



República Federativa do Brasil
Ministério do Desenvolvimento, Indústria
e Comércio Exterior
Instituto Nacional de Propriedade Industrial

(21) BR 10 2012 032158-0 A2



(22) Data de Depósito: 17/12/2012
(43) Data da Publicação: 09/09/2014
(RPI 2279)

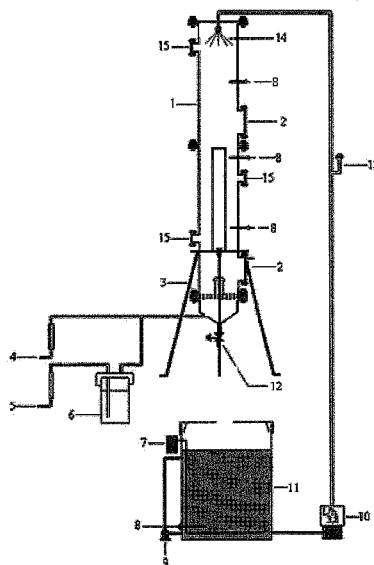
(51) Int.Cl.:
C22B 3/18

(54) **Título:** BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA

(73) **Titular(es):** Centro de Tecnologia Mineral - CETEM

(72) **Inventor(es):** Carlos Eduardo Gomes de Souza, Débora Monteiro de Oliveira, Luis Gonzaga Santos Sobral

(57) **Resumo:** BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA. Refere-se a presente invenção a um processo e aparato para a biolixiviação de minérios primários de cobre, níquel, zinco, cobalto, molibdênio, urânio, metais preciosos, rejeitos de flotação da produção de concentrados dos sulfetos desses metais, e, ainda, de minérios intemperizados (minérios ditos oxidados) com produção biológica simultânea de ácido sulfúrico a partir de enxofre elementar e/ou pirita.



Relatório descritivo da patente de Privilégio de Invenção para
“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E
MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO
SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA”.

5 Refere-se a presente invenção a um processo e aparato para a biolixiviação de
minérios primários de cobre, níquel, zinco, cobalto, molibdênio, urânio, metais preciosos,
rejeitos de flotação da produção de concentrados dos sulfetos desses metais, e, ainda, de
minérios intemperizados (minérios ditos oxidados) com produção biológica simultânea de
ácido sulfúrico. O invento utiliza alíquotas desses substratos minerais, para a simulação da
10 operação de uma pilha, para o preenchimento de colunas de polipropileno, dotadas de
sistemas de irrigação de solução ácida lixiviante, de insuflação de ar e aquecimento externo
para a utilização de micro-organismos acidófilos mesofílicos e termofílicos (moderados e
extremos), visando a aceleração dos processos bio-oxidativos envolvidos (biolixiviação
dos sulfetos minerais de interesse comercial bem como do enxofre elementar e pirita),
15 principalmente na biolixiviação de sulfetos minerais refratários, a exemplo da calcopirita
(CuFeS_2), que se configura, nos dias atuais, como a principal fonte de cobre. Os substratos
minerais responsáveis pela geração *in situ* de ácido sulfúrico (enxofre elementar e/ou
pirita) são utilizados, após cominuição apropriada, na forma de um recobrimento (*coating*)
de partículas grosseiras (de 3mm até $\frac{1}{2}$ polegada) dos minérios a ser biolixiviados
20 (minérios primários e intemperizados). No caso dos rejeitos de flotação supramencionados,
esses serão aglomerados juntamente com os substratos minerais geradores de ácido
sulfúrico (enxofre elementar e/ou pirita), em proporções adequadas, adicionando-se ainda,
quando necessário, agentes aglomerantes para a formação de pelotas para a formação do
leito mineral a ser utilizado nas colunas onde ocorrerá o processo de biolixiviação.

25

Justificativa da Invenção

Através dos seus principais derivados, o ácido sulfúrico, o enxofre se classifica
como um dos mais importantes elementos utilizados como matéria-prima industrial. É de
primordial importância para todos os sectores dos complexos industriais e dos adubos no
30 mundo. A produção de ácido sulfúrico é a grande utilização final de enxofre, e o consumo
de ácido sulfúrico tem sido considerado um dos melhores índices de desenvolvimento de

uma nação. A produção mundial de ácido sulfúrico é superior a 150 milhões de toneladas por ano.

Existe uma vasta gama de aplicações industriais para o ácido sulfúrico. Alguns exemplos destes incluem a sua utilização em: fertilizantes à base de fósforo e nitrogênio; refino de petróleo; lixiviação de minerais; ou seja, a extração industrial de cobre, zinco, níquel e titânio; produção de insumos orgânicos e inorgânicos; em processos de fabricação de tintas e pigmentos; na indústria metalúrgica na produção de ferro, aço e não ferrosos; produção de rayon e filme de celulose; papel e celulose; e tratamento de água. Devido às suas propriedades desejáveis, o ácido sulfúrico manteve a sua posição como o ácido mineral e o mais universalmente produzido e consumido produto químico em volume.

O ácido sulfúrico é tipicamente produzido via transformação catalítica de dióxido de enxofre (SO_2) em trióxido de enxofre (SO_3), seguido pela reação do SO_3 com água para a formação de ácido sulfúrico. O SO_2 é tipicamente originado ou pela queima direta do enxofre elementar ou via ustulação de sulfetos minerais de metais de base (*i.e.*: cobre, zinco e chumbo).

Apesar dos processos tecnológicos de captura de SO_2 a partir da queima direta de ambos os sulfetos de metais de base e de enxofre têm sido substancialmente melhorados, estes captam apenas entre 95% e 99% dessas emissões. As tecnologias mais antigas, baseadas em fundições, onde as restrições para emissões são significativamente menos severas, estão localizadas em locais remotos, principalmente na América do Sul, África do Sul e China, onde têm sido afetados por pressões ambientais cada vez mais crescentes.

No entanto, mesmo estas remotas fundições estará sob pressão crescente no futuro para reduzir a quantidade de emissões nocivas. O aperfeiçoamento dessa rota processual implicaria em custo substancial. Por conseguinte, seria vantajoso ter um processo para a produção de ácido sulfúrico que eliminasse os riscos ao meio ambiente que estão associados com a produção atual de ácido sulfúrico.

Adicionalmente, operações tais como lixiviação de metais estão associadas às minerações e instalações localizadas em áreas remotas e em países com infraestruturas precárias para o manuseio de ácido sulfúrico concentrado, produto químico extremamente perigoso. Muitas das operações de lixiviação utiliza soluções aquosas de ácido sulfúrico contendo menos que 20g.L^{-1} . Com o avanço tecnológico, o ácido sulfúrico é produzido em

elevada concentração e posteriormente transportado ao local de uso onde é diluído com água para produzir as soluções aquosas utilizada em muitas operações de lixiviação. Conseqüentemente, seria vantajoso ter um processo que permitisse a produção de soluções aquosas de ácido sulfúrico bem próximo ao ponto de uso e eliminasse os perigos associados ao transporte e manuseio do ácido sulfúrico concentrado.

Como ilustrado na Figura 1, existe, há muito, a necessidade de um processo mais custo efetivo e ambientalmente amigável para produzir ácido sulfúrico. O objetivo dessa invenção é proporcionar um processo alternativo para produzir ácido sulfúrico que utiliza produtos minerais não perigosos e comercialmente disponíveis, tais como enxofre elementar e/ou minérios contendo sulfetos minerais, e/ou sulfetos minerais em separado que permitam a transferência de massa suficiente entre sólido/líquido/gás na sua produção comercial. Esse processo deve ter um custo de capital significativamente mais baixo do que qualquer outro processo de produção em uso reduzindo o impacto ambiental na eliminação quase que total de emissões.

O conceito de produção de ácido sulfúrico em reatores, em pequena escala, utilizando meios biológicos tem sido discutido na literatura por Cerruti *et al.*, no tema “Bio-dissolution of spent nickel-cadmium batteries using *Thiobacillus Ferroxidans*, *Journal of Biotechnology*, 62, 209-211(1998); Curutchet *et al.*, Combined degradation of covellite by *Thiobacillus Thiooxidans* and *Thiobacillus Ferroxidans*, *Biotechnol. Lett.*, 18, 1471-1476 (1996); Tichy *et al.*, Possibilities for using biologically-produced sulphur for cultivation of *Thiobacilli* with respect to bioleaching processes, *Bioresource Technology*, 48, 221-227 (1994); Tichy *et al.*, Oxidation of biologically-produced sulphur in a continuous mixed-suspension reactor, *Wat. Res.*, Vol. 32, 701-719 (1998); Otero *et al.*, Action of *Thiobacillus Thiooxidans* on sulphur in the presence of a surfactant agent and its application in the indirect dissolution of phosphorous, *Process Biochemistry*, vol. 30, 747-750, (1995); and Brissette *et al.*, Bacterial leaching of cadmium sulphide, *The Canadian Mining and Metallurgical (CIM) Bulletin* for October, 1971, 85-88, (1971). Entretanto, nesses estudos o enxofre elementar foi utilizado em pó nos ensaios de laboratório. Tichy (1994) indicou que as taxas de produção de ácido sulfúrico utilizando flor de enxofre são muito baixas e que aplicações industriais desse processo são questionáveis.

Consequentemente, seria vantajoso ter um processo que gerasse ácido sulfúrico por meios biológicos com taxas de produção que fossem apropriadas às aplicações industriais.

FUNDAMENTOS DA INVENÇÃO

5 A biolixiviação é um processo bioquímico que é baseado na capacidade que certos micro-organismos possuem em transformar elementos insolúveis, presentes em certos minérios, em elementos solúveis e fáceis de serem extraídos desses minérios. Dentre os vários tipos de minérios destaca-se os sulfetos minerais que podem ser identificados como a Calcocita (Cu_2S), Bornita (Cu_5FeS_4), Galena (PbS), Esfalerita (ZnS), Calcopirita
10 (CuFeS_2), Pirrotita (Fe_{1-x}S), Pentlandita ($\text{Fe,Ni}_9\text{S}_8$), Covelita (CuS), Cinábrio (HgS), Orpigmenta (As_2S_3), Estibnita (Sb_2S_3), Pirita (FeS_2), Marcasita (FeS_2), Molibdenita (MoS_2), Arsenopirita (FeAsS), enargita (Cu_3AsS_4), tenantita ($\text{Cu}_{12}\text{As}_4\text{S}_{13}$), dentre outros. Certos elementos como cobre, urânio, zinco, mercúrio, chumbo e arsênio são alguns dos metais que podem ser extraídos via processo bioquímico. Os micro-organismos lixiviantes
15 são caracterizados pela singular capacidade de se desenvolverem em ambientes praticamente inabitáveis para a maioria dos micro-organismos, pois habitam em lugares com pH extremamente baixo e temperatura que podem variar entre 25 a 80°C. Num processo de lixiviação de sulfetos minerais podem ser extraídos de concentrados de flotação, do minério *in natura*, de rejeitos de processos de flotação e, ainda mais
20 recentemente, a partir de minérios intemperizados.

A lixiviação biológica, ou biolixiviação, se mostra bastante atraente no que tange à eliminação das emanações gasosas, devido às condições brandas de processo e à obtenção de uma lixívia ácida contendo o metal de interesse. No processo de biolixiviação podem ser utilizados micro-organismos autotróficos, acidófilos estritos e quimiolitotróficos,
25 mesófilos e termófilos para extração do metal de interesse. Destacam-se como micro-organismos mesófilos, os microorganismos que atuam na temperatura entre 25 e 40°C. Os termófilos moderados são os micro-organismos cuja temperatura de atuação varia entre 40 e 55°C, enquanto micro-organismos termófilos extremos são aqueles micro-organismos que atuam na faixa de temperatura entre 55 e 80°C.

30 A presente invenção visa controlar, de forma ordenada, os processos biológicos que ocorrem: i- numa pilha de concentrado de flotação de sulfetos minerais de um dado

elemento, sendo necessário, nesse caso, a utilização de uma rocha suporte (*i.e.*: minério primário que deu origem ao referido concentrado, minério marginal de mesma origem e, ainda, uma rocha inerte – quartzo) para a ancoragem do referido concentrado; ii- minério primário de um dado metal de interesse; iii- resíduos de flotação proveniente de um dado processo de obtenção de um concentrado de sulfetos minerais, sendo nesse caso utilizado o mesmo processo mencionado em (i), podendo ser, também, aglomerado e as pelotas resultantes utilizadas na construção da pilha e, finalmente, iv- minério intemperizado o que necessita de uma fonte de enxofre para a geração *in situ* de ácido sulfúrico que é prevista, na presente invenção, pela adição, ao leito mineral, de pirita e/ou enxofre elementar. Numa pilha de biolixiviação sem controle externo, é observado que micro-organismos mesófilos são atuantes nas áreas mais externas da pilha, ou seja, nas áreas onde ocorre maior troca térmica, e os termófilos moderados e extremos atuam nas partes mais internas da pilha, em suas faixas correspondentes de temperatura. Os processos oxidativos que ocorrem possuem caráter exotérmico e há uma tendência de elevação intensa de temperatura no interior do corpo da pilha, podendo ocorrer, como consequência dessa intensificação de calor, a morte de parte desses micro-organismos. No entanto, com o controle de temperatura em combinação com a vazão de insuflação de ar pode-se evitar a morte dos micro-organismos e chegar a um resultado significativo de extração do metal de interesse.

A presente invenção consegue monitorar, via computador, o potencial redox, temperatura, pressão e pH, além de permitir identificar a atuação de distintos consórcios microbianos, a saber: mesófilos, termófilos moderados e extremos, utilizando um equipamento constituído de uma coluna, contendo o leito mineral no qual é estabelecido uma rampa de aquecimento do corpo mineralizado, pelo fornecimento de calor externo, identificando os patamares de temperaturas próprios de cada consórcio atuante. A coluna de biolixiviação possui, também, janelas (2 e 15) que servem para amostragem do leito mineral, durante o processo de biolixiviação, para a devida identificação dos micro-organismos aderidos às partículas dos sulfetos minerais de onde se extrai os metais de interesse. Assim, por meio da retirada da amostra e identificação dos micro-organismos, através de técnicas de biologia molecular, é possível fazer o monitoramento da comunidade bacteriana. Da mesma forma se pode proceder à verificação da densidade populacional microbiana, que está aderida às partículas dos sulfetos minerais existentes. Aliando o

monitoramento microbiológico às medidas de potencial redox, que estão diretamente associadas ao monitoramento computadorizado permanente da coluna, é possível fazer a interpretação dos processos bio-oxidativos que se realizam ao longo de todo leito mineral constituinte do interior da coluna.

5

SUMÁRIO DA INVENÇÃO

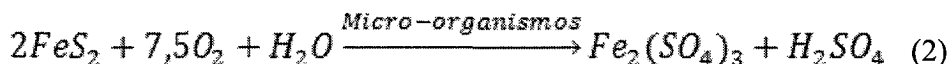
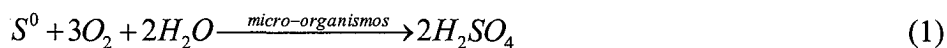
A biolixiviação de minérios primários de cobre, níquel, zinco, cobalto, molibdênio, urânio, metais preciosos, rejeitos de flotação da produção de concentrados dos sulfetos desses metais e, ainda, de minérios intemperizados (minérios ditos oxidados) com
10 produção biológica simultânea de ácido sulfúrico.

O processo de biolixiviação em questão, com produção biológica simultânea de ácido sulfúrico, a partir da inserção de pirita e/ou enxofre no leito mineral, em escala piloto, com controle computacional da ação de micro-organismos autotróficos, acidófilos estritos, na extração desses metais de interesse, na forma de sulfato, ponto de partida para a
15 obtenção desses metais em suas formas metálicas.

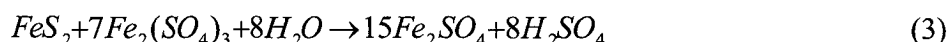
No caso do processo de biolixiviação em análise, com produção simultânea de ácido sulfúrico, a partir de enxofre elementar e/ou pirita, objeto desse pedido de patente, é possível investigar a atuação dos distintos consórcios microbianos mesófilos e termófilos utilizados, num sistema reacional constituído de uma coluna de 4 metros de altura com
20 50cm de diâmetro, estabelecendo-se uma rampa de aquecimento do corpo mineralizado, pela oferta externa de calor, com patamares de temperaturas próprios de cada consórcio atuante.

Considerando os dispositivos mecânicos e eletro-eletrônicos utilizados no sistema reacional em questão é possível prever a ação dos distintos consórcios microbianos associando os valores de potencial redox, medidos continuamente, com as faixas de
25 temperatura experimentadas pelo leito mineral e, ainda, com os micro-organismos atuantes em distintas regiões desse leito, bem como avaliar a produção de ácido sulfúrico proveniente da oxidação biológica da pirita e/ou enxofre elementar, processos esses que propiciam a oferta de ácido sulfúrico para a manutenção dos micro-organismos acidófilos
30 utilizados. As reações que traduzem a geração de ácido sulfúrico a partir das fontes

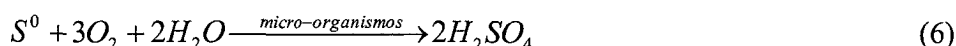
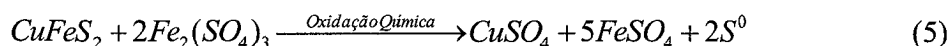
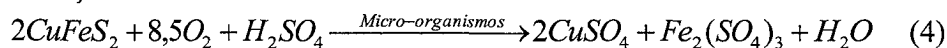
minerais inseridas no leito das fontes dos sulfetos de interesse, ou seja o enxofre elementar e pirita, são:



5 Entretanto, a reação de oxidação da pirita tem seu processo continuado pela sua oxidação química pelo sulfato férrico gerado, ou seja:



10 Entretanto, ácido sulfúrico é, também, gerado a partir da oxidação dos sulfeto de interesse, como, por exemplo a calcopirita, como mostrado em suas respectivas reações de oxidação:



15 A forma de inoculação dos consórcios microbianos, juntamente com o conjunto mineral (substratos minerais, de onde se pretende extrair os metais de interesse, + enxofre elementar e/ou pirita), permite uma maior adesão desses micro-organismos à superfície das partículas dos sulfetos minerais de interesse e das fontes extras geradoras de ácido sulfúrico, configurando-se como um mecanismo direto de bio-disponibilização desses metais de interesse para a fase aquosa, durante a etapa inicial de cura desse conjunto
20 mineral, etapa essa que antecede a operação de irrigação do leito mineral.

BREVE DESCRIÇÃO DOS DESENHOS

Com o intuito de tornar mais clara a presente invenção, a seguir descreve-se o equipamento computadorizado capaz de monitorar as etapas de um processo de biolixiviação
25 composta de uma coluna de biolixiviação conforme ilustrado nas Figuras 1, 2 e 3 a seguir:

Figura 1 – Equipamento constituído de uma coluna de biolixiviação com detalhes do monitoramento da temperatura do leito mineral, sistema de insuflação de ar e CO₂, tanque de lixívia, bombas dosadora e pneumática, vigias de inspeção e amostragem da fase sólida e sistema de aquecimento da solução
30 do tanque de lixívia.

Figura 2 –Dispositivo mecânico, posicionando em diversas alturas de leito mineral, fixado na parede da coluna, para o monitoramento do potencial redox da lixívia.

Figura 3 – Parte inferior da coluna de biolixiviação, com detalhes do sistema de insuflação e dosagem de ar e CO₂ e válvula de drenagem de sólidos arrastados do leito mineral por ocasião da operação de irrigação desse leito com solução lixivante.

DESCRIÇÃO DETALHADA DA INVENÇÃO

10 Para tornar mais clara a presente invenção, a carga mineral a ser adicionada à coluna (1) de leito mineral é preparada seguindo um procedimento experimental apropriado.

De modo a facilitar a compreensão desta coluna (1) e seus dispositivos apresentados nas figuras de 1 a 3, teremos:

15 A coluna (1) propriamente dita; uma janela de inspeção (2); o suporte (3) da coluna (1); a entrada (4) para o suprimento de CO₂; a entrada (5) para o suprimento de Ar; o dispositivo umidificador (6) de Ar; o dispositivo de controle da resistência de imersão (7); o sensor medidor de temperatura (8); a bomba pneumática (9); a bomba dosadora (10); o tanque de lixívia (11); a saída de lixívia (12); o transmissor de pressão (13); o spray de
20 lixívia (14); janelas para amostragem de sólidos (15); dispositivos medidores de potencial Redox (16); coletores de solução (17) dentro da coluna (1); placa de aço inox perfurada (18), sobre os bocais dos coletores de solução (17); elemento de fixação (19) em aço inox para fixar os dispositivos medidores de potencial Redox (16) à parede (20) da coluna (1); eletrodo de medição de potencial Redox (21); válvulas controladoras de renovação de
25 lixívia (22); reservatório para medição do potencial Redox (23); substrato mineral em processo de biolixiviação (24); enxofre elementar (25); pirita (26); saída para análise da composição da mistura gasosa (CO₂ + Ar); drenagem de sólidos (28) e o elemento de retorno (29) de lixívia para o tanque (11).

Em primeiro lugar é pesada a massa da mistura constituída do substrato mineral de
30 onde será extraído o metal de interesse (*i.e.*; concentrado de flotação, ancorado em uma rocha suporte apropriada; ou um minério primário, na granulometria de 3 a 6 mm, ou o

rejeito de flotação ancorado, da mesma forma que no caso do concentrado de flotação, numa “rocha suporte” apropriada e, por fim, o minério intemperizado.). De uma forma mais recomendada, nos casos da utilização de concentrados de flotação e rejeitos de flotação, pesa-se 90% da “rocha suporte” e 10% dos substratos minerais de interesse.

5 Como rocha suporte pode ser utilizado um minério marginal do metal de interesse (minério com baixo teor no metal de interesse), um minério comercializável, ou uma rocha inerte às condições experimentais (*i.e.*: quartzo) para a realização da biolixiviação. Adicionam-se a esses substratos minerais as fontes minerais externas que propiciarão a geração biológica de ácido sulfúrico (*i.e.*: Pirita e/ou enxofre elementar), quer em separadas ou

10 conjuntamente. Ao final da mistura desses materiais minerais, ter-se-á um leito mineral constituído de regiões onde coexistirão os minerais de interesse extrativo e as fontes adicionais geradoras de ácido sulfúrico (S^0 e FeS_2) como ilustrado na Figura 2.

De posse da mistura mineral, essa é colocada em uma betoneira e misturada com uma suspensão dos consórcios microbianos em solução ácida sulfúrica, suficiente para

15 manter o pH inicial entre 1 e 2, contendo os elementos nutrientes (N, P e K) necessários ao metabolismo dos micro-organismos. Essa carga mineral é colocada no interior da coluna (1), permanecendo por, pelo menos, 24 horas para que ocorra uma cura da carga mineral com a solução ácida sulfúrica. Essa cura tem por objetivo a digestão de espécies minerais constituintes da ganga do minério original.

20 Cessado o período de cura, é dada a partida na operação de irrigação da solução lixiviante contida no tanque de lixívia (11 – Figura 1). Esse meio lixiviante é constituído de solução sulfúrica em pH variando entre 1 e 2, contendo elementos nutrientes essenciais ao metabolismo dos micro-organismos atuantes no processo bio-oxidativo, um meio de cultura cuja composição conta com a presença de 5 a 15 g/L em $FeSO_4$, 0,5 a 5% p/v em

25 enxofre elementar, 0,5 a 5 % de concentrado de flotação contendo os sulfetos do metal de interesse, visando a aclimatação dos micro-organismos aos metais contidos nos referidos sulfetos, utilizando-se, ainda, sais inorgânicos contendo os nutrientes N, P e K cuja concentração dependerá de uma análise prévia da carência ou excesso desses sais nos substratos minerais em processo bio-extrativo. De uma forma mais recomendada e não

30 limitativa pode-se utilizar de 0,1 a 2 g/l em $(NH_4)_2SO_4$, 0,01 a 0,05 g/L em K_2HPO_4 , 0,2 a 0,6 g/L em $MgSO_4 \cdot 7H_2O$. Essa solução visa suprir as necessidades nutricionais dos micro-

organismos atuantes no processo de biolixiviação. Ainda, de uma forma mais recomendada e mais eficiente utilizam-se 10g/L em FeSO₄, 1% de enxofre elementar e 1% de concentrado de flotação. A densidade populacional dos micro-organismos a ser utilizada é calculada em função da massa de sulfeto a ser utilizada no processo bio-oxidativo e varia de 10⁵ a 10⁷ células de cada consórcio de micro-organismos por grama de sulfeto utilizado no processo bio-oxidativo que, no caso da utilização de minério primário ou rejeitos de flotação, essa densidade é calculada levando-se em conta o teor de sulfeto nesses substratos minerais.

Neste processo de biolixiviação são utilizados três tipos de consórcios microbianos constituídos dos chamados micro-organismos mesófilos, termófilos moderados e extremos, conforme descrito anteriormente, que têm a função de oxidar os íons ferrosos a férricos que, em meio ácido, agem como agente oxidante dos sulfetos minerais, e o enxofre, na forma de sulfeto (S²⁻), a enxofre elementar (S⁰) ou, de forma mais enérgica, aos íons sulfato (SO₄²⁻).

O equipamento computadorizado em questão se mostra bastante eficiente no que se refere à biodigestão de sulfetos minerais com disponibilização do metal de interesse na forma de sulfato. Com os dispositivos eletrônicos e mecânicos, como, por exemplo, termopares, medidores de fluxo de ar e CO₂, circuitos eletrônicos para a aquisição de dados e software para a manipulação de dados, torna-se possível desvendar a rota de atuação dos micro-organismos nos distintos consórcios utilizados, em suas faixas características de temperatura, simulando, de forma fidedigna, a ação desses micro-organismos numa escala ampliada.

Os micro-organismos envolvidos no processo de biolixiviação da presente invenção podem ser os micro-organismos mesófilos, sendo que os principais micro-organismos desse gênero utilizados neste processo de biolixiviação são: *Acidithiobacillus ferrooxidans*, *Acidithiobacillus thiooxidans* e *Leptospirillum ferrooxidans*. O outro consórcio é constituído pelos micro-organismos termófilos moderados que, igualmente aos micro-organismos mesófilos, têm a tarefa de digerir os sulfetos supracitados, atuando numa faixa mais elevada de temperatura (40 a 55°C), com a mesma função de oxidar os íons ferrosos, sulfetos e o enxofre elementar adicionado. Os principais micro-organismos utilizados desse gênero no processo de biolixiviação são: *Sulfobacillus thermosulfidooxidans*,

Acidithiobacillus caldus, *Acidimicrobium ferrooxidans* e *Sulfobacillus acidophilus*. Por último, tem-se o consórcio dos micro-organismos termófilos extremos que atuam de forma similar as dos dois primeiros consórcios, sendo que numa faixa de temperatura mais elevada (55 a 80°C). Os micro-organismos desse gênero, utilizados na composição do consórcio, são: *Acidianus brierleyi*, *Acidianus infernus*, *Metallosphaera sedula*,
5 *Sulfolobulus metallicus*, *Sulfolobulus acidocaldarius* e *Sulfolobulus shibatae*.

A seguir, exemplos que ilustram os procedimentos para praticar a invenção. Estes exemplos não devem ser construídos como limitantes.

10 Exemplo de aplicação da tecnologia:

Uma massa de 37g de enxofre elementar, previamente hidrofiliado pelo uso de 20ppm de um biossurfatante (ramnolipídeo), foi colocado em contato com 3700g de minério primário de cobre, contendo em sua composição, além do minerais da ganga desse minério, os sulfetos calcopirita (CuFeS_2), bornita (Cu_5FeS_4) e pirita (FeS_2). Essa mistura
15 foi colocada em um aglomerador e irrigada com solução contendo nutrientes e micro-organismos. Após produção do aglomerado mineral, esse foi colocado no interior de uma coluna semi-piloto com 10cm de diâmetro compondo um leito mineral de 60cm. Essa coluna foi posicionada sobre um tanque de 20 litros de volume útil, carregado com solução aquosa de meio de cultura 9K, inoculada com micro-organismos acidófilos. Esse meio de
20 cultura continha os seguintes sais: $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, CaCl_2 , KH_2PO_4 e $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$. Essa solução lixiviante foi circulada pelo leito mineral com uma vazão de $3\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, momento em que o processo de lixiviação teve seu início. Adições diárias de água destilada foram realizadas para se manter o volume do tanque em 20 litros. A solução aquosa foi circulada até que a concentração de ácido sulfúrico atingisse $20 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ (0,2M) que
25 corresponde a um pH de 0,7. Nesse estágio, um volume apropriado de solução aquosa foi removida e a mesma quantidade de solução aquosa, com a mesma composição salina supramencionada, foi adicionada para se elevar o pH da solução para 1,8 (0,016M em ácido sulfúrico). Durante os 120 dias de lixiviação 18,4 litros de solução foram removidos do tanque de lixívia. O peso total de ácido sulfúrico produzido foi de 360,64 g totalizando
30 uma produção de 3 gramas de ácido por dia de biolixiviação.

REIVINDICAÇÕES:

- 1) **“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA”**, sendo caracterizado por um sistema reacional, em
5 escala piloto, com controle computacional da ação de micro-organismos autotróficos, acidófilos extritos, na extração dos elementos de interesse, provenientes desses substratos minerais, na forma de sulfato, ponto de partida para a obtenção desses elementos em suas formas metálicas.
- 10 2) **“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA”**, sendo caracterizado pelo processo de biolixiviação em análise, com geração in situ de ácido sulfúrico, objeto desse pedido de patente, é
15 possível investigar a atuação dos distintos consórcios utilizados, num sistema reacional constituído de uma coluna de 4 metros de altura com 50cm de diâmetro, estabelecendo-se uma rampa de aquecimento do corpo mineralizado, com patamares de temperaturas próprios de cada consórcio atuante.
- 20 3) **“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA”**, sendo caracterizado pelo fato em que considerando os dispositivos mecânicos e eletro-eletrônicos utilizados no sistema reacional em
25 questão é possível prever a ação dos distintos consórcios microbianos associando os valores de potencial redox, medidos continuamente, com as faixas de temperatura experimentadas pelo leito mineral e, ainda, com os micro-organismos atuantes em distintas regiões desse leito.
- 30 4) **“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE**

ELEMENTAR E/OU PIRITA“, sendo caracterizado pela forma de inoculação dos consórcios microbianos, juntamente com o conjunto mineral (substratos minerais, de onde se pretende extrair os metais de interesse, + enxofre elementar e/ou pirita), permite uma maior adesão desses micro-organismos à superfície das partículas dos sulfetos minerais de interesse, configurando-se como um mecanismo direto de bio-
5 disponibilização dos metais para a fase aquosa, durante a etapa inicial de cura desse conjunto mineral, etapa essa que antecede a operação de irrigação do leito mineral.

5) **“BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE ENXOFRE
10 ELEMENTAR E/OU PIRITA**“, sendo caracterizado pelas fontes minerais responsáveis pela geração biológica de ácido sulfúrico (S_0 e FeS_2) podem ser adicionadas ao leito mineral, contendo os sulfetos minerais que disponibilizarão os metais de interesse para o meio aquoso, quer conjuntamente ou em separadas. A
15 quantidade dessas fontes minerais a serem adicionadas ao leito mineral levará em conta a necessidade da manutenção do pH na faixa recomendada para a atuação dos micro-organismos acidófilos utilizados.

Figura 1

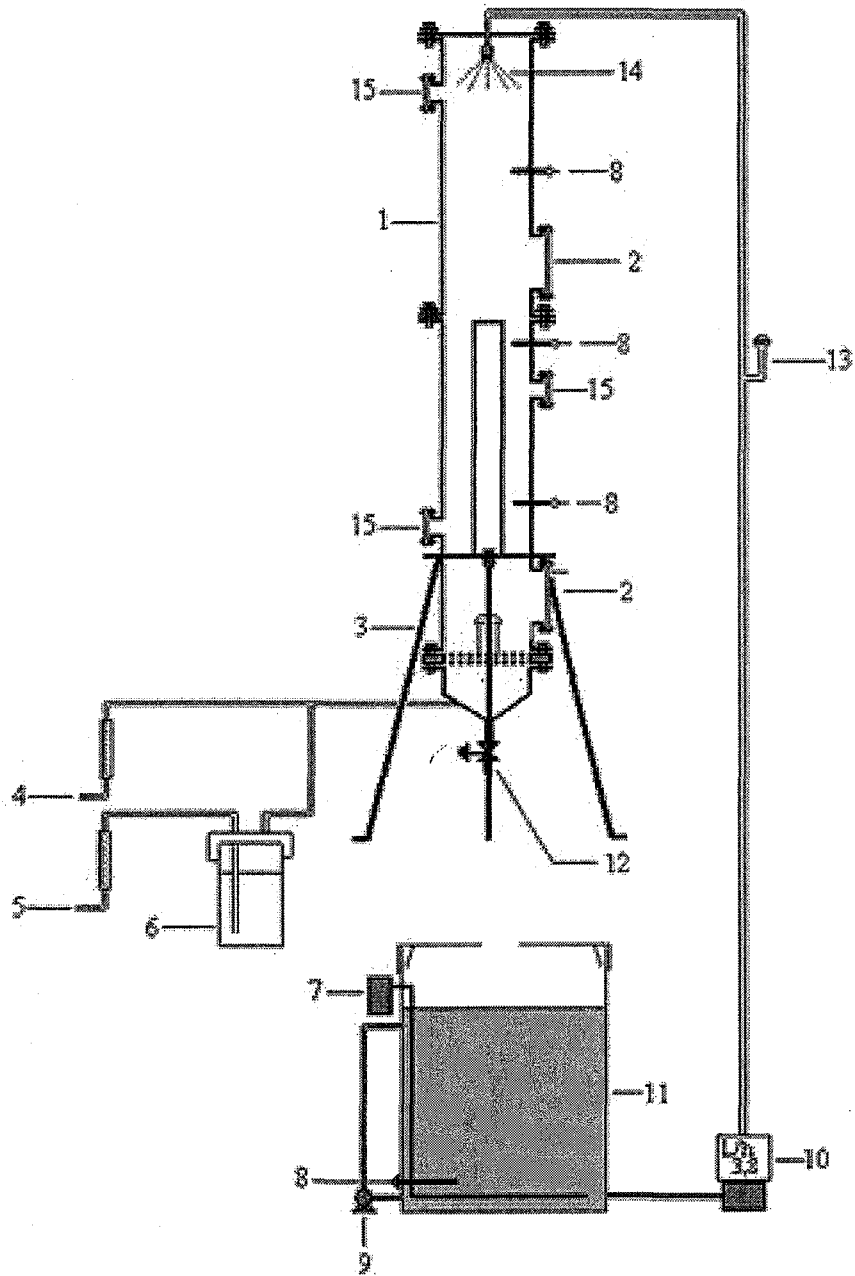


Figura 2

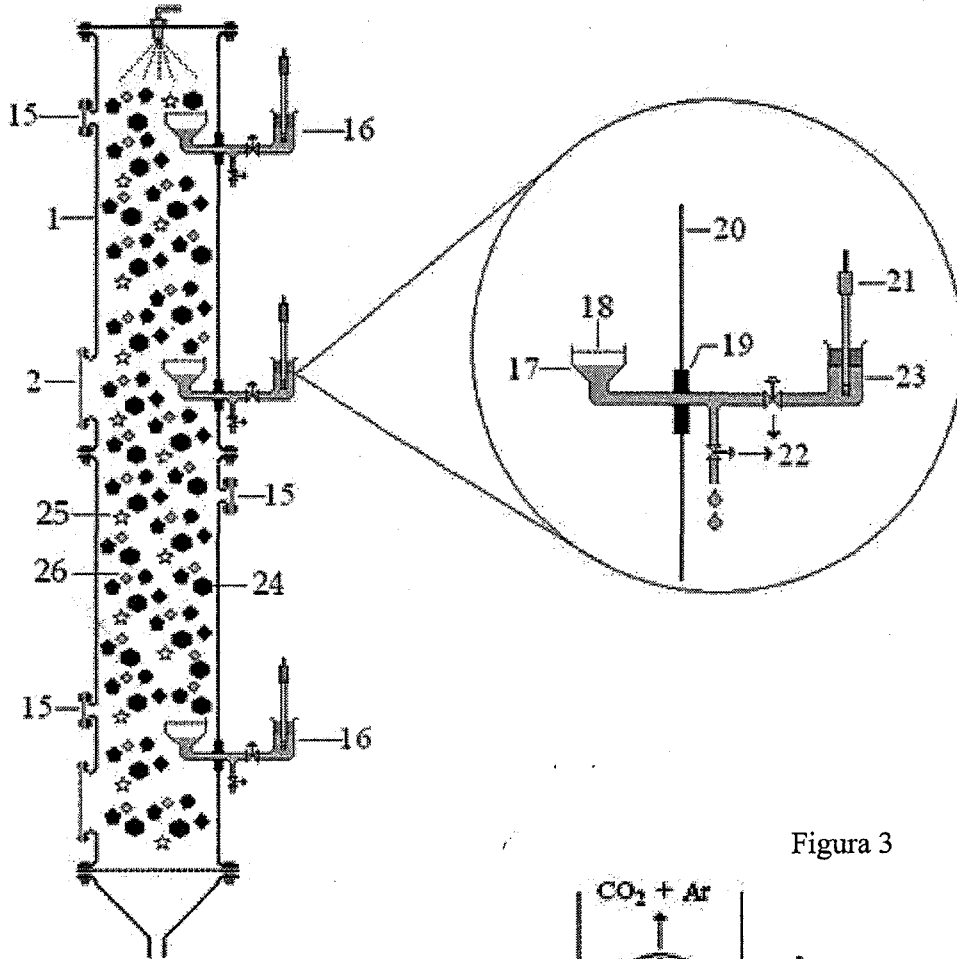
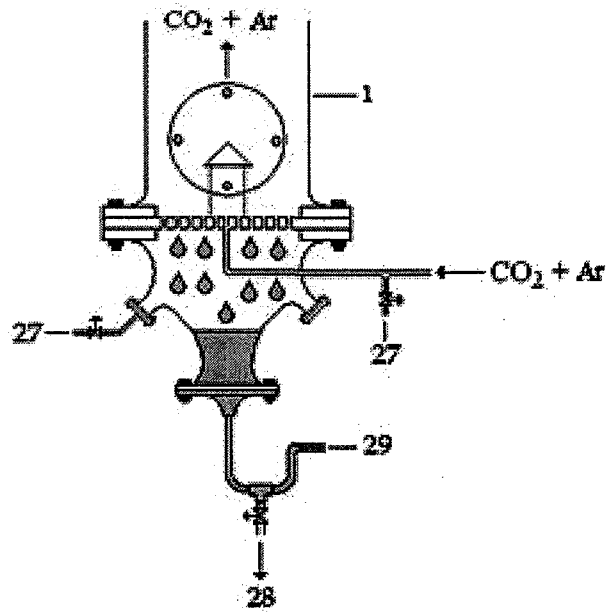


Figura 3



RESUMO

Patente de Privilégio de Invenção para “**BIOLIXIVIAÇÃO DE MINÉRIOS PRIMÁRIOS, REJEITOS DE FLOTAÇÃO E MINÉRIO INTEMPERIZADO COM PRODUÇÃO BIOLÓGICA DE ÁCIDO SULFÚRICO A PARTIR DE**
5 **ENXOFRE ELEMENTAR E/OU PIRITA**”.

Refere-se a presente invenção a um processo e aparato para a biolixiviação de minérios primários de cobre, níquel, zinco, cobalto, molibdênio, urânio, metais preciosos, rejeitos de flotação da produção de concentrados dos sulfetos desses metais, e, ainda, de minérios intemperizados (minérios ditos oxidados) com produção biológica simultânea de
10 ácido sulfúrico a partir de enxofre elementar e/ou pirita.