouro usando metal de zinco triturado.

A lixiviação de tiocianato foi inventada na década de 1890, mas foi amplamente ignorada devido à popularidade da lixiviação de haletos, e ao aumento da lixiviação de cianeto. Assemelha-se à lixiviação por tiossulfato, mas com reatividade química mais baixa. Os resíduos tóxicos requerem tratamento, mas o impacto é menor que o da cianetação.

Gould et al. (2012 apud TORKAMAN et al., 2021) estudaram a degradação e a biodegradação do cianeto em tiocianato e Wilson-Corral et al. (2012 apud TORKAMAN et al., 2021) relataram que o tiocianato de amônio é degradado em 80% em 28 dias, e o tiocianato é considerado biodegradável em países da OCDE. LOGSDON et al. (1999 apud TORKAMAN et al., 2021) citam que processos físicos, químicos e biológicos naturais transformam a maioria dos complexos de cianeto em produtos químicos menos tóxicos.

5.2.2.4. Haletos

A lixiviação por haletos, como cloro, iodo ou bromo, é conhecida desde os anos 1800, mas quase desapareceu pela competição com a amalgamação e depois a cianetação. O bromo e o iodo são semelhantes em suas reações e são um forte agente oxidante com taxa de dissolução mais alta do que a lixiviação com cianeto. (CARVALHO, 2023).

Os principais desafios desses métodos são os altos custos dos reagentes, a dificuldade de manuseio, problemas de saúde e nenhuma aplicação industrial (JOSEPH *et al.,* 2022 apud CARVALHO, 2023).

O processo iGoli de cloração, da MINTEK, que usa uma mistura de ácido clorídrico e hipoclorito de sódio para dissolver ouro em um concentrado e o ouro na solução é precipitado com metabissulfito de sódio, está ganhando interesse entre mineradores de ouro artesanais e de pequena escala na África do Sul como uma alternativa ao mercúrio (MAHLATSI e GUEST 2003 apud KEANE et al., 2023).

5.2.2.5. Lixiviantes patenteados alternativos ao cianeto

Keane et al. (2023) citam que algumas iniciativas usam lixiviantes patenteados como Cycladex (Cycladex 2023), Jinchan GDA (Beyuo et al., 2016) e CNLITE ECO Leaching Agent (CNLITE, 2023).

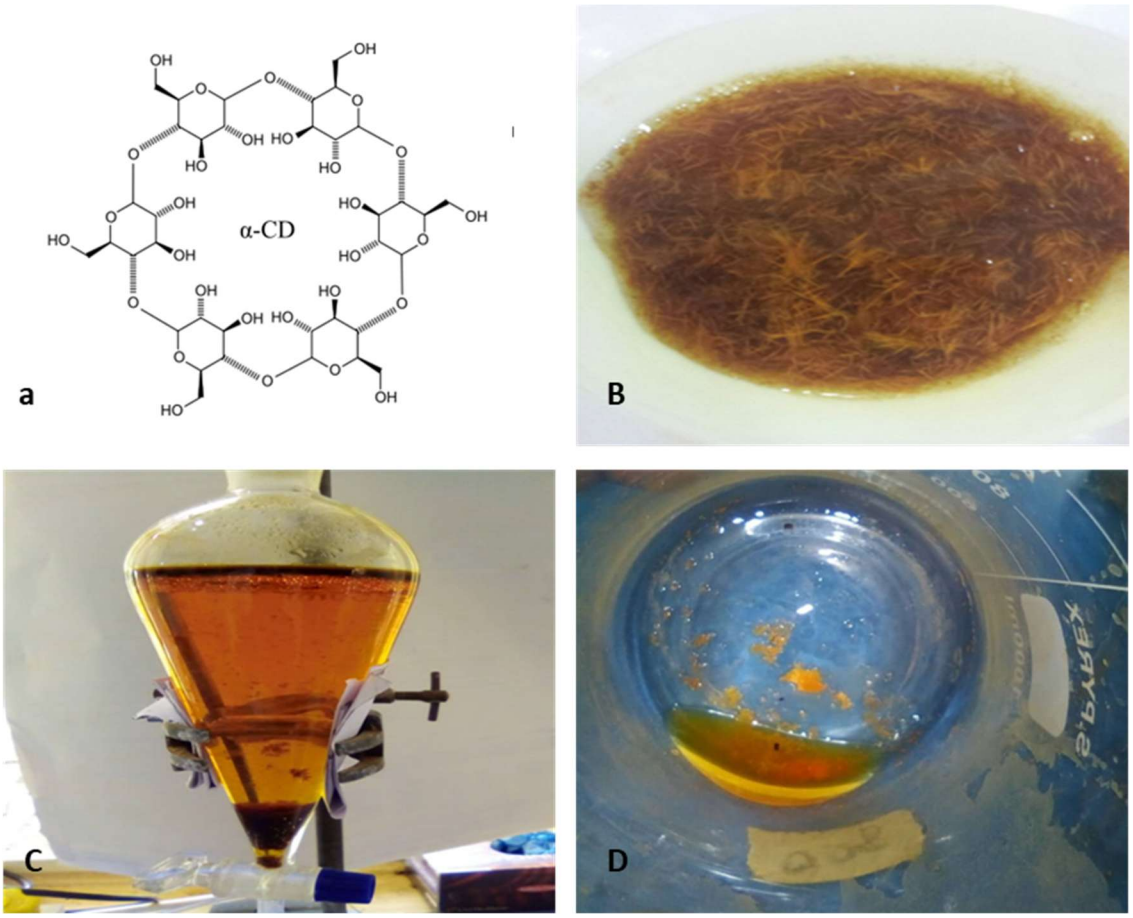
Nenhum dos produtos citados está disponível no mercado interno do Brasil neste momento e certamente serão requeridos testes de eficiência comparativa, caso venham a ser comercializados no país. Dado que os processos de cianetação ainda não estão disseminados na MAPE de ouro do Brasil, considera-se remota a possibilidade de uso dessas eventuais alternativas.

5.2.3. LIXIVIAÇÃO ASSISTIDA COM ALFA-CICLODEXTRINA

Resultado de uma descoberta casual, um método inovador da chamada nanohidrometalurgia é o uso da alfa-ciclodextrina (α-CD), um inofensivo carboidrato derivado do amido de milho, em conjunto com algum haleto (cloro ou bromo), em substituição ao cianeto, para capturar seletivamente partículas de ouro e concentrá-las em solução aquosa (Figura 39). (MEDEIROS, 2017).

O processo ainda se encontra em fase de testes, mas os resultados satisfatórios obtidos por ANTHONY et al. (2020), recuperando 70% do ouro do minério testado, ou o dobro do desempenho da amalgamação por mercúrio — mostra que esta tecnologia pode ser uma solução interessante para a MAPE, quando minérios refratários ou expostos, estiverem envolvidos.

Figura 39. Estrutura química da alfa-ciclodextrina e aspectos do seu uso experimental para recuperação de partículas de ouro



a. estrutura química da alfa-ciclodextrina; b. alfa-ciclodextrina complexando com o ouro;
c. precipitação de ouro; d. ouro recuperado com alfa-ciclodextrina.

Fonte: Anthony et al., 2020

5.2.4. LIXIVIAÇÃO ASSISTIDA POR AMINOÁCIDOS (GLICINA)

A glicina é um aminoácido não tóxico e biodegradável, com aparência semelhante ao açúcar, recuperável e reciclável, capaz de lixiviar seletivamente metais básicos e preciosos (como o ouro), deixando ferro, mercúrio ou arsênio em resíduos. Além disto, pode funcionar sinergicamente com uma variedade de lixiviantes (O'MALLEY, 2023).

A lixiviação assistida por aminoácidos usa uma mistura de cianeto e glicina para recuperar ouro do minério. A glicina se liga bem a minerais que são difíceis de separar do ouro durante o processo de cianetação, como o cobre, deixando o cianeto para lixiviar ouro de concentrados de ouro-cobre (MINERALS AND PROCESS SOLUTIONS 2023 apud KEANE et al., 2023).

Pode atingir uma redução de 50-95% no cianeto necessário para extrair a mesma quantidade ou maior de metais preciosos em comparação com a cianetação, com equivalência de tempo ou maior rapidez e pode usar processos existentes como carvão ativado ou Merrill Crowe para recuperar os metais preciosos (INTERNATIONAL MINING, 2022).

As principais perdas de glicina (<5%) ocorrem por adsorção e perda de água no resíduo e oxidação da glicina (<1%) pode ocorrer, mas é mínima sob condições operacionais (O'MALLEY, 2023).

Para o ouro, foi inventado o processo GlyCat™ da MPS para reduzir o consumo de cianeto, mantendo a recuperação de ouro para minérios de depósitos contendo cobre. O GlyCat foi projetado para melhorar a dissolução de ouro e cobre em minérios de ouro/cobre onde a glicina é usada como um catalisador com cianeto em um ambiente de lixiviação sem cianeto. Ele não substitui o cianeto, mas, na verdade, melhora sua capacidade de lixiviação ao lidar com o alto consumo de cianeto dentro desses corpos de minério de ouro-cobre. Funciona efetivamente em pHs alcalinos e temperaturas ambientes (sem custo de aquecimento ou vasos de pressão) e vêm com baixos custos operacionais devido ao seu baixo consumo e características de recuperação/reciclagem, de acordo com a empresa. A empresa Draslovka sediada na República Tcheca chegou a um acordo para lançar um programa global de testes e implementação para GlyCat, seu produto de lixiviação de ouro à base de glicina, em várias minas administradas pela Barrick Gold. Este é o primeiro teste desse tipo e pode levar a uma implementação global (INTERNATIONAL MINING, 2022).

Dependendo do minério, pode incluir: redução de 20-80% no uso de cianeto, ao mesmo tempo em que reduz ou elimina totalmente os requisitos de desintoxicação de cianeto; maiores recuperações em um momento em que as descobertas de ouro e cobre estão em declínio constante; redução média de 25% e até 50% nos custos de processamento (INTERNATIONAL MINING, 2022).

5.3. PROCESSOS PIROMETALURGICOS

5.3.1. PIROMETALURGIA COM BÓRAX

Esse método envolve a fusão do material concentrado em altas temperaturas com o uso de bórax para facilitar a fusão e separação das impurezas, permitindo a obtenção de ouro metálico, por meio das seguintes etapas: i. preparação do concentrado usando uma separação gravitacional com remoção da maior parte do material estéril, deixando ouro e algumas impurezas metálicas que podem ser removidas com ímã; ii. adição de massa de bórax (borato de sódio) na mesma proporção do concentrado em um cadinho refratário que reduz o ponto de fusão do ouro e separa as impurezas; iii. o material é aquecido em um forno de alta temperatura (cerca de 1.200 °C) ou com um maçarico, ocorrendo o derretimento do ouro durante o aquecimento que se separa do material restante, formando uma massa metálica no fundo do cadinho e se solidifica, após o resfriamento, em forma relativamente pura; iv. após a fusão, o ouro puro é coletado, enquanto as impurezas ficam na forma de escória composta por bórax que se complexifica em impurezas de silicato e óxido (ESDAILE e CHALKER, 2018).

O método foi testado com sucesso na Indonésia, Tanzânia e Bolívia, além das Filipinas e no Zimbabue. Demonstrações usando bórax ao invés de mercúrio em minérios de zonas de cisalhamento em vários locais, resultaram em recuperação de cerca de 30% a mais de ouro e o processo 30% mais rápido que a amalgamação (APPEL e NA-OU, 2014). A Figura 40 mostra um exemplo de fundição de ouro com bórax em ambiente de MAPE.

De acordo com VEIGA e GUNSON, (2020 apud TORKAMAN et al., 2021), o processo só pode ser usado em concentrados com altos teores de ouro (> 5% Au) e sem sulfetos; precisa de um forno de fusão de ouro, um equipamento caro; e requer capacitação para operar.

Figura 40. Processamento de ouro com bórax no norte das Filipinas

Foto: Peter Appel, in GRAYSON, 2007.

A falta de acessibilidade e alto custo para aquisição de materiais/equipamentos para usar o método nas regiões de MAPE de ouro; e, adicionalmente, o não convencimento dos mineradores sobre as maiores taxas de recuperação de ouro pelo método do bórax em relação à amalgamação de mercúrio, resultaram no fracasso da adoção desse método pelo setor (ZOLNIKOV e RAMIREZ ORTIZ, 2018 apud TORKAMAN et al., 2021).

5.4. PROCESSOS BIOTECNOLÓGICOS

5.4.1. BIOLIXIVIAÇÃO, BIOOXIDAÇÃO OU LIXIVIAÇÃO BACTERIANA

A biolixiviação pode ser definida como um processo de dissolução de sulfetos minerais que resulta da ação de um grupo de micro-organismos (PRADHAN et al., 2008 apud OLIVEIRA et al., 2010). O processo envolve uma pré-concentração, seguida pela introdução de bactérias no material em condições controladas (as mais comuns são *Acidithiobacillus ferrooxidans e Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*) que oxidam os minerais sulfetados (pirita, arsenopirita), liberando o ouro encapsulado na matriz mineral (OLIVEIRA et al., 2010).

A lixiviação é feita em tanques ou pilhas com o material mantido úmido d em condições ideais de temperatura, pH e oxigenação para promover a atividade bacteriana (OLIVEIRA et al., 2010).

O ouro liberado é dissolvido em soluções lixiviantes e recuperado por métodos tradicionais (como precipitação química ou eletrodeposição). Além das características químicas do mineral, os processos bio-hidrometalúrgicos para a solubilização de metais são também influenciados por diversos parâmetros ambientais que podem intervir na eficiência e rendimento das operações (Figura 41) (GIESE, 2017).

Figura 41. Aspectos físico-químicos, microbiológicos e minerais envolvidos na biolixiviação

Fonte: GIESE, 2017

A demanda crescente de minerais e a possibilidade do esgotamento de reservas com altos teores (>1%), impõem a necessidade de extrair metal a partir de minérios de baixos teores e de rejeitos, fazendo com que processos bio-hidrometalúrgicos, como a biolixiviação, com baixos custos de investimento e de operação para uma extração economicamente viável, apresentem grande potencial como alternativa à amalgamação (OLIVEIRA et al., 2010).

5.4.2. LIXIVIAÇÃO COM USO DE PLANTAS CIANOGÊNICAS

Em 2021, TORKAMAN et al. publicaram os resultados de um estudo realizado em pareceria com EMBRAPA, Centro de Mandioca e Frutas, localizada em Cruz das Almas, Bahia, para avaliar o uso de plantas cianogênicas como componente de uma alternativa viável para extração de ouro, inclusive refratário, acessível para a MAPE.

A proposta sob estudo envolveu o usa da “maripueira”, ou leite de mandioca, um subproduto da indústria da mandioca (*Manihot esculenta*). Trata-se de um líquido amarelo-claro leitoso resultante do esmagamento da mandioca durante o processo da fabricação de farinha. Durante esse processo, glicosídeos cianogênicos existentes naturalmente na mandioca, como em outras plantas cianogênicas, sofrem hidrolise e e liberam ácido cianídrico (HCN), também conhecido como ácido prússico, que será um dos componentes da maripuera (por isso essa substância pode ser usada inclusive para controlar formigas e outros insetos). Testes de laboratório mostraram que a quantidade de cianeto livre na maniupeira resultante da variedade de mandioca brava usada no experimento foi de 267 ± 80 mg/l (TORKAMAN et al., 2021).

O ácido cianídrico em fase líquida não é em condições normais um bom lixiviante para ouro devido à sua lentidão. Por isso é necessário ajustar o PH da manipueira para 10,5 mediante a adição de uma solução de hidróxido de sódio (NaOH), o que também ajuda a prevenir a formação de gás cianídrico (que é tóxico).

O líquido assim obtido foi aplicado em diferentes proporções com o minério de ouro usado para testes, com o cuidado de sempre manter o PH em 10,5. Como resultado, os experimentos conseguiram extrair em média 50% do ouro contido no minério, quando usada uma proporção de sólidos (minérios)/ líquido (solução) de 20%, durante 24h. Comparativamente, usando uma solução de Cianeto de sódio (NaCN) na mesma proporção sólidos líquidos de 20%, e também por 24h, foi obtida uma extração de ouro de 85,7% (TORKAMAN et al., 2021).

Todo o cianeto da manipueira foi consumido durante o processo, gerando um resíduo seguro (que poderia ser em tese usado para remediação do solo devido aos nutrientes nele contidos).

Os resultados, portanto, foram considerados animadores, por ser apenas uma abordagem inicial passível de aprimoramento e porque se trata de um minério que por sua natureza refratária geraria um rendimento muito menor se usado mercúrio, e provou que possível estabelecer um processo simples, barato, suficientemente

eficiente, com potencial para substituir os caros equipamentos de cianetação em um contexto de MAPE com redução dos riscos associados ao uso de cianeto de sódio.

Importante mencionar que o cultivo da mandioca (98 espécies) é feito no mundo inteiro e provê o sustento de 800 milhões de pessoas como alimento básico (ROGERS e APPAN, 1973; BYJU e SUJA, 2020 apud TORKAMAN et al., 2021). quando realizado nas proximidades de frentes de lavra da MAPE, pode unir o uso da manipueira pela MAPE com a produção de farinha de mandioca, resultando em benefícios para ambos os lados e redução de poluição.

Além disso, outra planta cianogênica importante é o bambu (família Poacea, com mais de 1250 espécies em 75 gêneros em todo o mundo), com vasta utilização principalmente na Ásia.

Embora o aprofundamento das pesquisas seja necessário, esta biotecnologia parece suficientemente promissora para receber atenção e investimentos.

5.4.3. BIOEXTRATOR ELABORADO COM EXTRATO DE PAU-DE-BALSA

Um potencial substituto direto do uso de mercúrio na extração de ouro que vem sendo intensamente pesquisado no Brasil e que poderia ser uma solução inovadora e sustentável para a atividade garimpeira, é o uso de um “bioextrator”, elaborado a partir de extratos vegetais obtidos de Pau-de-Balsa (*Ochroma pyramidale*).

A base para desenvolvimento desta biotecnologia é o uso tradicional e de forma artesanal de seiva de folhas esmagadas dessa planta nativa da Amazônia, para separar o ouro aluvionar dos minérios de ganga, praticado principalmente na região de Chocó, na Colômbia.

O processo tradicional (Figura 42 “a” a “d”) consiste em esmagar manualmente as folhas da planta, e aplicar o sumo obtido diretamente no concentrado da bateira, fazendo a os metais densos ficarem depositados no fundo enquanto do instrumento, enquanto as parcelas leves são levadas pela água.

As pesquisas brasileiras, já em fase avançada de desenvolvimento, buscam a otimização desse conhecimento tradicional e estão sendo realizadas em paralelo e em âmbitos complementares por duas equipes de cientistas brasileiros.

Figura 42. Processo tradicional de uso de seiva de pau-de-balsa.

a. esmagamento manual da folha;
b. folha esmagada;
c. sumo coletado;
d. bateia com ouro e magnetita concentrados com o sumo.

Fonte: BROOKS et al., 2015

A primeira dessas iniciativas, conhecida como “Projeto Ochroma”, é desenvolvida por pesquisadores de um consórcio formado pela Universidade Federal de Rondônia (UNIR), pela Universidade Estadual do Amazonas (UEA), pela Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), e pelo Instituto Militar de Engenharia do Rio de Janeiro, com apoio da Cooperativa dos garimpeiros do Rio Madeira (COOGARIMA), e financiamento pelas fundações de amparo à pesquisa de Rondônia

(FAPERO) e do Amazonas (FAPEAM) (UNIR, 2023). Seu enfoque primário é desenvolver uma metodologia de uso de extrato de pau-de-balsa compatível com a realidade dos garimpeiros ribeirinhos do Rio Madeira, buscando estabelecer modos de produção otimizados que possam ser desenvolvidos em ambiente artesanal, desde o cultivo da planta em plantações comunitárias (associada a outras culturas úteis a subsistência da comunidade), até uma técnica padronizada para rendimento ótimo da biotecnologia, e inclui um programa de educação ambiental (Figura 43) (UNIR, 2023).

Figura 43. Equipe do Projeto Ochroma em ação de capacitação comunitária

Foto: Projeto Ochroma, 2024

A segunda linha de pesquisa é liderada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA) (unidades Florestas e Agrossilvipastoril), em parceria com a Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com a Universidade Estadual de Maringá (UEM), e com a Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), com apoio e patrocínio da Cooperativa dos Garimpeiros do Vale do Rio Peixoto (COOGAVEPE). Este projeto possui um enfoque no modelo produtivo de semi-industrial desenvolvido pelos garimpeiros do Norte do Mato Grosso e Bacia do Tapajós, do Sudoeste Pará, e tem como objetivo principal gerar um produto biotecnológico industrializado de alto desempenho e potencial de produção suficiente para a alta de manda de u=insumos dessas regiões, aliado com a estruturação de uma cadeia econômica associada de

produção de madeira de alta qualidade, gerando uma fonte de renda complementar ou até mesmo alternativa, para as comunidades garimpeiras.

Neste sentido, a equipe liderada pela EMBRAPA além de trabalhar na metodologia mais eficiente para a produção de extrato da planta, para gerar um bioextrator otimizado, trabalha simultaneamente em melhoria de matrizes vegetais para a produção de espécimes de maior desempenho na produção de madeira (que também potencializa a produção do bioextrator) e em modelos de produção agroflorestais ou agrosilvipastoris (Figura 44).

Figura 44. Pesquisa da EMBRAPA para melhoramento de matrizes de pau-de-balsa, em SINPOP/MT.

Foto: EMBRAPA Agrosilvipastoril

A ampliação desse escopo pode ser muito importante para métodos e produtos mais ambientalmente amigáveis, pois a chamada madeira de balsa, leve e resistente, pode substituir várias aplicações que atualmente usam isopor, plástico e fibra de vidro, que vão desde o isolamento térmico e acústico, até a fabricação de rotores de aerogeradores, passando por materiais de acabamento para a indústria de construção civil. Mesmos os resíduos das árvores (toras finas, tortas, galhadas e em alguns casos a casca da árvore) podem ser usados para produção de painéis de madeira.

Por outro lado, a *Ochroma pyramidale* é uma espécie pioneira de crescimento extremamente rápido, que poderia ser utilizada em projetos de reflorestamento na Amazônia.

A eventual introdução do bioextrator de Pau-de-Balsa pode ser uma solução revolucionária, sustentável e de baixo custo para recuperar ouro na MAPE e auxiliar nos processos de descontaminação e diversificação econômica das regiões garimpeiras. Aparente ser extremamente aconselhável investir na conclusão das pesquisas em curso e no eventual desenvolvimento desta biotecnologia, que se comprovada viável — como o otimismo das equipes desenvolvidas traz a esperança de ser — pode trazer uma nova perspectiva para a atividade garimpeira.

5.5. NANOTECNOLOGIA

A nanotecnologia trata de um conjunto de iniciativas que, a partir da pesquisa científica e tecnológica, contemplam a concepção-desenvolvimento-síntese-produção-aplicação de materiais funcionais, dispositivos e sistemas com dimensões físicas nanométricas (1 a 100 nm), e a exploração de novas propriedades e fenômenos derivados dessas escalas, podendo ser segmentadas em duas categorias:

i. nanomateriais, como nano-tubos de carbono, nanopartículas metálicas, nanominerais e nanosistemas biológicos; e

ii. nanoeletrônicos como circuitos integrados, dispositivos de memória, entre outros (CIMINELLI, 2020).

As nanopartículas ou nanominerais tem suas superfícies normalmente modificadas quimicamente e podem desenvolver propriedades catalíticas. Os silicatos cristalinos e amorfos, especialmente argilominerais, óxidos metálicos, e hidróxidos, são os mais importantes representantes do nanominerais (CIMINELLI, 2020).

Os três principais grupos de técnicas para a produção de nanopartículas ou nanominerais são: condensação de vapor; síntese química; e processos no estado sólido como micronização de alta intensidade energética e, dentre as inúmeras aplicações estão bloqueadores solares, cosméticos, tratamentos contra abrasão e corrosão, tintas marítimas, medicamentos, conservação de madeira, esmaltes cerâmicos especiais, conversores catalíticos automobilísticos, dispositivos de filtração

de líquidos e ar, sensores, células de energia e células fotovoltaicas (CIMINELLI, 2020).

Com relação aos nanoprocessos na mineração, inúmeros projetos de pesquisa, em várias partes do mundo, com resultados promissores, antecipam um avanço acelerado na aplicação de nanofundamentos e nanomateriais, sendo alguns exemplos: nanoreatores para recuperação de metais valiosos em efluentes e resíduos; nanopartículas para adsorção e recuperação de ouro; modelamento das interfaces e superfícies minerais para melhor desempenho de processos minerários (CIMINELLI, 2020).

IQBAL et al. (2024) citam que, nos últimos anos, uma ampla gama de nanomateriais foi investigada como adsorventes para a remoção de metais tóxicos da água, pois os nanomateriais, incluindo nanotubos de carbono, grafeno e nanopartículas à base de óxido de metal, possuem excelentes propriedades como alta área de superfície, locais de adsorção aprimorados, boa distribuição de tamanho de poro e comprimento de difusão intrapartícula, superando assim os materiais convencionais.

Os mesmos autores relatam que, embora adsorventes nanodimensionados apresentem capacidade de adsorção extremamente alta para a remoção de íons metálicos, eles têm tendência a se agregar em partículas de grande porte, reduzindo a capacidade de adsorção. E que os pós nanoadsorventes apresentam baixa resistência mecânica e alta queda de pressão, o que torna difícil a recuperação após o processo de adsorção, tornando sua separação da água, de forma economicamente viável, uma grande restrição.

Estudos realizados pelas universidades de Tsinghua, na China, e Manchester, no Reino Unido, mostram que as folhas de grafeno são excelentes para capturar nanopartículas de ouro, razão pela qual criaram um filtro formado por uma base de polímero à qual são incorporadas as folhas de grafeno (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022).

O processo envolve adicionar o filtro de grafeno em uma solução contendo o ouro e, após alguns minutos, o ouro puro aparece nas folhas de grafeno pela queima do mesmo, sem a necessidade de qualquer outro produto químico e nem mesmo de energia. As pesquisas mostraram na época, que em testes de laboratório, 1 grama de grafeno foi suficiente para extrair quase 2 g de ouro, e como o grafeno custava menos

de US$ 0,10/g, o ouro cerca de US$ 70/g e o mercúrio cerca de US$ 9/g, o uso do grafeno mostrou-se economicamente viável (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022). No entanto, produzir o grafeno é um investimento alto, e as pesquisas na área buscam viabilizar essa produção e todas as aplicações do material (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2022).

Estudos sobre filtração de impurezas e purificação por meio membranas nanoporosas para recuperação de metais preciosos, estão sendo desenvolvidos por universidades e startups, e no exterior, empresas de mineração em grande escala vem adotando esses sistemas em plantas-piloto. Sensores nanosensíveis, empregados para monitorar a presença de ouro e de contaminantes em tempo real, melhoram a precisão dessa identificação em diferentes estágios do processamento, a partir de pesquisas iniciadas nos Estados Unidos (INOVAÇÃO TECNOLÓGICA, 2016).

À medida que ocorrem avanços tecnológicos e diminuição de custos, a nanotecnologia poderá desempenhar papel de destaque na mineração sustentável de ouro, considerando a redução do uso de produtos químicos, como cianeto e mercúrio, além da recuperação de áreas degradadas. Embora os custos iniciais sejam elevados, poderá ocorrer aumento de produtividade com a maior recuperação de partículas finas e melhoria da eficiência a longo prazo, tornando-se viável inicialmente para empresas de médio e grande porte, podendo ser posteriormente replicado para a MAPE.

5.6. QUADRO COMPARATIVO ENTRE AS ALTERNATIVAS POTENCIAIS

Para fins de comparação das alternativas analisadas e facilidade de compreensão, as informações contidas nos tópicos anteriores foram sintetizadas na Tabela 3 a seguir e as Figuras 45 a 46 a seguir. Importante destacar que a escolha da alternativa preferencial para cada caso, deverá ser feita a partir de uma análise técnica criteriosa que inclua não apenas os aspectos técnicos mineralógicos, mas também elementos econômicos e sociais que assegurem a continuidade da solução proposta, que deve ser construída com participação dos mineradores como na forma proposta no próximo capítulo.

Tabela 3. Quadro comparativo de alternativas para o uso de mercúrio

Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Amalgamação com Mercúrio	> 1,5 mm = inefetivo 1 mm a 80 µm = 100% 74 a 80 µm = 65% < 60 µm = inefetivo	Recuperação de ouro livre ou exposto	Baixo	Em uso generalizado	Poluente perigoso e persistente
Calhas Simples com carpetes, rifles ou malhas	> 1,0 mm = 100% 1 mm a 0,2 mm = >90% < 100 µm = < 70%	Concentração ou pré-concentração de ouro livre ou não	Baixo	Em uso generalizado	Operação não controlada pode gerar grandes perdas de ouro
Calha Concentradora Espiral	> 2,0 mm = inviável < 2,00 > 80 µm = 90% < 70 µm = inefetivo	Concentração de ouro livre ou não	Baixo	Possível Requer desenvolvimento de equipamentos adaptados à realidade nacional	
Cone Reichert	> 300 µm = inviável 45 µm a 300 µm = 90% < 35 µm = inefetivo	Concentração de ouro livre ou não	Médio	Remoto	
Jigues	> 0,6 mm = 100% < 50 µm = < 50%	Concentração de ouro livre ou não	Médio	Muito Viável	

Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Concentradores centrífugos Knelson / Falcon	> 2,0 mm = inviável 2 mm a 90 µm = 100% < 90 µm > 5 µm = > 85% < 5 µm = inefetivo	Concentração de ouro livre ou não	Médio	Viável	
Centrífuga horizontal Younge	> 1,5 mm = inviável 1,5 mm a 74 µm = 100% < 74 µm = inefetivo	Concentração de ouro livre ou não	Médio	Possível	
Centrífugas horizontais helicoidais	> 6,0 mm = inviável 6 mm a 50 µm = >90% < 50 µm = inefetivo	Concentração de ouro livre ou não	Médio	Viável	
Mesa vibratória Wilfley	> 1,0 mm = inviável 1 mm a 100 µm = 100% < 50 µm = < 75% < 30 µm = inefetivo	Concentração fina	Médio	Viável	Requer ambiente protegido para operação
Mesa vibratória Gemini	> 1,0 mm = inviável 1 mm a 70 µm = 100% 70 µm a 44 µm = >75%(?) < 44 µm = ???	Concentração fina	Médio	Viável	Requer ambiente protegido para operação
Mesa vibratória Bartles-Mozley	> 100 µm = inviável < 100 µm > 5 µm = 95%	Concentração fina	Médio	Possível	Requer ambiente protegido para operação

Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Classificadores espirais	< 0,83 mm > 74 µm = n.d	Pré concentração, concentração	Médio	Possível	
Hidrociclone	> 0,84 mm = inefetivo < 0,84 > 50 µm = 100% < 50 µm = ???	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Médio	Viável	
Cicloclassificador	> 0,84 mm = inefetivo < 0,84 > 50 µm = 100% < 50 µm = ???	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Médio	Promissor Requer desenvolvimento de equipamentos adaptados	
Aeroclassificador	n.d.	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Possível	Requer instalação em central própria e operação especializada
Placa magnetizada Cleangold	n.d.	Recuperação de ouro livre ou exposto	Baixo	Possível Requer testes consistentes	Fornecedor exclusivo
Liberação de partículas por Micro-ondas	n.a.	Recuperação de ouro refratário	Alto	Possível Depende de barateamento dos equipamentos	Requer instalação em central própria e operação especializada

Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Lixiviação a Cianeto (cianetação)	> 0,2 mm = inviável < 0,2 mm = 100%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Possível Equipamentos compactos são viáveis para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos e usa substância tóxica
Lixiviação a Cloro	> 1,2 mm = inviável 1,2 a 1,0 mm = < 85% < 0,6 mm = 90%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Remoto Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos e usa substância tóxica
Lixiviação a Iodo	> 75 µm = inviável < 75 µm = >90%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Remoto Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos
Lixiviação a Bromo	> 75 µm = inviável < 75 µm = > 90%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Remoto Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos
Lixiviação a Tiocianato ou Tiosulfato	> 75 µm = inviável < 75 µm = > 80%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Possível Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos

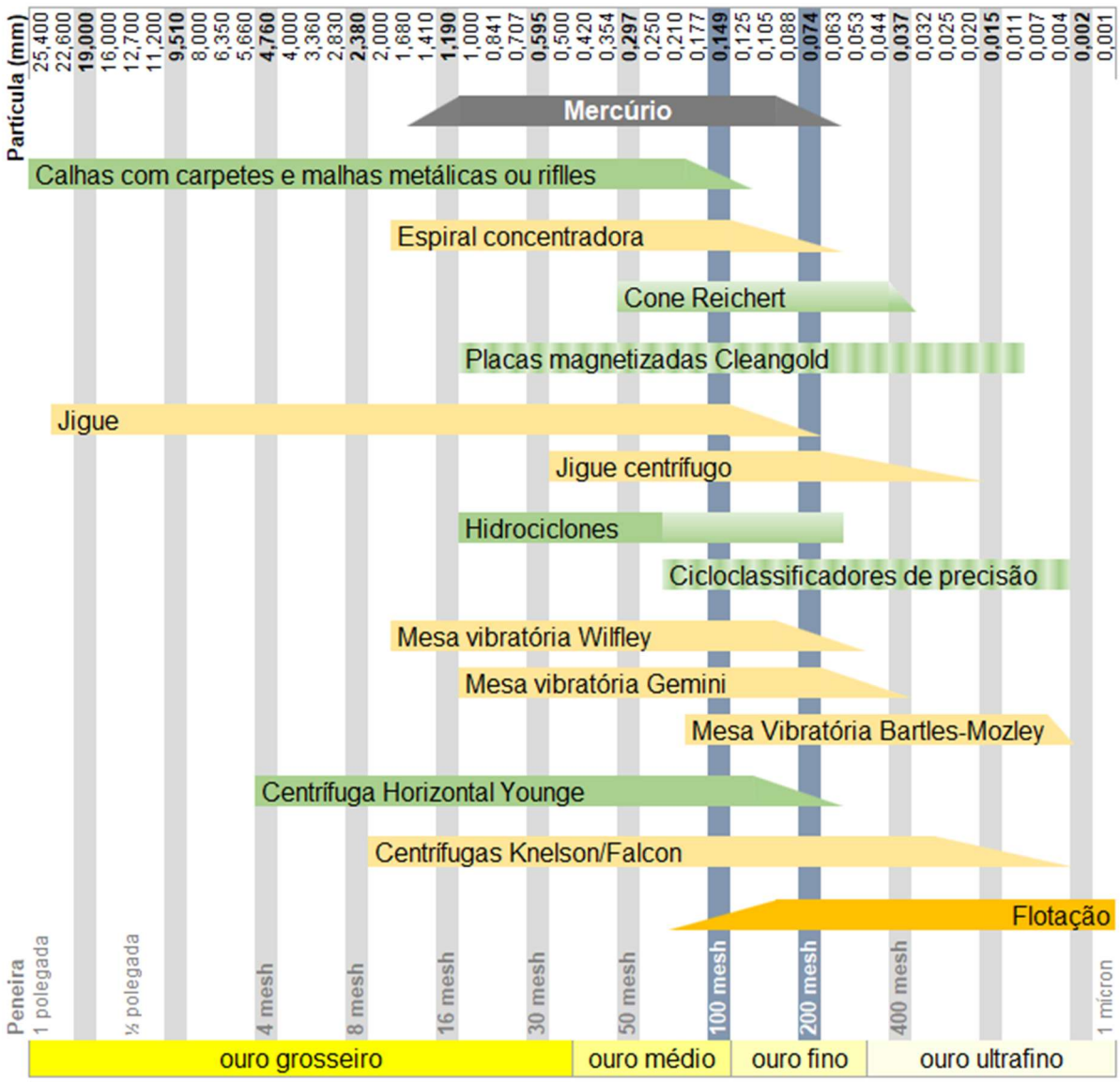
Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Lixiviação a Tioureia	> 150 µm = inviável < 150 µm = > 90%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Remoto Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos
Lixiviação com reagentes patenteados (Cycladex, GDA, CNLITE)	n.d.	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Possível Requer avaliação específica de custo-benefício na eventual instalação de centrais de lixiviação	Fornecedores exclusivos reduzem a acessibilidade aos reagentes
Lixiviação apoiada em Alfa-ciclodextrina	n.d.	n.d.	Alto	Remoto tecnologia em desenvolvi-mento	
Lixiviação com glicina	n.d.	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Promissor Tecnologia em desenvolvi-mento	
Pirólise com Bórax	> 1 mm = inefetivo < 1 mm = 100%	Recuperação de ouro livre e exposto	Baixo	Possível Requer testes específicos e adaptações de processo	Requer um concentrado limpo

Técnica	Faixa de eficiência granulométrica	Aplicabilidade	Custo Relativo	Viabilidade de uso pela MAPE de ouro no Brasil	Desvantagens e Riscos
Biolixiviação/ Lixiviação bacteriana	> 75 µm = inviável < 75 µm = > 90%	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Alto	Possível Requer desenvolvi-mento de equipamento específico para centrais coletivas	Requer controles operacionais rigorosos
Extração com plantas cianogênicas	n.d.	Recuperação de ouro livre, exposto ou contido	Baixo	Promissor Tecnologia em desenvolvi-mento	Requer estrutura de plantio e processa-mento das plantas
Bioextrator a base de extrato de pau-de-balsa	presumivelmente semelhante ao mercúrio	Recuperação de ouro livre e exposto	Baixo	Promissor Tecnologia em desenvolvi-mento	
Nanotecnologia	n.d.	Recuperação de ouro	n.a.	Remoto Requer pesquisa de materiais e desenvolvi-mento de aplicações futuras	

n.a.: não aplicável;
n.d.: não determinado.

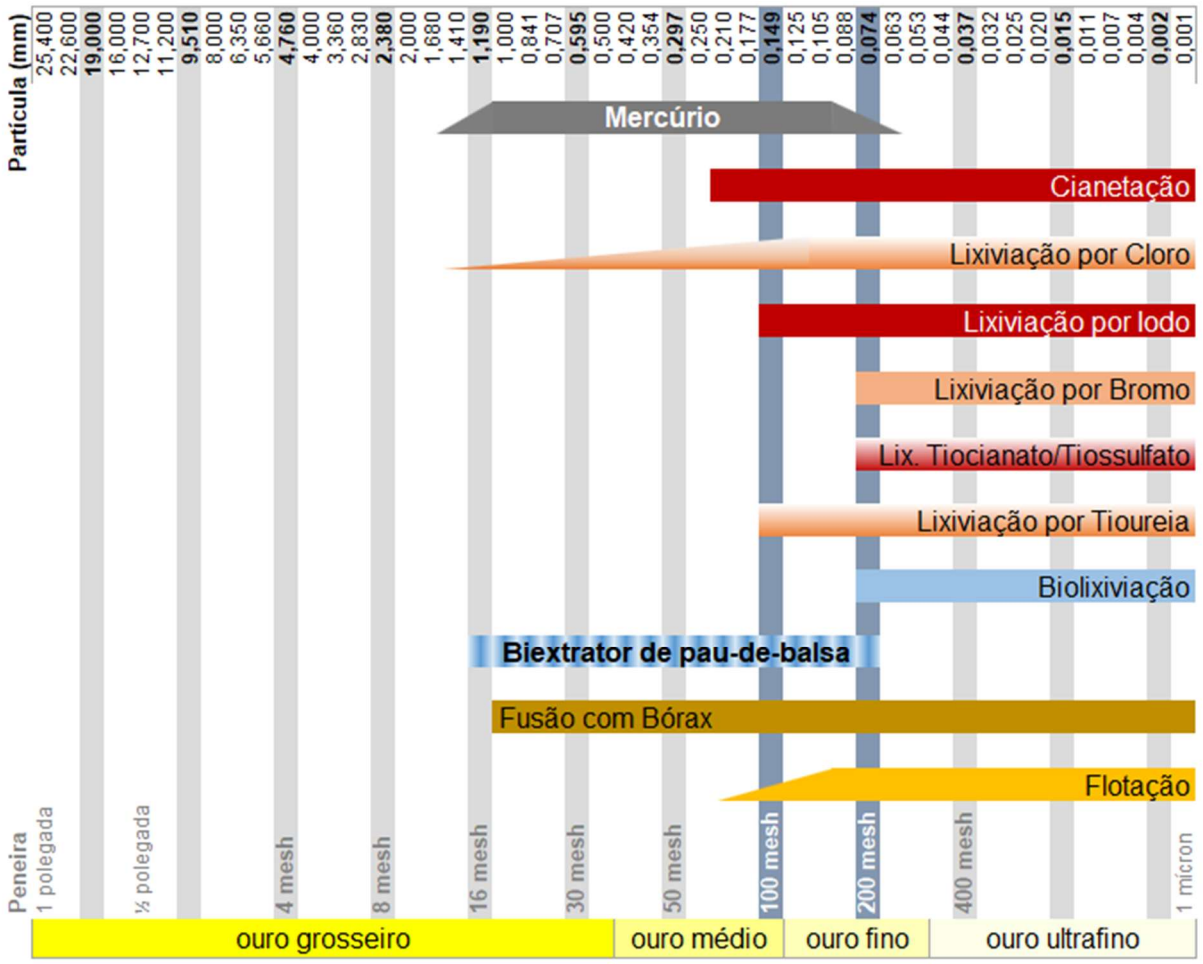
Fonte: elaborado pelos Autores

Figura 45. Faixa granulométrica de eficiência de processo físicos para concentração ou recuperação de ouro



Fonte: elaborado pelos Autores

Figura 46. Faixa granulométrica de eficiência de processos químicos, biológicos e de pirometalurgia para recuperação de ouro



Fonte: elaborado pelos Autores

6. ESTRATÉGIAS TECNOLÓGICAS PARA A REDUÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DO USO DE MERCÚRIO

6.1. ABORDAGEM TECNOLÓGICA

Mudar uma cultura arraigada é sempre uma tarefa complexa e árdua. Mais ainda será quando essa mudança afeta diretamente um meio de vida e um sistema produtivo assentado, com relações tangenciais consolidadas com cadeias econômicas associadas[10].

O uso do mercúrio na MAPE de ouro está fortemente arraigada na percepção de que não existem alternativas viáveis tanto para o uso do mercúrio, quanto para a atividade garimpeira, e os riscos e danos decorrentes, aceitos ou vistos como ceticismo, são insuficientes para o convencimento dos mineradores ao abando da prática ou da atividade, já que o sacrifício pela prole, pela família, pela tribo, são atributos inerentes (e desejáveis) do ser humano, e mesmo para os egoístas é uma decisão lógica optar por viver bem por algum tempo ao invés de viver em sofrimento por muito tempo.

Neste panorama, uma abordagem tecnológica se mostra como a mais promissora para gerar a mudança de comportamento, afinal, como seres racionais, os mineradores artesanais serão convencidos pela evidência concreta, pela prova tangível e cabal de que uma alternativa livre de mercúrio irá propiciar resultados práticos iguais ou superiores à prática tradicional, e que o investimento em termos de tempo, recursos, trabalho e sacrifício causados pela mudança, em um tempo razoável, é (1) possível e (2) compensatório. Cumprida essa condição essencial, tanto faz se a pessoa ser convencida está imbuída motivações louváveis ou mesquinhas: a lógica racional levará ao convencimento[11]. Além disso, diferentemente de um método suasório pela repressão (que tende a impulsionar uma parcela significativa da população garimpeira para a ilegalidade), a abordagem tecnológica tem alto potencial de incentivo à formalização e ao associativismo/cooperativismo, se estiver associada a mecanismos adequados de suporte técnico e financeiro.

[10] Como os fornecedores de mercúrio, que em muitos casos, inclusive em locações remotas e em operações controladas pelo crime organizado no Brasil, são também adquirentes do ouro produzido.
[11] Não se conhecem casos contemporâneos em que o uso de mercúrio seja sagrado ou ritual na mineração, donde podemos assumir que não serão enfrentadas situações antilógicas.

É claro que ao nos referimos a uma abordagem tecnológica não se está limitando o escopo a um treinamento de uso de um equipamento, mas muito ao contrário, a ideia é ampliar o escopo para a otimização técnica da operação e do próprio negócio dos garimpeiros, integrando na solução os aspectos gestão responsável da mineração, sustentabilidade econômica e atuação tecnicamente orientada, sempre respeitando e preservando a cultura garimpeira.

6.2. DESAFIOS DA ABORDAGEM TECNOLÓGICA

Uma abordagem tecnológica eficiente para redução e eventual abandono do uso de mercúrio enfrenta desafios pelo menos de caráter técnico, organizacional e econômico e um diagnóstico prévio, preciso e específico a respeito da real amplitude de cada um desses componentes é um ponto central para iniciar a construção de uma estratégia para superá-los.

A etapa inicial de diagnóstico é também, por si só, pode ser um desafio e um momento crítico para a construção de uma relação bidirecional de respeito e confiança que deve ligar a equipe técnica com a os garimpeiros, muitas vezes requerendo uma capacitação prévia e específica para que a assistência técnica consiga interagir e, eventualmente, transmitir conhecimento com eficiência para os grupos de mineradores tradicionais.

Seguindo nesse mesmo sentido, a etapa de diagnóstico deve propiciar que a equipe técnica aprenda e respeite o “saber” e o “ser” garimpeiro do grupo específico de mineradores, pois somente assim estará apta a construir as pontes necessárias para evoluir o modo de fazer garimpeiro específico do caso concreto para um patamar compatível com o padrão de responsabilidade socioambiental que se espera e deseja que a atividade atinja. A primeira tarefa da abordagem tecnológica é, portanto, medir a distância entre os universos garimpeiro e técnico-científico e estabelecer as conexões entre eles. É o maior de todos os desafios — e muitos até dirão que é o único — pois um insucesso aqui não permitirá a continuidade do processo de mudança e talvez inviabilize uma segunda tentativa, ao passo que um grande sucesso já estabelece o passo inicial no caminho da mudança, que é a ampliação do horizonte de percepções dos garimpeiros para abranger a possibilidade da mudança e a admissão da ideia de mudar.

6.2.1. DESAFIOS TÉCNICOS

As principais lacunas de conhecimento que devem ser fechadas para permitir o planejamento e implementação de soluções para redução e eventual abandono do uso de mercúrio são:

I. **conhecimento limitado da geologia e da mineralogia dos locais onde a MAPE atua**, o que pode dificultar e até inviabilizar a escolha de alternativas técnicas para melhorar a concentração de minério e a separação do ouro.

   Tradicionalmente os garimpeiros contam com a sorte aliada a alguns truques dados pela experiência para identificar o local onde farão a lavra e simplesmente montam seus equipamentos e iniciam a operação sem uma definição mais aprimorada de parâmetros tecnicamente relevantes (como a inclinação e cumprimento das calhas, e fluxo e diluição da polpa, por exemplo), atribuindo o maior ou menor rendimento à maior ou menor riqueza do depósito mineral. O conhecimento prévio das características geológicas e mineralógicas da área a ser minerada, por óbvio, tenderá a permitir melhores rendimentos de processo, e auxiliará a demonstrar a utilidade da assistência técnica permanente.

II. **inexistência de alternativas eficientes**: este é um desafio genérico e de certa forma hipotético dentro do contexto de “imediatamente reduzir o consumo de mercúrio e, quando possível o eliminar”, haja vista que existem hoje várias opções tecnológicas que poderiam otimizar o processo de concentração de ouro e melhora a gestão de mercúrio (e assim, reduzir significativamente as emissões e liberações do metal tóxico de imediato), e o tempo despendido nessa tarefa é útil de qualquer forma, pois agrega valor a qualquer forma de separação do ouro que seja aplicada, inclusive aquelas que estão em desenvolvimento. De todo o modo, não e demasiado destacar que as alternativas tecnológicas para a MAPE de ouro devem passar pelo ciclo de desenvolvimento tecnológico, indo desde a concepção do projeto, aos testes de laboratório, plantas-piloto em campo (com relatórios adequados de eficácia em campo), ao aumento de escala e à comercialização (LOGSDON et al., 1999 apud KEANE et al., 2023), sempre

com vistas à otimização do conhecimento da mineralogia e o devido retorno da percepção do usuário.

III. **limitações logísticas e operacionais**: nem todas as soluções técnicas serão suportadas por todas as operações garimpeiras, devido à ausência de condições logísticas e operacionais essenciais na cadeia de suprimentos, como disponibilidade de meios de transportar os equipamentos, os insumos, de energia para alimentar os mesmos, e até de água para operá-los (em regra um problema menor na Amazônia). Soluções que exigem operações consorciadas centralizadas, por exemplo, podem ser um problema sem solução neste contexto, não se cogitando esperar que garimpeiros transportem volumes consideráveis de concentrado por itinerários longos e difíceis, para fazer uso de uma central de cianetação.

IV. **inespecificidade ou indisponibilidade das tecnologias alternativas**: várias das potenciais alternativas que poderiam auxiliar na questão do mercúrio na MAPE não apresentam um desenvolvimento específico para a realidade de menor escala desta atividade, ou, quando existem equipamentos móveis ou baratos o suficiente para atender a necessidade, estes não estão disponíveis para aquisição. Em muitos casos pode ser um desafio específico — e um especial incentivo para a inventividade acadêmica — estabelecer uma adaptação de alguma tecnologia já em uso pela grande indústria há décadas, para a realidade garimpeira e transferir o conhecimento correspondente para as pequenas fábricas de implementos garimpeiros que existem espalhadas nas regiões garimpeiras do Brasil.

V. **introdução e demonstração da nova tecnologia**: esse tema pode ser um desafio para a criatividade da assistência técnica, principalmente quando envolve o uso de protótipos a campo. A opção mais óbvia, claro, é trabalhar a nova tecnologia nos rejeitos da operação atual até correção dos erros de concepção e estabelecimento dos parâmetros de ajuste fino, pois como o rendimento das técnicas atuais de concentração tende a desperdiçar pelo menos um terço do ouro, é provável que já nos testes um equipamento muito mais eficiente vá recuperar algum metal precioso do rejeito e ao

menos causar curiosidade. Superada esta etapa, é possível propor um teste de eficiência cruzada, em que os métodos tradicional e alternativo trabalhem lado a lado com o mesmo material na entrada para ver quem rende mais, e, após, aplicam-se ambos nos rejeitos um do outro, para ver qual recupera quanto a mais das sobras do outro.

VI. **superação da complexidade operacional**: para leigos, qualquer operação de qualquer tecnologia apresenta complexidades e dificuldades decorrentes da inexperiência. No universo de conhecimento tradicional e empírico do garimpeiro, “o saber fazer” ocupa um papel central e a única forma de assegurar que uma nova tecnologia caia em uso e seja executada de forma adequada (com otimização de resultados) é a transferência do conhecimento prático, que parte da demonstração concreta de como pode ser feito, passa pela orientação e treinamento de como deve ser feito, e finaliza com acompanhamento de como os garimpeiros começaram a fazer (para eventualmente corrigir desvios de procedimento). **Não existem tecnologias complexas demais para garimpeiros aprenderem; mas podem existir tecnologias de complexidade superior à capacidade da assistência técnica prover treinamento.**

6.2.2. DESAFIOS ORGANIZACIONAIS

Uma abordagem tecnológica pressupõe a otimização operacional, redundando na necessidade uma melhor organização da produção, tanto no aspecto interno (organização da lavra), o que pode ser mais simples, quanto externo (organização da atividade, agregando múltiplas lavras), o que pode ser um longo e trabalhoso processo. Os principais desafios neste campo podem ser resumidos na seguinte lista:

I. **engajamento comunitário**: o processo de otimização operacional somente se sustenta na ampla participação, envolvimento e comprometimento da comunidade garimpeira como um todo, eis que para que ser efetiva, a solução deve ser eficaz (elimina todo o problema), e eficiente (elimina o problema com otimização de tempo e recursos). O desafio, portanto, é ultrapassar o limite da individualidade (marcante nessa atividade), e provavelmente a forma mais adequada de atingir esta meta é

reforçar os laços comunitários e avivar a identidade coletiva do núcleo garimpeiro em questão.

II. **estruturação organizacional da atividade**: a legislação brasileira e as experiências de sucesso, apontam que a organização cooperativa da atividade garimpeira é a modalidade organizacional preferível para a MAPE, pois além de apresentar todas as vantagens de uma estrutura empresarial (com destaque para a otimização e compartilhamento de recursos), permite o respeito a individualidade, independência e liberdade dos garimpeiros — todos elementos essenciais da sua cultura. Uma cooperativa de sucesso nasce da vontade coletiva de cooperar (trabalhar lado a lado, em uma competição sadia, pressupondo uma democracia diretamente participativa para compartilhamento dos recursos), o que é muito mais amplo do que colaborar (trabalhar junto em uma mesma linha sob uma hierarquia única). Usualmente isto envolve a necessidade de harmonizar entendimentos das lideranças locais e implantar costumes como debate sadio, construção de decisões por consenso, e respeito ao que foi conjuntamente decidido, o que pode ser difícil se preexistentes lideranças fortes em competição. Se for este o caso, um passo prévio necessário será a composição de uma associação para gerar uma vivência organizacional conjunta inicial, uma visão coletiva do negócio, uma visão uniforme do potencial conjunto e das necessidades comuns e o aprofundamento dos laços comunitários para o patamar de confiança imprescindível para a cooperação.

III. **implantação de uma cultura organizacional convergente com as exigências legais da atividade**: um dos grandes problemas para a MAPE contemporânea é o descompasso entre a cultura organizacional tradicional e as exigências da Lei neste âmbito. O grau de responsabilidade social e ambiental que todos desejam, parte primeiramente da capacitação dos garimpeiros também neste sentido, provendo-lhes o conhecimento e os meios necessários para melhor atender os rigores da Lei. Isto também permitirá, por exemplo, o surgimento de mecanismo naturais de autorregulação e autofiscalização da atividade, potencialmente reduzindo conflitos futuros com a Administração Pública e fomentando a

universalização das melhores práticas. O extensionismo mineral é um instrumento de capacitação e conscientização perene que deve ser assegurado aos garimpeiros, permitindo que não apenas os avanços tecnológicos, mas principalmente os organizacionais sejam integralmente assentados na cultura garimpeira local.

IV. **estabelecimento de modelos de negócios sustentáveis**: a organização garimpeira gerada pela implantação da nova tecnologia deve estar assentada em estruturas organizacionais que assegurem a perenidade dos benefícios decorrentes dos objetivos atingidos. Logo, a organização garimpeira deve estar capacitada a gerir os negócios de modo eficiente, o que inclui prover acesso contínuo dos garimpeiros a uma ampla gama de conhecimento técnico não mineiro necessária a gestão do negócio[12].

6.2.3. DESAFIOS ECONÔMICOS

Uma abordagem tecnológica usualmente requer um aporte de investimento inicial, até que a mudança gerada esteja suficientemente consolidada para gerar os recursos necessários para sua automanutenção, tanto no sentido econômico puro, quanto no sentido da vontade coletiva de manter a mudança reconhecida como um benefício adquirido. Nesse âmbito, os desafios mais relevantes são:

I. **apoiar financeiramente a transição tecnológica**: o estabelecimento de linhas de crédito adequadas a realidade garimpeira é imprescindível para que haja recursos para a aquisição dos insumos necessários à transição tecnológica. Subsídios seriam muito bem-vindos, mas a realidade garimpeira no Brasil, hoje, é a total falta de acesso a crédito oficial e mudar esta realidade não apenas permite, mas incentiva a mudança.

II. **suportar a assistência técnica continuada:** o processo de mudança tecnológica e cultural que se propõe não se resolve em poucos meses ou anos, mas requer apoio contínuo ao longo de período extenso tempo, para gerar a sedimentação cultural desejada. O ideal, nesse sentido, seria o fortalecimento de um órgão oficial específico, que além do orientar

[12] A Organização das Cooperativas Brasileiras – OCB é um referencial de como prover esse tipo de capacitação contínua e pode ser considerada um parceiro imprescindível no processo de sustentabilidade organizacional dos garimpeiros mediante estruturação de cooperativas.

tecnicamente a atividade, poderia fomentar a adoção mais rápida de melhorias tecnológicas futuras, realizaria pesquisa e desenvolvimento e auxiliaria a produção consistente e contínua de dados relevantes sobre a atividade. Na ausência de um órgão desse, a oferta de especialistas nas regiões garimpeiras deve ser incrementada para suprir a demanda de assistência técnica que deve se tornar perene por força da mudança na cultura organizacional da atividade que se pretende causar.

III. **incentivar mercados responsáveis e certificação**: a valorização do "ouro responsável", ou qualquer outra denominação que indique para o mercado internacional que o metal precioso foi produzido de forma livre de mercúrio e com justa distribuição dos ônus e benefícios da cadeia produtiva e um mecanismo que deverá gerar benefícios econômicos significativos para os mineradores que adotarem práticas mais responsáveis e busquem a formalização. Esse mecanismo, além de incentivar a adesão à novas tecnologias, permitirá que a autossustentabilidade do novo modelo de negócios seja atingida mais rapidamente.

IV. **incentivar cadeias associadas que agreguem valor ou ouro**: a chamada “licença social”, que é a percepção positiva das comunidades de entorno a respeito da mineração é um conceito que particularmente se aplica a MAPE, que vive a contradição de ser amada pelos que estão próximos, e odiada pelos que estão distantes. Promover cadeias produtivas associadas que agreguem valor ao ouro produzido plena MAPE — notadamente uma indústria joalheira artesanal de base local — poderia ser um mecanismo que auxiliaria a atividade a afastar estigmas, evidenciar os seus benefícios ao país como um todo, potencializar os benefícios da atividade para as comunidades diretamente impactadas, gerar alternativas equivalentes de renda para outros trabalhadores não garimpeiros, dentre inúmeros benefícios, dentre os quais a sustentabilidade da formalização alcançada pela abordagem tecnológica.

6.3. ESCOLHA DA ALTERNATIVA PARA REDUÇÃO OU SUBSTITUIÇÃO DO USO DE MERCÚRIO

KEANE et al. (2023) em estudo sobre a avaliação de adequação de tecnologias sem mercúrio para uso na MAPE de ouro ressaltam ser esse tema desafiador devido aos ambientes complexos e variados nos quais as atividades do setor ocorrem. Citam que são vários fatores que podem ser usados para determinar tal adequação, que incluem: as propriedades do minério, requisitos operacionais, fluxo de trabalho e desempenho das tecnologias, considerações técnicas locais e aspectos de saúde, segurança e meio ambiente, além de que questões sociais, econômicas, culturais, legais e de governança.

ESDAILE e CHALKER (2018 apud KEANE et al. 2023) ressaltam que para que as tecnologias sem mercúrio possam competir com a amalgamação, precisam: ser aplicáveis a diferentes tipos de minério de ouro; devem ser adequadas para pequenos e grandes lotes de minério; e devem oferecer altos percentuais de recuperações de ouro em menos tempo em comparação com o processo de amalgamação. Observam, também, que as tecnologias e insumos (ou seja, reagentes) precisam ser seguros, fáceis de manusear, de fácil logística (transporte viável para locais remotos), capazes de operar com fornecimento de energia central intermitente ou até mesmo em locais onde não existe energia, dentro do possível gerar resíduos biodegradáveis, e, principalmente, mostrar benefícios imediatos aos mineradores e

HINTON et al. (2003 apud KEANE et al. 2023) destacam a importância de que as tecnologias incorporem as necessidades e capacidades locais, tendo em vista que as atividades da MAPE de ouro são conduzidas em ambientes operacionais, caracterizados por níveis de produção e conhecimento técnico dos mineradores bem variados. Observam, ainda, que a probabilidade de tecnologias serem adotadas pelo setor depende de sua simplicidade em comparação ao processo de amalgamação e da disponibilidade de equipamentos e materiais necessários para as operações.

6.4. IMPLEMENTAÇÃO DE ESTRATÉGIAS TÉCNICAS PARA REDUÇÃO OU ELIMINAÇÃO DO USO DE MERCÚRIO NA MAPE

Iniciando pela hipótese de redução o uso de mercúrio, que pode ser uma etapa preliminar ou um paliativo enquanto se busca uma solução viável para o abandono do uso, a orientação estratégica deve focar na promoção da eficiência dos processos de concentração e incentivo a adoção de práticas de segurança e minimização de liberações e emissões do metal tóxico.

A partir de uma análise realizada por profissional técnico habilitado, devem ser identificados os aspectos nas práticas aplicadas na operação que devem sofrer aperfeiçoamentos. Essas conclusões devem ser debatidas com os garimpeiros de modo construtivo, respeitando o saber tradicional (fonte de orgulho) e construindo pontes de confiança.

É importante saber o porquê os garimpeiros executam as operações na forma que o fazem, e questionar sobre eventuais tentativas de execução diferenciada, antes de propor um modo alternativo e convidar os garimpeiros a experimentar o que está sendo proposto e, em regra, o processo de mudança deve ser realizado em passos, para construir uma base de confiança do trabalhador na assistência técnicas (é pouco plausível que os mineradores aceitem mudar radicalmente todo o seu processo produtivo de uma vez só). Não pode ser esquecido que a comprovação concreta é indispensável para o sucesso no convencimento.

A participação ativa dos mineradores é essencial durante a adaptação das operações e isto já é parte de um treinamento planejado que deve acompanhar todo o processo de aperfeiçoamento operacional. “Aprender fazendo” é o modo de ser garimpeiro e as repetições na prática são a forma tradicional pela qual fixam o conhecimento.

Atendidos esses princípios, as etapas neste contexto seguem a seguinte sequência lógica genérica:

Otimização do processo de extração tradicional: aqui se a introdução de conceitos essenciais para a operação responsável da MAPE, tais como a organização geral do espaço, respeito às APP, o planejamento da futura recuperação (incluindo a reserva do solo superficial), a técnica de sequenciamento de cavas, o uso da água em circuito fechado para contenção de sedimentos, o uso de EPIs e, claro, a melhoria das técnicas de desmonte,

homogeneização do minério bruto (talvez por peneiramento ou uso de tromel), dentre outros. Embora seja logicamente a primeira etapa, pode ser a última ser implementada, por ser a mais difícil de ser compreendida, porque seus efeitos benéficos não são sentidos imediatamente.

Otimização dos métodos de concentração: concentrados melhores (com maior teor de metal livre) geram maior rendimento na recuperação de ouro, redução imediata do consumo de mercúrio e resultados facilmente palpáveis para os mineradores. Estudos de caracterização do minério proporcionarão a obtenção de maior grau de liberação através de métodos de concentração mais eficientes.

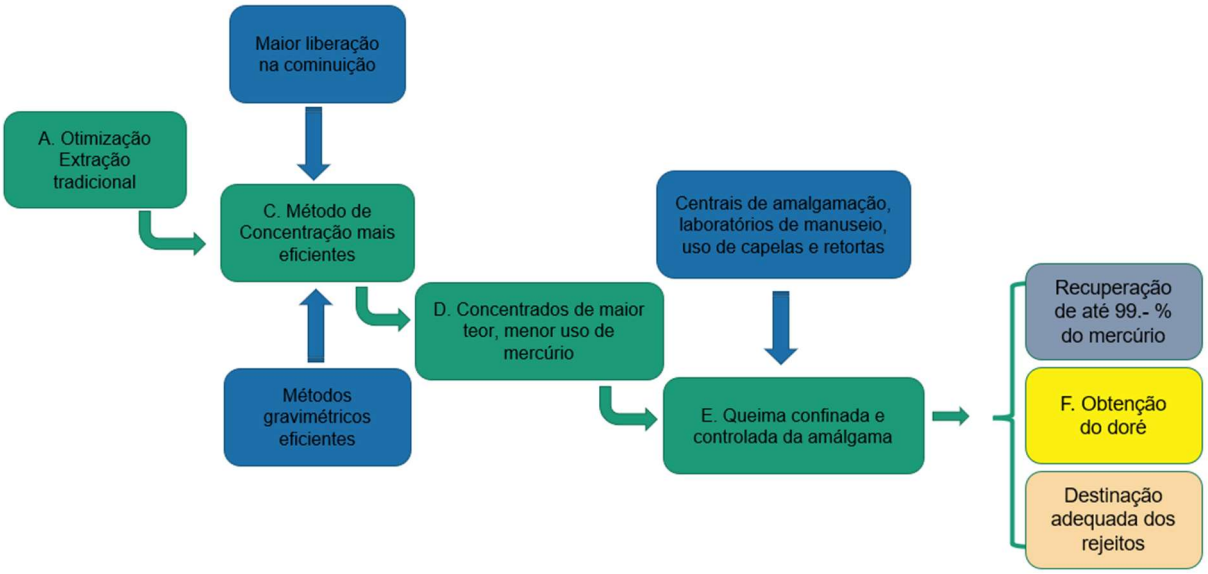
Aplicação controlada do mercúrio: o controle da aplicação excessiva e eventual melhoria no processo de remoção de excesso de mercúrio pode em alguns casos ser uma medida essencial para reduzir emissões e liberações do metal tóxico.

Queima confinada e controlada do amálgama: retortas eficientes, se possível capelas adequadas em centrais de amalgamação, e principalmente treinamento no uso adequado do equipamento reduzirão significativamente a perda do mercúrio durante o processo de pirólise do amálgama.

Controle da destinação dos rejeitos: o controle, armazenamento adequado e pós-tratamento dos rejeitos contaminados por mercúrio é certamente um dos maiores desafios enfrentados. Fica minimizando com a eficiência dos processos de controle de aplicação e recuperação de mercúrio, mas não pode ser negligenciado.

A Figura 47 apresenta o diagrama das etapas para técnicas com foco na otimização dos métodos tradicionais, treinamento contínuo dos garimpeiros e colaboradores, e o emprego de tecnologias e procedimentos que minimizem as perdas e emissões de mercúrio.

Figura 47. Fluxograma simplificado de melhoria de operação da MAPE de ouro para a redução do uso de mercúrio



Fonte: NICO, 2024.

A hipótese de abandono do uso do mercúrio passa por uma mudança radical no método de recuperação do ouro contido no concentrado. No entanto, o planejamento geral da operação, a extração e a concentração são muito semelhantes, senão idênticas, pelo que são válidos os comentários respectivos feitos até aqui, inclusive a de que o processo de abandono do uso de mercúrio pode ser iniciado como uma iniciativa de redução de emissões como o uma estratégia de gerar confiança.

Estando o grupo garimpeiro em questão maduro para o salto tecnológico que representará o abandono do mercúrio, é necessário primeiro levar a eles o conhecimento da tecnologia alternativa. Plantas-piloto ou operações de teste em campo aparentam ser a melhor opção para divulgar um eventual novo método para o grupo em foco e outros (que acabarão se interessando por conhecer a novo a técnica a partir de relatos informais e cotidianos de seu sucesso) e obter o devido retorno da percepção do usuário que inspire eventuais adaptações práticas.

A **demonstração de eficiência** levará ao interesse, que abre as portas para a **capacitação** dos mineradores para operarem a nova tecnologia de modo seguro e eficiente. Esse é um passo importante, porque é indispensável que a forma de operação otimizada seja plenamente absorvida, para que quedas de produtividade decorrentes de erros operacionais não venham gerar uma queda de interesse pela

mudança. É importante que os mineradores que venham a aderir a mudança tecnológica apresentem níveis de sucesso superiores a quem insistir com a amalgamação, para **catalisar uma reação em cadeia** no sentido de abandono do uso do metal tóxico.

Em determinado momento, a maior parte da comunidade garimpeira utilizará técnicas aprimoradas livres de mercúrio, e o restante estará em sua maioria já buscando a migração. Então, e somente então, medidas impositivas e de comando-controle-punição, poderiam ser adotadas para banir o mercúrio da extração de ouro no âmbito normativo.

6.5. COEXISTÊNCIA COMO UMA ALTERNATIVA POTENCIAL DE ACESSO A RECURSOS PARA REDUÇÃO OU ELIMINAÇÃO DO USO DE MERCÚRIO

Apesar de oferecer empregos e potencializar o desenvolvimento econômico em regiões remotas do país, a MAPE de ouro ainda enfrenta desafios estruturais e operacionais que dificultam ou inviabilizam o processo de superação da informalidade e gestão eficiente dos riscos socioambientais.

O arranjo de coexistência, que consiste em promover a integração entre mineradores artesanais e empresas de mineração industrial, tem sido proposto na literatura científica como um modelo que poderia transformar a realidade desse setor, em uma abordagem de financiamento privado do processo de capacitação e formalização dos mineradores artesanais dentro de um cenário de cooperação para divisão funcional das operações de mineração de determinada área objeto de titulação mineral, para partilha proporcional dos resultados. Esse tipo de colaboração pode ser desenvolvido por meio de diferentes modalidades e arranjos operacionais, possibilitando que ambos os setores compartilhem recursos, tecnologia e conhecimentos, criando sinergias que beneficiam tanto os mineradores quanto o meio ambiente e as comunidades locais.

A mineração industrial e a MAPE atuam em nichos diferentes de um ramo complexo, que apresenta desafios e oportunidades para governos, empreendedores e comunidades locais. Ambas as modalidades de mineração têm papéis significativos na economia global, mas operam com abordagens, requisitos e impactos distintos.

A mineração industrial de ouro tem características de ser intensiva em capital e envolve longos períodos de investimento antes de gerar retornos financeiros. Este setor requer sofisticados estudos geológicos, de engenharia e de gestão ambiental, além de passar por rigorosos processos de licenciamento e avaliações de impacto. A mineração industrial atua sempre de forma regulamentada, contribuindo para os governos por meio de impostos, royalties e investimentos em infraestrutura. As operações mineração industrial de ouro normalmente produzem esse metal para ser refinado por empresas certificadas pelo padrão *London Good Delivery List* (BICKHAM, 2023), adotando práticas rigorosas de conformidade com padrões de combate à lavagem de dinheiro, além de manter padrões adequados de responsabilidade ambiental, social e de governança (ESG). Sua contribuição para economia local se dá pela oferta de empregos formais e transferência de conhecimento pela capacitação de seus trabalhadores, o que fortalece as economias e as comunidades locais.

A MAPE de ouro, por sua vez, é caracteristicamente desenvolvida com recursos econômicos limitados, menor sofisticação e refinamento técnico, e frequentemente em regime informal e mesmo ilegal, dependendo das características da legislação local. Em vários países, esta atividade está submetida a regulamentos e controles mais brandos, o que limita sua contribuição tributária direta e dificulta a gestão de impactos ambientais e sociais. Apesar disso, a MAPE de ouro emprega mais de 90% da força de trabalho no setor aurífero global e sustenta economias locais em várias regiões rurais, especialmente em países menos desenvolvidos social e economicamente, tais como Colômbia, Gana, Indonésia e Peru.

Uma relação de sinergia entre a MAPE e a mineração industrial em um arranjo de coexistência tem sido adotado com sucesso em alguns países como uma abordagem de promoção da organização, capacitação e conformação da MAPE às exigências legais e às melhores práticas operacionais, buscado, por exemplo:

- **adoção de tecnologias limpas:** promover o uso de tecnologias que eliminem ou minimizem o uso de substâncias tóxicas, como o mercúrio;
- **gerenciamento eficiente de rejeitos:** implementar práticas modernas e seguras para tratar resíduos minerais, reduzindo impactos ambientais;
- **formalização e governança:** incentivar a legalização das operações da MAPE, garantindo conformidade com as normas ambientais e trabalhistas;

- **impacto social positivo:** ampliar os benefícios para comunidades locais por meio de treinamento, emprego e infraestrutura.

Estudos realizados por VEIGA e FADINA (2020) indicam que a coexistência na MAPE de ouro não apenas apoia a transição para práticas de mineração responsável, mas também aumenta a rentabilidade das operações, criando incentivos para os mineradores artesanais adotarem mudanças.

6.5.1. MODALIDADES DE COEXISTÊNCIA NA MAPE DE OURO

Diversas modalidades de coexistência para a MAPE de ouro foram implementadas em diferentes contextos ao redor do mundo. Cada um desses arranjos reflete as condições locais e as necessidades específicas da MAPE de ouro e das empresas convencionais. As principais modalidades de coexistência discutidas na literatura incluem (VEIGA e FADINA, 2020):

- **Operações da MAPE autorizadas em concessões de mineração industrial:** empresas de mineração permitem que mineradores da MAPE trabalhem em suas concessões sem intervenção direta (exemplo: Lundin, no Equador);
- **Assistência técnica às operações da MAPE:** empresas de mineração industrial fornecem suporte técnico e treinamento para melhorar as práticas operacionais da MAPE de ouro (exemplo: AngloGold Ashanti e B2 Gold, na Colômbia);
- **Empresas de mineração industrial operando em concessões da MAPE:** empresas de mineração industrial operam em áreas concedidas a cooperativas da MAPE de Ouro, compartilhando infraestrutura e tecnologia (exemplo: Newlox Gold, na Costa Rica);
- **Parceria na comercialização de produtos minerais:** empresas de mineração industrial compram minério ou rejeitos processados pela MAPE de ouro (exemplo: Dynacor Gold, no Peru).

As modalidades acima indicam que os modelos específicos de coexistência podem ser adaptados e moldados para cada caso, de forma a atender às

especificidades de diferentes localidades, desde que haja engajamento ativo das partes interessadas envolvidas no problema.

6.5.2. BENEFÍCIOS E DESAFIOS DA COEXISTÊNCIA

Segundo a literatura (BICKHAM, 2023; DE TOMI et al., 2022; MUTEMERI et al., 2024; VEIGA e FADINA, 2020; VEIGA et al., 2022), os principais benefícios e desafios associados à implantação de modelos de coexistência entre a mineração industrial e a MAPE de ouro estão resumidos na Tabela 4 a seguir:

Tabela 4. Benefícios e desafios associados a implantação de modelos de coexistência entre MAPE e mineração industrial

Benefícios	Desafios
• **Redução de impactos ambientais:** a eliminação do uso de mercúrio e a gestão adequada de rejeitos protegem os ecossistemas locais; • **Formalização e segurança jurídica:** os mineradores passam a operar legalmente, ganhando acesso a financiamentos e programas governamentais; • **Desenvolvimento socioeconômico:** a coexistência fomenta a criação de empregos, o treinamento de trabalhadores e a melhoria da qualidade de vida das comunidades locais; • **Aumento da eficiência produtiva:** o uso de tecnologias modernas possibilita maior recuperação de minerais, melhorando os rendimentos dos mineradores.	• **Resistência cultural**: mineradores artesanais podem resistir à formalização devido a temores de perda de autonomia. • **Falta de infraestrutura**: muitas localidades carecem de instalações básicas para implementar modelos de coexistência. • **Deficiência de capacitação técnica**: a transição para práticas sustentáveis requer treinamento extensivo e suporte técnico. • **Obstáculos regulatórios**: A ausência de políticas claras para regulamentar parcerias entre empresas e mineradores artesanais pode dificultar a implementação.

Fonte: Elaborado pelo Autor

Dentre as iniciativas internacionais de promoção do conceito de coexistência MAPE/mineração industrial, o *World Gold Council* destaca o papel de programas como o *Swiss Better Gold Initiative* e o *Dutch Gold Sector Agreement* (que atuam na formalização e no apoio técnico a operação da MAPE de ouro), o Guia OCDE para

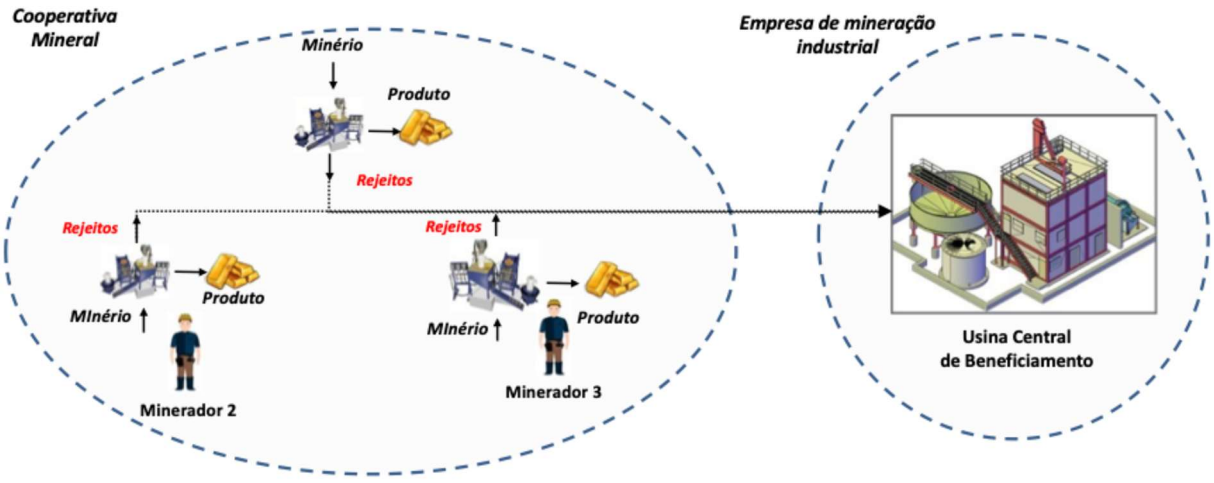
Due Diligence na mineração (que fornece orientações para a estruturação de cadeias de suprimento responsáveis, incluindo a mineração em áreas de conflito e alto risco) e os programas de colaboração entre a MAPE de ouro e a mineração industrial, apoiados por entidades como o Banco Mundial e o programa *Planet Gold* (que disseminam o uso de tecnologias alternativas ao mercúrio e a formalização da MAPE de ouro) (BICKHAM, 2023).

6.5.3. IMPLEMENTAÇÃO DE MODELOS DE COEXISTÊNCIA

A implantação de um modelo de coexistência exige um processo estruturado, que depende de um planejamento adequado, o qual deve ser discutido e alinhado junto a todos as partes interessadas. Normalmente, a iniciativa parte de uma associação de mineradores, mas em alguns casos, a estruturação de um modelo de coexistência pode ser impulsionada pela Administração Pública ou pelas próprias empresas de mineração industrial (VEIGA e FADINA, 2020).

A Figura 48 apresenta um exemplo geral de arranjo de coexistência aplicável ao setor da MAPE no Brasil, conforme discutido por DE TOMI, 2023.

Figura 48. Exemplo de arranjo de coexistência entre mineradores da MAPE e empresas de mineração industrial



Fonte: DE TOMI, 2023.

As principais etapas de estruturação e implantação de um arranjo de coexistência estão descritas na Tabela 5 a seguir:

Tabela 5. Etapas de estruturação e implantação de um arranjo de coexistência

Etapa	Ações
Planejamento inicial	• Seleção do modelo de coexistência adequado para o contexto local • Estabelecimento de parcerias e acordos com partes interessadas. • Definição de escopo, metas e objetivos do modelo. • Envolvimento ativo dos mineradores da MAPE para garantir adesão.
Desenvolvimento do projeto	• Caracterização dos materiais a serem processados. • Elaboração de projetos de engenharia para infraestrutura e para a rota de processo. • Obtenção de licenças ambientais e operacionais.
Construção e implementação	• Instalação de equipamentos modernos e construção da usina de concentração. • Treinamento de operadores e mineradores em tecnologias sustentáveis.
Operação e monitoramento	• Comissionamento da planta e início das operações. • Acompanhamento contínuo para garantir a eficácia e sustentabilidade do modelo. • Estabelecimento de padrões de governança e gestão integrada.

Fonte: Elaborado pelo Autor

6.5.4. EXEMPLOS DE ARRANJOS DE COEXISTÊNCIA

A literatura descreve diversos exemplos de coexistência entre a MAPE e a mineração industrial em países da América Latina, como Peru, Colômbia e Costa Rica, além de relatos de casos de sucesso de coexistência na África e na Ásia.

A Tabela 6 apresenta alguns exemplos de projetos de coexistência da MAPE, os quais refletem estratégias distintas, que foram adaptadas aos contextos regionais e às particularidades de cada país. De modo geral, esses exemplos indicam as iniciativas das empresas de mineração industrial para equilibrar desafios e oportunidades na sua interface com a MAPE.

Tabela 6. Exemplos de projetos de coexistência entre MAPE e mineração industrial

Local	Empresa	Descrição da Iniciativa	Resultados
Mina Tasiast, Mauritânia	Kinross Gold	Criação do Comitê Corporativo de Gestão de Mineração Artesanal e de Pequena Escala (CSCASM) para apoiar a gestão de riscos associada à coexistência com a MAPE de ouro.	Colaboração com autoridades locais e as demais partes interessadas para estruturar o engajamento com trabalhadores da MAPE e mitigar os impactos dessas atividades no território e comunidades.
Bukina Faso, Costa do Marfim e Senegal	Endeavour Mining	Articulação corporativa para padronizar a análise de oportunidades de coexistência com a MAPE, incluindo formalização, presença de mineradores locais e migrantes e a flexibilidade para as respostas específicas em cada país.	Elaboração de planos de ação, revisados a cada dois meses, abrangendo monitoramento, engajamento das partes interessadas, desenvolvimento comunitário, formalização e segurança ocupacional.
Gana, Peru e Austrália	Gold Fields	Elaboração de padrões corporativos de desempenho para engajamento com a MAPE. Um dos destaques é a ênfase da fase de pesquisa mineral como uma oportunidade para apoiar as operações com relações mais equilibradas com a MAPE	Os padrões corporativos são aplicados para mitigar conflitos e maximizar os benefícios para a MAPE. Em Gana, a empresa estabeleceu áreas específicas dentro de suas concessões em Tarkwa para que a MAPE possa trabalhar legalmente.

Local	Empresa	Descrição da Iniciativa	Resultados
Gana, Tanzânia	AngloGold Ashanti	Desde 2016, a empresa implementou um programa corporativo de coexistência com operações legítimas da MAPE. A abordagem da empresa avalia iniciativas caso a caso, considerando critérios de conformidade com as leis locais e participação do poder público, promoção de projetos de coexistência, e respeito aos direitos humanos.	A empresa tem apoiado projetos de formalização da MAPE e tem contribuído para a formulação de políticas e práticas que fortalecem o setor. Projetos de coexistência são considerados uma questão crítica para a convivência das operações da empresa com mineradores da MAPE.
Gana, Suriname e Peru	Newmont	A Newmont foi pioneira na implementação de uma política corporativa para gerenciar interações com a MAPE em 2013. O objetivo é minimizar conflitos e melhorar a conformidade dos mineradores da MAPE com padrões regulatórios.	A atuação inclui a segurança de pessoas e ativos, a gestão de riscos ambientais, a promoção do desenvolvimento sustentável e alinhamento com a políticas e melhores práticas para a MAPE.
Mali, Filipinas e Colômbia	B2Gold	A empresa desenvolveu um padrão de desempenho para projetos de coexistência com a MAPE. Esses padrões buscam promover a formalização e a sustentabilidade da MAPE, beneficiando mineradores e comunidades locais.	Capacitação de mineradores na Colômbia em práticas ambientais. Adaptação de planos de mina nas Filipinas para permitir a coexistência com a MAPE. Aquisição de minério e rejeitos da MAPE fora das áreas de concessão ativa para reduzir o uso de mercúrio.

Local	Empresa	Descrição da Iniciativa	Resultados
Nicarágua	Calibre Mining	A empresa desenvolveu uma abordagem estruturada para gerenciar suas interações com a MAPE. Entre os objetivos estão a segurança de seus ativos, o apoio a benefícios comunitários e o acesso a mercados legítimos para os produtores da MAPE.	Monitoramento regular das atividades da MAPE e de seus impactos. Formação de comitês locais para engajamento com autoridades e mineradores da MAPE. Estabelecimento de acordos comerciais para compra de minério da MAPE.
Peru	La Rinconada	A empresa permite que cooperativas da MAPE operem explorem áreas delimitadas dentro de suas concessões. O objetivo é aumentar a produtividade da MAPE e promover a formalização do setor.	A coexistência tem permitido que cooperativas da MAPE implementem protocolos ambientais adequados e vendam o minério e os rejeitos à empresa por um preço justo.
Tanzânia	Acacia Mining/ Grupo Barrick	A empresa implementou um programa de coexistência na região de Geita, no qual mineradores da MAPE podem explorar áreas marginais não lucrativas para operações industriais.	O projeto de coexistência permite que a empresa receba dados geológicos nas áreas utilizadas pela MAPE e ofereça treinamentos em práticas seguras.
Burkina Faso	SEMAFO/ Grupo Endeavour	A empresa desenvolveu iniciativas de treinamento e formalização para a MAPE em torno de suas minas, especialmente em áreas onde a MAPE operava ilegalmente.	A empresa tem tido sucesso na negociação da implantação de zonas específicas dedicadas à MAPE em áreas menos produtivas de suas concessões.

Fonte: BICKHAM, 2023; DE TOMI, 2023; DE TOMI et al., 2022; MUTEMERI et al., 2024; VEIGA e FADINA, 2020; VEIGA et al., 2022.

6.5.5. ANÁLISE

A coexistência representa uma abordagem promissora para transformar a MAPE, promovendo práticas mais sustentáveis e socialmente responsáveis. Conforme apontado, a aplicação eficaz de arranjos de coexistência depende de um equilíbrio entre os interesses das empresas, dos mineradores e das comunidades.

O gerenciamento da interface entre a MAPE e a mineração industrial exige esforços coordenados de governos, empresas, organizações internacionais e comunidades locais. A formalização da MAPE, o uso de tecnologias limpas e a promoção de práticas sustentáveis são essenciais para transformar esse setor em uma atividade responsável, que contribui com a sociedade e com o desenvolvimento sustentável das comunidades.

As lições aprendidas com os projetos de coexistência descritos na literatura destacam a necessidade das empresas e do poder público adotarem abordagens colaborativas para gerenciar a interface com a MAPE. Esse aprendizado enfatiza a necessidade de apoio à formalização da MAPE e da promoção de sua integração aos mercados legais. Além disso, a coexistência ajuda no combate a práticas abusivas associadas à mineração informal e na promoção direitos humanos e ambientais. Para isso, as empresas precisam reconhecer as lideranças da MAPE como parte interessada nos processos de avaliação de impacto, engajamento comunitário e investimento social, além de facilitar o acesso a tecnologias limpas e mercados formais.

Embora existam desafios para a implantação de projetos de coexistência, os resultados obtidos em diversos contextos indicam que a coexistência representa uma ferramenta eficaz para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável e construir um futuro mais inclusivo e sustentável para o setor de mineração.

7. RECOMENDAÇÕES

Para facilitar a compreensão e sistematizar a informação, as recomendações resultantes deste trabalho no formato de Tabela, apresentada a seguir:

Tabela 7. Recomendações de ações no âmbito alternativas técnicas para compor o Plano de Ação Nacional

Tema	Recomendações
Assistência Técnica e Extensionismo Mineral	• Assegurar a oferta local de assistência técnica especializada e especificamente capacitada para atender os garimpeiros de ouro por meio de um programa de longo prazo de extensionismo mineral focado na otimização operacional e no fortalecimento do negócio. • Apoiar o extensionismo mineral como instrumento de capacitação e conscientização perene, que beneficia simultaneamente profissionais e garimpeiros, que assegura a troca de experiências e que propicia que os avanços tecnológicos e, principalmente, o fortalecimento organizacional sejam integralmente assentados na cultura garimpeira local. • Envolver os governos locais na oferta de assistência técnica e extensionismo mineral para coordenação de ações e otimização do uso de recursos públicos. • Fomentar a participação das universidades públicas e privadas sediadas na Amazônia Legal no programa de assistência técnica e extensionismo mineral proposto, para a formação de um contingente local de profissionais habilitados, com experiência no suporte técnico à garimpeiros, e assim assegurar a oferta futura de assistência técnica capacitada. • Adotar uma estratégia técnica orientada para a demonstração prática e concreta dos benefícios da adoção de melhorias técnicas para otimizar o processo de extração e concentração de ouro, a aplicação controlada de mercúrio, a queima confinada do amálgama e o controle da destinação de rejeitos (já iniciando a preparação para o abandono do uso de mercúrio), além dos princípios de reponsabilidade ambiental e social, respeitando o conhecimento e a cultura garimpeira. • Priorizar as comunidades garimpeiras que estejam utilizando práticas banidas pela Convenção de Minamata ou cujos impactos sociais e ambientais recomendem maior urgência de solução; no entanto, é indispensável apoiar de alguma forma todas as comunidades garimpeiras que solicitarem suporte. • A assistência técnica deve estar atenta e preparada para a eventual migração da exploração aurífera das comunidades garimpeiras para depósitos primários de baixo teor ou volume (que não viabilizam a extração por grandes mineradoras).

Capacitação e Treinamento dos Garimpeiros	• Ofertar capacitação aos garimpeiros de forma ampla e adequada à realidade cultural específica, envolvendo não apenas técnicas minerárias, mas também aspectos organizacionais que tornem a atividade econômica e institucionalmente sustentável e social e ambientalmente responsável. • Coordenar ações com a OCB e eventualmente universidade locais para capacitar gerencialmente as cooperativas e assegurar que cumpram suas finalidades institucionais em plenitude, inclusive se filiando às federações estaduais de cooperativas garimpeiras e à própria OCB (o que é uma exigência legal). • Produzir e disponibilizar via rede mundial de computadores um conjunto básico de materiais que demonstrem aos garimpeiros os benefícios da assistência técnica especializada e da formalização. • Fomentar o intercâmbio de informações entre os garimpeiros, por meio, por exemplo, de visitas técnicas e estabelecimento de fóruns virtuais (essa medida poderia beneficiar também outros países). • Colocar em evidência os vários exemplos de sucesso nacionais, em termos de desenvolvimento responsável da atividade.
Fomento a Tecnologias Livres de Mercúrio	• Investir na pesquisa, teste e avaliação de novas tecnologias para concentração/separação de ouro, livres de mercúrio, em especial nas pesquisas inovadoras relacionadas a biotecnologias, como o bioextrator produzido a partir de pau-de-balsa. • Estabelecer um programa de demonstração da eficiência equivalente ou superior de tecnologias livres de mercúrio na produção de ouro, por meio da implementação de pacotes de equipamentos de demonstração ou de unidades piloto preferencialmente móveis ou transferíveis. • Fomentar o desenvolvimento de equipamentos de mineração adaptados às necessidade do garimpo brasileiro, com envolvimento das universidades públicas e privadas e conexão com o Programa de Assistência Técnica e de Extensionismo Mineral proposto. • Fomentar a produção local de equipamentos que otimizem a produção garimpeira e incentivem o abandono do uso de mercúrio, por meio de transferência de tecnologia para pequenos fabricantes e eventual oferta de linhas de crédito. • Priorizar soluções que sejam: i. disponíveis localmente; ii. adaptadas às condições locais de infraestrutura; iii. acessíveis financeiramente; iv. fáceis e baratas de operar e manter; v. adaptáveis e efetivas para o tipos de mineralizações de ouro da região garimpeira como um todo; vi. adequadas às necessidades de mobilidade dos garimpeiros. • Investir em métodos de ampla divulgação de equipamentos e alternativas disponíveis, como feiras e exposições de equipamentos.

Financiamento da Mudança	• Apoiar a transição tecnológica e a formalização por meio de linhas de crédito acessíveis, quando possível subsidiadas, para a aquisição de equipamentos e insumos. • Apoiar mecanismos de certificação da mineração de ouro responsável por meio de benefícios fiscais ou mercadológicos, incluindo comercialização com preços diferenciados progressivamente para ouro produzido por tecnologias que não utilizem mercúrio ou que adotem critérios de produção responsável. • Apoiar cadeias produtivas complementares que agreguem valor ao ouro produzido, por exemplo, por meio do fomento a uma indústria joalheira artesanal de base local.
Fortalecimento Institucional	• Apoiar a ANM no processo de análise e decisão sobre os pedidos de titulação minerária referentes às comunidades garimpeiras de ouro para reduzir e, se possível, eliminar o passivo de processos pendentes; • Prover suporte para eventuais forças-tarefa para otimização e formalização das atividades minerárias das comunidades garimpeiras. • Fortalecer o conhecimento sobre geologia local e as características minerais das regiões garimpeiras a partir da criação de uma rede de compartilhamento de informações técnicas e consolidação dos dados produzidos pelo programa de assistência técnica e extensionismo mineral proposto. • Fortalecer os órgãos da Administração Pública especializados na orientação técnica, pesquisa e desenvolvimento, e produção de dados sobre e para a MAPE. • Constituir um grupo de expertise dentro da Administração Pública para avaliar, apoiar e mediar possíveis processos de coexistência como solução de conflitos.

8. CONSIDERAÇÕES FINAIS

As alternativas tecnológicas disponíveis oferecem um bom repertório de opções para o aumento da eficiência da MAPE de ouro, com um bom potencial imediato de redução de emissões e liberações de mercúrio. Esse mesmo repertório, em alguns casos por si só, e em outros a depender de tecnologias que estão em fase final de desenvolvimento, poderiam dar suporte ao total abandono do uso de mercúrio pela atividade.

Uma abordagem tecnológica, ou seja, centrada na otimização de processos técnicos e organizacionais, tem grandes chances de ser a melhor opção de sucesso no fomento desta transição, pois tem como características apresentar à MAPE, de modo concreto, alternativas de técnicas (modos de fazer), tecnologias (equipamentos ou meios de fazer), e, principalmente, metodologias (organização). Ademais, os resultados obtidos estarão amparados em condições de autossustentabilidade, garantindo a perenidade dos resultados positivos e a continuidade dos avanços obtidos.

Frente a variada oferta de opções técnicas, razoavelmente eficientes, o ponto crítico desta abordagem é a disponibilização de assistência técnica especializada que esteja apta a integrar o universo garimpeiro com os avanços desejados, isto significando que deverá possuir especial capacitação para reconhecer e respeitar o “modo de fazer garimpeiro” e construir as soluções de forma envolvente e participativa a partir deste ponto de partida, jamais impondo regras pela “hierarquia do saber”. Dada a localização “longínqua e isolada” das comunidades garimpeiras sob o ponto de vista da população caracteristicamente urbana do país, talvez encontrar técnicos aptos e dispostos a desempenhar essa complexa tarefa pode vir a ser desafiador.

Vencida esta etapa, a otimização do processo produtivo e o fortalecimento (ou criação) das estruturas organizacionais preferencialmente na forma de cooperativas, consolidarão uma relação de confiança entre os garimpeiros e a “assistência técnica”, facilitando as medidas para abandono do uso de mercúrio (espera-se que muito em breve).

Um importante catalisador para o processo de mudança seria a existência de mecanismos de certificação de ouro responsável que, em um primeiro momento, retribuísse o esforço garimpeiro no sentido da mudança para um patamar de maior consciência e reponsabilidade socioambiental por meio de preços melhores e, em

uma etapa posterior, punisse as organizações e países que adquirissem ouro não certificado, presumivelmente objeto de cadeias produtivas draconianas cujas maiores vítimas são os próprios mineradores. O movimento dúplice de capacitar os mineradores de um lado, e educar o mercado consumidor, de outro, poderia ser capaz de, a médio prazo, banir a fonte do problema do mercúrio na MAPE, garantindo uma distribuição mais justa dos benefícios da produção do ouro ao longo de sua cadeia produtiva.

Para a Administração Pública, a verdadeira missão é assegurar que a MAPE de ouro tenha acesso a uma assistência técnica adequada à sua característica de independência, liberdade e autonomia, tanto pelo fortalecimento dos mecanismos oficiais de extensionismo mineral, quanto pelo desenvolvimento e fortalecimento de um mercado de assistência técnica formado por profissionais locais.

Assegurado que os garimpeiros estão devidamente apoiados por profissionais conhecedores e respeitadores de sua cultura e participam de modo mais justo da distribuição dos benefícios do seu trabalho, o controle responsável e eventual abandono do uso do mercúrio serão meras consequências.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANTHONY, A.M.; ABUBAKAR-ZARIA, U.; ATTA, A.Y.; MAGAJI, S.S. **Recovery of gold from Shanono gold ore deposit using α-cyclodextrin**. Mining, Metallurgy & Exploration, v. 37, p. 1265–1271, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s42461-020-00227-4.

BEYUO, Martin; ABAKA-WOOD, George Blankson; ASAMOAH, Richmond; KABENIAH, A. **A comparative study of sodium cyanide and Jinchan TM gold leaching reagents: a case study at Goldfields Ghana Limited**. Research Gate, Conference Paper. 2016. Disponível em: file:///C:/Users/maced/OneDrive/%C3%81rea%20de%20Trabalho/DELL%202024-2025/PAN%20MINAMATA/PAN%20Minamata/PRODUTOS%20REVIS%C3%83O/DIONE/BIBLIOGRAFIA%20ALTERNATIVAS/P3.25Beyuoetal.pdf

BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Ensaios em concentrador centrífugo Knelson**. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais, cap. 19. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1064/1/Cap%2019%20Ensaios%20em%20Concentrador%20Centr%C3%ADfugo%20Knelson%203%E2%80%9D.pdf.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; COUTO, Hudson Jean Bianquini. **Ensaios de classificação granulométrica por meio de cicloclassificador**. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais, cap. 4. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1021/1/Cap%204%20Ensaios%20de%20Cicloclassifica%C3%A7%C3%A3o%20Granulom%C3%A9trica%20por%20meio%20de%20Cicloclassificador.pdf.

BRAGA, Paulo Fernando Almeida; COSTA, Lauro Santos Norbert. **Operação de classificação em aeroclassificador Sturtevant**. Tratamento de minérios: práticas laboratoriais, cap. 8. CETEM/MCT, 2005. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1036/1/Cap%208%20Opera%C3%A7%C3%A3o%20de%20Classifica%C3%A7%C3%A3o%20em%20Aeroclassificador%20Sturtevasnt.pdf

BRASIL MINERAL. **Sistema separa ouro a seco**. 2018. https://www.brasilmineral.com.br/noticias/sistema-separa-ouro-a-seco

BRASIL MINERAL. **Coexistência para parcerias resilientes no setor de pequena mineração.** 8º Congresso Mineração & Comunidades. Ano XL, n° 433. Belo Horizonte, MG. 2023. Disponível em: https://www.brasilmineral.com.br/revista/433/

BROOKS, Wiiliam E.; SIERRA-GIRALDO, Julio Andrés; PALACIOS, Francisco Mena. **Green gold-dirty Gold, Tadó, Dept. Chocó, Colombia**. Natural Resources, 6, 534-542. 2015 Disponível em: http://www.scirp.org/journal/nr

CARVALHO, Isa Lacerda. **Revisão bibliográfica sobre as tecnologias alternativas ao mercúrio no beneficiamento do ouro**. Trabalho de Conclusão de Curso, Curso de Engenharia de Minas, Faculdade de Engenharia (FAENG), da Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT), 44 p. Cuiabá/MT, 2023

CHENG, Yingchao; WATARI, Takuma; SECCATORE, Jacopo; NAKAJIMA, Kenichi; NANSAI, Keisuke; TAKAOKA, Masaki. **A review of gold production, mercury consumption, and emission in artisanal and small-scale gold mining (ASGM)**. Resources Policy 81 (2023) 103370. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2023.103370

CIMINELLI, Renato. **A nova geração de nano-minerais e nano-processos**. BRASIL MINERAL. O mundo dos minerais industriais. 2020

CLEANGOLD. Disponível em: https://www.cleangold.com/. Acesso em: 24 jan. 2025.

CNLITE. **Eco-friendly gold leaching reagent**. 2025. Disponível em: https://www.cnlitereagent.com/product/cnlite-eco-friendly-gold-leaching-reagent/?utm_source=google&utm_medium=cpc&utm_network=g&utm_device=c&utm_adposition=&utm_term=eco-friendly%20gold%20leaching%20reagent&utm_content=gold_leaching_reagent&utm_campaign=gold_agent&gad_source=1&gclid=CjwKCAiAt4C-BhBcEiwA8Kp0CViHqYKpJgaNdhGlkPRJSAaIJY2lIlnDIoxhT_jxvFmiFtmZJTv4CRoCfzsQAvD_BwE/

CYCLADEX. **Cycladex process**. 2023. Disponível em: http://cycladex.com/home/technology. Acesso em: 1 fev. 2023.

DELVE. **Sustainability and co-existence: Innovative solutions for artisanal and small-scale mining (ASM) in Brazil.** News & Events. 2023. Disponível em: https://www.delvedatabase.org/news/sustainability-and-co-existence-innovative-solutions-for-artisanal-and-small-scale-mining-asm-in-brazil

ESDAILE, L. J.; CHALKER, J. M. **The mercury problem in artisanal and small-scale gold mining**. Chemistry – A European Journal, v. 24, n. 27, p. 6905-6916, 2018. Disponível em: https://doi.org/10.1002/chem.201704840.

GIESE, Ellen Cristine. **Biolixiviação: uma avaliação das inovações tecnológicas na biomineração de minerais sulfetados no período de 1991 a 20**15. Tecnol. Metal. Mater. Miner., São Paulo, v. 14, n. 3, p. 192-203, 2017.

GRANATO, Marcus. **Metalurgia extrativa do ouro**. Seção Metalurgia Extrativa, n° 14. CETEM/DNPM. Brasília, 1986.

GRAYSON, Robin Francis. **Fine gold recovery: alternatives to mercury and cyanide purpose of study**. Research Gate, 2007. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/314237371

IGF, Intergovernmental Forum on Mining, Minerals, Metals and Sustainable Development. **Tailings management and reprocessing governance: global trends.** 2024. Disponível em: https://www.iisd.org/system/files/2024-05/igf-asgm-tailings-management-reprocessing-governance.pdf

LI, Haoyu; LONG, Hailin; ZHANG, Libo; YIN, Shaohua; LI, Shiwei; ZHU, Fei; XIE, Huimin. **Effectiveness of microwave-assisted thermal treatment in the extraction of gold in cyanide tailings**, Journal of Hazardous Materials, Volume 384, 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0304389419314104

HILSON, Gavin; MONHEMIUS, A. J. **Alternativas ao cianeto na indústria de mineração de ouro: quais as perspectivas para o futuro?** Revista de Produção Mais Limpa. Volume 14, Edições 12–13 ,2006, pp. 1158-1167. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2004.09.005 Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652605000636

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Grafeno recupera ouro sem os riscos do mercúrio**. Inovação Tecnológica, 18/08/2022. Disponível em: <www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=recuperacao-de-ouro-grafeno>.

INOVAÇÃO TECNOLÓGICA. **Garimpeiro com nanotecnologia encontra ouro mais facilmente**. Inovação Tecnológica - 26/02/2016. Disponível em: https://www.inovacaotecnologica.com.br/noticias/noticia.php?artigo=garimpeiro-nanotecnologia-encontra-ouro&id=010165160226

IN THE MINE. **Centro de tecnologia em comissionamento**. Seção Garimpo. 2024. Disponível em: https://www.inthemine.com.br/site/centro-de-tecnologia-em-comissionamento/ acesso em 13/02/2025.

IN THE MINE. **Cenário e projeções para a atividade garimpeira**. Seção Garimpo. 2024. Disponível em: https://www.inthemine.com.br/site/cenario-e-projecoes-para-a-atividade-garimpeira/ acesso em 13/02/2025.

IQBAL, Aqsa; RUKHMA, S.; ALI, Sikander. **Research on gold extraction**. Research Gate, 2024.

KEANE, Susan; BERNADAUT, Ludovic; DAVIS, KENNETH, KENNETH, Kenneth J.; STYLO, Malgorzata; MUTEMERI, Nelia; SINGO, Patience; TWALA, Pontsho; MUTEMERI, Itai; NAKAFEERO; ETUI, Imelda D. **Mercury and artisanal and small-scale gold mining: review of global use estimates and considerations for promoting mercury free alternatives**. Ambio, v. 52, n. 5, p. 833-852, 2023. Springer Science and Business Media LLC. Disponível em: https://doi.org/10.1007/s13280-023-01843-2

LEÃO, Naomi, FREITAS, Alessandra Doce Dias, CARRERA, Ruth Helena Andrade. **Informativo técnico Rede de Sementes da Amazônia**. N° 19, 2008. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/326560620_Informativo_Tecnico_Rede_de_Sementes_da_Amazonia_Pau-de-balsa_Informativo_Tecnico

LIMA, Rodrigo Gonçalves; SILVA, Renato Barboza; LIMA, Helledsen Ramos da Silva; HANADA, Rogerio Eiji; AZEVEDO, João Lúcio. **Cianeto de mandioca: viabilidade econômica do uso de manipueira para erradicação do mercúrio na mineração, e proposta para bioeconomia circular na Amazônia, Brasil**. Research, Society and Development, v. 11, n. 7, e43211729981, 2022. Disponível em: http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i7.29981.

LINS, Fernando A. Freitas. **Aspectos diversos da garimpagem de ouro**. CETEM/MCT. 1992. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/165/1/stm-54.pdf

LINS, Fernando A. Freitas. **Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente**. CETEM/MCT. 2010.Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/735/1/CCL00290010.pdf.

LUZ, Adão Benvindo, LINS, Fernando A. Freitas. **Introdução ao tratamento de minérios**. in Tratamento de Minérios, 5ª ed., p. 3–20. Eds: Adão B. da Luz, João Alves Sampaio e Silvia Cristina A. França. CETEM/MCT. Rio de Janeiro, 2010.

MARTINEZ, Gerardo, RESTREPO-BAENA, Oscar Jaime; VEIGA, Marcelo M. **The myth of gravity concentration to eliminate mercury use in artisanal gold mining**. The Extractive Industries and Society. Vol. 8, n. 1, p. 477-485, 2021. Disponível em https://doi.org/10.1016/j.exis.2021.01.002

MEDEIROS, Paulo. **Cobre e ouro: revolução no beneficiamento mineral**. 2017 Disponível em: https://www.linkedin.com/in/paulo-augusto-medeiros/recent-activity/articles/

MOURA, M.F. **Aplicação do sistema de beneficiamento a seco de ouro na baixada cuiabana**. Trabalho de Conclusão de Curso, Engenharia de Minas da Universidade Federal de Mato Grosso/ UFMT. 2022.

OLIVEIRA, Débora Monteiro; SÉRVULO, Eliana Flávia Camporense; SOBRAL, Luis Gonzaga Santos; PEIXOTO, Gabriel Henrique Costa. **Biolixiviação: utilização de micro-organismos na extração de metais**. Série de Tecnologia Ambiental, CETEM/MCT, 2010. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/317/1/sta-53.pdf

PELIZARI, Gabriel; MESQUITA, Maria José. **Substitutos ao mercúrio na mineração de ouro artesanal e de pequena escala**. XXX Congresso de Iniciação Científica, Universidade Estadual de Campinas, 2022. Disponível em < https://prp.unicamp.br/inscricao-congresso/resumos/2022P20395A37544O2835.pdf

PERES, A E. C., CHAVES, A. P., LINS, F. F., TOREM, M. L. **Beneficiamento de minérios de ouro**. In: Extração de ouro: princípios tecnologia e meio ambiente Eds: R B E Trindade e O B Filho. CETEM/MCT p 23-58. 2002 Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/687/1/extracao-ouro.pdf

RAPOSO, Fortunato Lucas Quembo. **Investigação das características operacionais na jigagem a seco, visando à adoção de novas estratégias do processo**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Porto Alegre, RS, 2023.

RING T A., CURRIER F N, KLUMPR, I. **Air classifiers, chemical engineering**, 1986. Disponível em: https://my.che.utah.edu/~ring/Publications-PDFs/J-17.pdf

RODRIGUEZ, Alfonso; ESPINOSA, Charlie. **Trapping a slippery foe**. The Chemical Engineer, n. 963, ago. 2021. Disponível em < https://www.thechemicalengineer.com/features/trapping-a-slippery-foe >

SAMPAIO, João Alves; LUZ, Adão Benvindo; FRANÇA, Silvia Cristina Alves. **Separação magnética e eletrostática**. In Tratamento de minérios. CETEM/MCT, Cap. 9, 2007. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/741/1/CCL00310010.pdf

SAMPAIO, João Alves; OLIVEIRA, Gerson Pereira; SILVA, Antonio Odilon. **Ensaios de classificação em hidrociclone**. CETEM/MCT, Cap. 7, 2005. Disponível em: http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1035/1/Cap%207%20Hidrociclone.pdf.

SANTOS, Ronaldo Luiz Correa dos; BRAGA, Paulo Fernando Almeida. **Possibilidades tecnológicas para o beneficiamento de ouro**. In: Seminário Alternativas Tecnológicas Sustentáveis no Tapajós, 2010, Itaituba. Anais.

SALVADOR, F.F.; SILVA, N.K.G.; BARROZO, M.A.S.; VIEIRA, L.G.M. **Estudo experimental do tipo de separação de partículas em um hidrociclone concentrador**. Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Química, Uberlândia, 2014.

SOBRADIEL, Victor Chicati; GOMES, Ana Cláudia Franca. **Beneficiamento de ouro em mineração em pequena escala em Peixoto de Azevedo**. Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia – CONTECC, 04 a 06 de outubro de 2021.

STAPPER, D., DALES, K., VELASQUEZ, P., KEANE, S. **Best management practices for cyanide use in the small-scale gold mining sector**. Published by the PlanetGOLD Programme (Global Environment Facility and United Nations Environment Programme). October 2021. Disponível em: https://www.planetgold.org/sites/default/files/CN%20Best%20Practices%20in%20ASGM_Final_Dec%2016%202021_0.pdf

TORKAMAN, P.; VEIGA, M.M.; DE ANDRADE LIMA, L.R.P.; OLIVEIRA, L.A.; MOTTA, J.S.; JESUS, J.L.; LAVKULICH, L.M. **Leaching gold with cassava: an option to eliminate mercury use in artisanal gold mining**. Journal of Cleaner Production 311: 127531. 2021.

UNIR, Universidade Federal de Rondônia. **Estudo da UNIR busca alternativa ao uso do mercúrio**. 2023. Disponível em: https://www.unir.br/cartao/exibir/89

VEIGA, Marcello Mariz da; SILVA, Alberto Rogério B.; HINTON, Jennifer J. **O garimpo de ouro na Amazônia: aspectos tecnológicos, ambientais e sociais**. In: Extração de ouro: princípios, tecnologia e meio ambiente. Cap.11. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2002. p. 277-305. ISBN 85-7227-150-3. Disponível em < http://mineralis.cetem.gov.br:8080/bitstream/cetem/1233/1/extracao-ouro%20cap.11.pdf >

VEIGA, Marcelo M., FADINA, Omotayo. **A review of the failed attempts to curb mercury use at artisanal gold mines and a proposed solution.** The Extractive Industries and Society v. 7, p. 1135-1146. 2020. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214790X20302033

VEIGA, M. M., TARRA, J.A., RESTREPO, O.J., DE TOMI, G. **Coexistência como um processo de formalizar mineiros artesanais de ouro e reduzir poluição.** XXIX ENTMME. Rio de Janeiro. 2022. Disponível em: https://publicacoes.entmme.org/filebase/2022/veiga,mm tarra,ja restrepo-baena,oj de tomi,g -coexistencia como um processo de formalizar mineiros artesanais de ouro e reduzir poluicao -146524.pdf

WILLS, Barry A.; FINCH, James A. **Wills' Mineral Processing Technology**. Oxford: Butterworth-Heinemann, 8. Ed. ISBN 9780080970530. 2016.

WORLD GOLD COUNCIL. **Lessons learned on managing the interface between large-scale and artisanal and small-scale gold mining**. 2023. Disponível em: https://www.gold.org/download/file/17063/ASGM-Report-2022-English.pdf

XU, B.; KONG W.; LI, Q.; YANG, Y.; JIANG, T.; LIU, X. **Uma revisão da lixiviação de ouro por tiossulfato: foco no consumo de tiossulfato e recuperação de ouro de solução impregnada**. Metais. 2017; 7(6):222. https://doi.org/10.3390/met7060222 Disponível em: https://www.mdpi.com/2075-4701/7/6/222