

Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Gustavo Dorota Carreiro de Mello

**Metodologia para Seleção de Rotas Tecnológicas no
Tratamento de Efluentes Contaminados por Metais Pesados**

São Paulo

2012

Gustavo Dorota Carreiro de Mello

Metodologia para Seleção de Rotas Tecnológicas no Tratamento de Efluentes
Contaminados por Metais Pesados

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.

Data da Aprovação: ___ / ___ / _____

Prof. Dr. Marcelo Seckler (Orientador)

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Membros da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Seckler (Orientador)
Escola Politécnica da Universidade de Estado de São Paulo

Prof. Dr. Luiz Alexandre Kulay (Membro)
Escola Politécnica da Universidade de Estado de São Paulo

Prof. Dr. Silas Derenzo (Membro)
IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo

Gustavo Dorota Carreiro de Mello

Metodologia para Seleção de Rotas Tecnológicas no Tratamento de
Efluentes Contaminados por Metais Pesados

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo – IPT, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Processos Industriais.

Área de Concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Seckler

São Paulo
Outubro / 2012

Ficha Catalográfica
Elaborada pelo Departamento de Acervo e Informação Tecnológica – DAIT
do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT

M527m

Mello, Gustavo Dorota Carreiro de

Metodologia para seleção de rotas tecnológicas no tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. / Gustavo Dorota Carreiro de Mello. São Paulo, 2012.
236p.

Dissertação (Mestrado em Processos Industriais) - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. Área de concentração: Desenvolvimento e Otimização de Processos Industriais.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Seckler

1. Tratamento de efluente 2. Contaminação por metal pesado 3. Adsorção por zeólita 4. Adsorção por biossorventes 5. Precipitação química 6. Osmose reversa 7. Flotação iônica 8. Rotas tecnológicas 9. Tese I. Seckler, Marcelo, orient. II. IPT. Coordenadoria de Ensino Tecnológico III. Título

12-82

CDU 628.54(043)

DEDICATÓRIA

Agradeço a minha mãe e ao meu pai, primeiros e melhores mestres de minha vida. Vocês são os grandes responsáveis pela minha determinação em busca do conhecimento e do aprendizado contínuo, bem como guias nos princípios de ética, dedicação e profissionalismo.

Dedico especialmente este trabalho a Lygia Rodrigues de Moraes de Andrade de Mello, por ser a incentivadora do meu Mestrado, pela execução das primeiras figuras (quando tudo ainda era muito incerto), pelo seu companheirismo e amizade em todos os momentos, pela sua raça e determinação nos estudos, e pela sua dedicação e amor a nossa vida em família. *Lygia, companheira, amiga, esposa, mulher, confidente, meu modelo de conduta e objetivo maior da minha vida...*

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT) pela oportunidade deste Mestrado Profissional e por toda a seriedade e comprometimento dos seus funcionários pela qualidade total.

Agradeço ao meu Orientador, o Prof. Dr. Marcelo Seckler, por todas análises, revisões e comentários sobre o trabalho, desde as primeiras hipóteses sobre abordagem do tema até às conclusões finais deste estudo.

Agradeço ao Prof. Dr. Luiz Kulay e ao Prof. Dr. Silas Derenzo, componentes da Banca Examinadora, por todos os comentários técnicos (e até filosóficos) sobre este trabalho, os quais permitiram incrementar a qualidade e a profundidade da abordagem deste estudo.

Agradeço a Sra. Maria Natalina de Almeida Martins, por todo apoio, atenção, educação e alegria nas inúmeras vezes que solicitei trabalho à excelente Biblioteca do IPT.

Agradeço a ENVIRON Brasil Engenharia Ambiental por ter contribuído com este trabalho, incentivando-me a alcançar horizontes profissionais e pessoais cada vez maiores, além de proporcionar um ambiente extremamente ético e focado no respeito e qualidade.

Agradeço ao amigo e projetista Marcelo B. Bruhns, pela preparação das figuras finais deste trabalho, as quais mostram seu enorme potencial artístico e técnico.

Agradeço ao Sr. Charles Chapplin de Mello por toda a companhia durante as etapas noturnas deste estudo, nas quais sempre tinha sua presença na mesma mesa de trabalho.

Agradeço as minhas irmãs Fernanda Dorota de Mello e Carolina Graziza de Mello pela revisão do trabalho, incentivo e amizade constante. Também agradeço ao Sr. Max de Mello por toda energia, dedicação e amor total que tem pela nossa família...

RESUMO

No presente trabalho propõe-se um método de seleção de rota tecnológica para tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. O método de seleção é caracterizado por três etapas de análises: uma avaliação técnica preliminar; uma avaliação econômica, baseada na estimativa dos custos de implantação e de operação; e uma análise do ciclo de vida dos processos químicos, realizada com base em requisitos ambientais, de saúde e de segurança. Foram avaliadas cinco rotas tecnológicas utilizadas para o tratamento de efluentes: adsorção por zeólitas, adsorção por bio sorventes, precipitação química, osmose reversa e flotação iônica. Para testar a aplicabilidade do método de seleção foram feitas simulações com quatro cenários hipotéticos, variando-se os parâmetros vazão do efluente e concentração de metais no efluente. Ao final da avaliação, pôde-se definir qual a melhor rota tecnológica para cada cenário hipotético. O método de seleção proposto é inovador, sendo necessário atualmente em função da demanda significativa por remediação ambiental, na qual fatores econômicos, ambientais, de saúde e segurança devem definir o tipo de projeto a ser implantado.

Palavras-Chave: remediação ambiental. tratamento de efluentes por metais pesados. avaliação do ciclo de vida de processos. avaliação econômica de processos. adsorção. bio sorventes.

ABSTRACT

Method for Selection of Technological Routes for the Treatment of Wastewater Contaminated by Heavy Metals

In this paper a method for selection of technological routes for treatment of wastewater contaminated by heavy metals is proposed. The method for selection is defined by an evaluation in three steps: a technical analysis of each route; an economic evaluation, based in the investment and operation costs; and a life cycle assessment of each process, which is based on environmental, health and safety criteria. Five technological routes used for wastewater treatment are assessed: adsorption by zeolites, biosorption, chemical precipitation, reverse osmosis and ionic flotation. Aiming to testing the applicability of the method for selection, simulations within four hypothetical scenarios were done, changing flow rate and heavy metals concentration in the wastewater. By the end of the evaluation, it was possible to define the best technological route for each hypothetical scenario. The selection method proposed is innovative and is currently needed due to the significant demand for environmental remediation, in which economic, environmental, health and safety factors shall define the type of project to be implemented.

Keywords: environmental remediation. life cycle assessment for chemical processes. costing evaluation for chemical processes. wastewater contaminated by heavy metals. adsorption.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Vias de Transporte dos Metais no Meio Ambiente	16
Figura 2: Fluxograma Básico – Projeto de Tratamento	19
Figura 3: Fluxograma do Método de Seleção Proposto	23
Figura 4: Fluxograma do Processo – Adsorção por Zeólitas	31
Figura 5: Fluxograma do Processo – Adsorção por Biossorventes	40
Figura 6: Fluxograma do Processo – Precipitação Química	49
Figura 7: Fluxograma do Processo – Osmose Reversa	57
Figura 8: Fluxograma do Processo – Flotação Iônica	67
Figura 9: Avaliação Econômica – Custo de Instalação.....	81
Figura 10: Avaliação Econômica – Custo de Operação	85
Figura 11: Roteiro para Determinação Conceitos Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança...	93
Figura 12: Custos Médios de Instalação e de Operação Anual	106

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Avaliação Econômica – Custo Total de um Sistema de Tratamento.....	87
Tabela 2: Matriz de Abordagem de Avaliação – Avaliação Ambiental.....	92
Tabela 3: Matriz de Abordagem de Avaliação – Avaliação de Saúde e Segurança.....	92
Tabela 4: Cenários Hipotéticos – simulações para teste do método de seleção	96
Tabela 5: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético I.....	98
Tabela 6: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético II.....	99
Tabela 7: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético III.....	100
Tabela 8: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético IV	101
Tabela 9: Resultados da Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos	107
Tabela 10: Conceitos Atribuídos da Avaliação Ambiental – rotas tecnológicas	109
Tabela 11: Conceitos Atribuídos da Avaliação de Saúde e Segurança – rotas tecnológicas.....	109
Tabela 12: Notas de cada Rota Tecnológica na Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança...	110
Tabela 13: Rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para cada cenário hipotético.....	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
NR	Norma Regulamentadora do Ministério do Trabalho

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	OBJETIVO	13
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1	Contaminação Ambiental	14
3.2	Metais Pesados.....	15
3.3	Tratamento de Efluentes	17
4	METODOLOGIA DE TRABALHO	23
4.1	Avaliação Técnica Preliminar	24
4.2	Avaliação Econômica	25
4.3	Avaliação Ambiental, de Saúde e de Segurança.....	26
4.4	Aplicação do Método de Seleção	27
5	AVALIAÇÃO TÉCNICA PRELIMINAR	29
5.1	Adsorção por Zeólitas	29
5.2	Adsorção por Biosorventes	38
5.3	Precipitação Química	47
5.4	Osiose Reversa	56
5.5	Flotação Iônica.....	65
6	AVALIAÇÃO ECONÔMICA	75
6.1	Metodologia da Avaliação Econômica.....	75
7	AVALIAÇÃO AMBIENTAL, DE SAÚDE E SEGURANÇA	88
7.1	Metodologia da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança.....	88
8	RESULTADOS E DISCUSSÕES	95
8.1	Avaliação Técnica Preliminar – Cenários Hipotéticos.....	96
8.2	Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos.....	97
8.3	Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança – Cenários Hipotéticos	108
8.4	Discussões do Método de Seleção	110
8.5	Discussões da Avaliação Econômica	111
8.6	Discussões da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança.....	114
8.7	Definição das Rotas Tecnológicas para os Cenários Avaliados	115
9	CONCLUSÕES	117
	REFERÊNCIAS	119
	APÊNDICE 1 – Diretrizes para Determinação dos Conceitos na Avaliação Ambiental...	123
	APÊNDICE 2 – Diretrizes para Determinação dos Conceitos na Avaliação de Saúde e Segurança	137

APÊNDICE 3 – Memorial de Cálculo – Balanços de Massa e Energia – Cenários Hipotéticos	153
APÊNDICE 4 – Memorial de Cálculo – Correção de pH.....	174
APÊNDICE 5 – Memorial de Cálculo – Dimensionamento Equipamentos – Cenários Hipotéticos	177
APÊNDICE 6 – Resultados da Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos.....	210
APÊNDICE 7 – Matrizes da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança – Cenários Hipotéticos	231
ANEXO 1 – Riscos Associados aos Metais.....	235
ANEXO 2 – Tecnologias para Tratamento de Efluentes Contaminados por Metais Pesados.....	236

1 INTRODUÇÃO

A problemática da contaminação ambiental é assunto que ganha força a cada ano no Brasil em virtude da descoberta de novas áreas impactadas, do maior controle ambiental pelos órgãos públicos e da maior importância do tema na sociedade.

A partir da década de 1980 até os dias atuais, houve aumento na fiscalização dos processos industriais e, por isso, um conseqüente avanço nas tecnologias para a identificação e tratamento de potenciais áreas contaminadas. Esse quadro torna factível o aprimoramento dos processos industriais para, nas condições em que a contaminação ambiental já foi constatada, ser possível a reparação do ônus causado ao meio ambiente. Tal reparação consiste na implementação de processo de remediação ambiental, processo este no qual o risco da contaminação ambiental ao homem e/ao meio ambiente é diminuído até níveis permitidos pelos órgãos públicos de controle ambiental.

Países da Europa Ocidental e da América do Norte possuem maior disponibilidade de tecnologias para remediação ambiental. Países até então ditos “em desenvolvimento” conseguem atualmente um maior contato com este tipo de tecnologia de ponta, seja por meio da divulgação científica, seja por meio da atuação de empresas multinacionais no exercício de suas políticas corporativas.

Dentre os tipos de contaminação ambiental, os impactos causados pelos metais pesados são de elevada importância, pois uma vasta gama de atividades industriais manipula ou produz elementos metálicos. Desta produção, quando inadequada, decorrem cenários de contaminação de solo e água subterrânea.

Os metais pesados não são biodegradáveis e se perpetuam ao longo das cadeias alimentares, acumulando-se nos corpos dos seres vivos. A presença por si só de metal na natureza não é algo impactante; alguns dos metais são necessários à vida vegetal e, conseqüentemente, animal. Porém, há risco para os seres vivos se o teor de metais é excessivo; este risco é proporcional à concentração de metais no ambiente.

Existem diversas tecnologias para o tratamento de águas subterrâneas contaminadas por metais pesados. Diversos estudos já foram feitos sobre as rotas tecnológicas disponíveis, quais suas vantagens e desvantagens. Porém, no início de um projeto de tratamento de águas subterrâneas contaminadas por metais pesados, o

avaliador (responsável pelo projeto) tem em mãos diversas opções de rotas tecnológicas aplicáveis a sua situação. A pergunta inicial e primordial nestas situações é: qual rota tecnológica utilizar? A resposta geralmente é feita em função de uma avaliação econômica. Em alguns casos, a opção é escolhida em função da experiência de membros da equipe técnica, sem ao menos ter sido feita qualquer avaliação comparativa. Para ambas as situações, é comum que, ao longo da operação do sistema de tratamento, problemas ocorram, os quais poderiam ter sido evitados se a rota tecnológica adequada tivesse sido escolhida.

Podem-se destacar atualmente cinco principais rotas tecnológicas para tratamento de efluentes contaminados por metais pesados: processos de adsorção em zeólitas, processos de adsorção em biossorventes, precipitação química, osmose reversa e flotação. Alguns outros métodos estão em estudo, bem como muitas pesquisas estão em andamento a fim de otimizar estas tecnologias já consagradas.

Em literatura são encontrados alguns métodos de seleção para rotas tecnológicas de tratamento de efluentes. Alguns estudiosos (BLAIS ET AL. 2008; KURNIAWAN et al. 2006; LAZARIDIS ET AL. 2004; EVANKO, DZOMBAK, 1997; PEREIRA NETO et al. 2008) tentaram criar equações ou tabelas-resumo comparativas para definir a opção tecnológica a utilizar. Outros se limitaram a analisar a questão de maneira técnica, ou econômica ou ambiental, não integrando estas abordagens. Porém, estas informações não são suficientes para definir a melhor rota tecnológica a ser utilizada para cada caso.

Desta forma, o presente trabalho objetiva propor um método de seleção de rotas tecnológicas para um sistema de tratamento de águas subterrâneas contaminadas por metais pesados. Este método de seleção é baseado em análises econômica, ambiental, de saúde e de segurança.

As particularidades de cada projeto são abordadas no método de seleção, o qual não tem a função de definir a rota tecnológica ótima, mas de indicar qual seria a rota tecnológica adequada para determinada situação ou projeto.

2 OBJETIVO

O objetivo deste trabalho é propor uma metodologia para a seleção de rota tecnológica (processo) para sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados, baseada em avaliações técnicas, econômicas, ambientais, de saúde e de segurança destes processos.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Contaminação Ambiental

Uma definição de contaminação ambiental pode ser encontrada no site da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), o qual possui vasta bibliografia sobre áreas contaminadas.

Uma área contaminada pode ser definida como uma área, local ou terreno onde há comprovadamente poluição ou contaminação causada pela introdução de qualquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados de forma planejada, acidental ou até mesmo natural (CETESB, 2011).

De acordo com Günther (2006), a existência de áreas contaminadas é resultado de processos socioeconômicos não ambientalmente sustentáveis, além do decorrente uso e ocupação do solo sem observância aos parâmetros de proteção ambiental.

Ainda segundo a mesma autora, as principais causas da existência de áreas contaminadas são: incidentes decorrentes da disposição inadequada de resíduos no passado, manejo inadequado de substâncias perigosas nos processos industriais, inadequada disposição dos resíduos e efluentes, armazenamento indevido de substâncias químicas, vazamentos, acidentes e desativação de processos industriais.

Existem diversas áreas no Brasil e no mundo classificadas como áreas contaminadas. Os dois fatores que mais influenciaram esta questão foram a desindustrialização a partir de 1980 e a ocupação do espaço próximo às regiões industriais por contingentes populacionais de força de trabalho a partir de 1930. Especificamente na região metropolitana do Estado de São Paulo, o passado histórico marcado pelo modelo de industrialização aliado ao processo de urbanização e expansão urbana desordenada contribuiu para a existência de áreas contaminadas.

Nas últimas três décadas (a partir de 1980), a questão das áreas contaminadas tem ganhado destaque em países industrializados (EUA, Japão e Europa Ocidental) em função do aparecimento de casos envolvendo problemas de saúde pública. No Brasil não há uma legislação nacional sobre a questão das áreas contaminadas (GÜNTHER, 2006). No Estado de São Paulo, o assunto começou a ser tratado em 1993 com uma cooperação entre organismos públicos e iniciativa privada, culminando no documento “Manual de

Gerenciamento de Áreas Contaminadas” (Cetesb, 1999). Este documento estabelece a metodologia de gerenciamento adotada no Estado e possibilita a efetiva atuação e encaminhamento de soluções para a recuperação ambiental.

Outro instrumento de gerenciamento ambiental no Estado de São Paulo é o “Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo” (Cetesb, 2005). Neste documento, valores de referência de qualidade, valores de prevenção e valores de intervenção são definidos para contaminação no solo e na água subterrânea. Com base nestes valores e em análises de risco toxicológico, ações de intervenção / remediação são tomadas.

3.2 Metais Pesados

3.2.1 Caracterização

Metal pesado pode ser definido como qualquer metal com densidade superior a 6 g/cm³. Este termo é empregado para designar uma série de elementos químicos, os quais possuem elevada importância industrial e biológica. (ALLOWAY, 1990).

Metal pesado não pode ser simplificado como sinônimo de metal tóxico. Alguns destes metais são necessários à vida vegetal e animal quando em baixas concentrações (Co, Cr, Cu, Mn, Mo e Zn). Porém, em concentrações mais elevadas, eles tornam-se tóxicos.

3.2.2 Efeitos sobre o Ser Humano e o Ambiente

Os metais pesados possuem efeito cumulativo também no corpo humano, sendo persistentes e não degradáveis biologicamente (MULLIGAN; YONG; GIBBS, 2001).

Os maiores riscos à saúde são decorrentes das vias de exposição por ingestão ou contato dermal com a água subterrânea contaminada por metais pesados. Desta forma, a retirada dos metais pesados dissolvidos na água subterrânea é fundamental para se evitar que a contaminação se propague e aumente o risco para a saúde.

O **Anexo 1** apresenta uma tabela com os riscos associados à saúde humana dos principais elementos metálicos que podem atuar como contaminantes na natureza.

Segundo Kurniawan et al (2006), a indústria de manipulação e produção de metais é uma das mais poluidoras, dada a quantidade gerada de efluentes com concentrações de metais. Podem ser encontrados íons inorgânicos, tais como cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni) e zinco (Zn) nos efluentes deste tipo de indústria. Estes metais pesados possuem alta solubilidade em ambientes aquáticos, tendo facilidade para se acumular na cadeia alimentar.

Os metais pesados existem no ambiente aquático sob diversas formas: em solução (forma iônica ou forma de complexos solúveis orgânicos ou inorgânicos), retidos às partículas coloidais minerais ou orgânicas; retidos no sedimento, ou incorporados à biota [...]. A interconversão entre essas diferentes formas é dependente, principalmente, das condições de pH, força iônica, temperatura, da presença de ligantes disponíveis, da velocidade das correntezas e da atividade biológica (AGUIAR & NOVAES, 2002).

A **Figura 1** apresenta as principais vias de transporte de metais no meio ambiente.

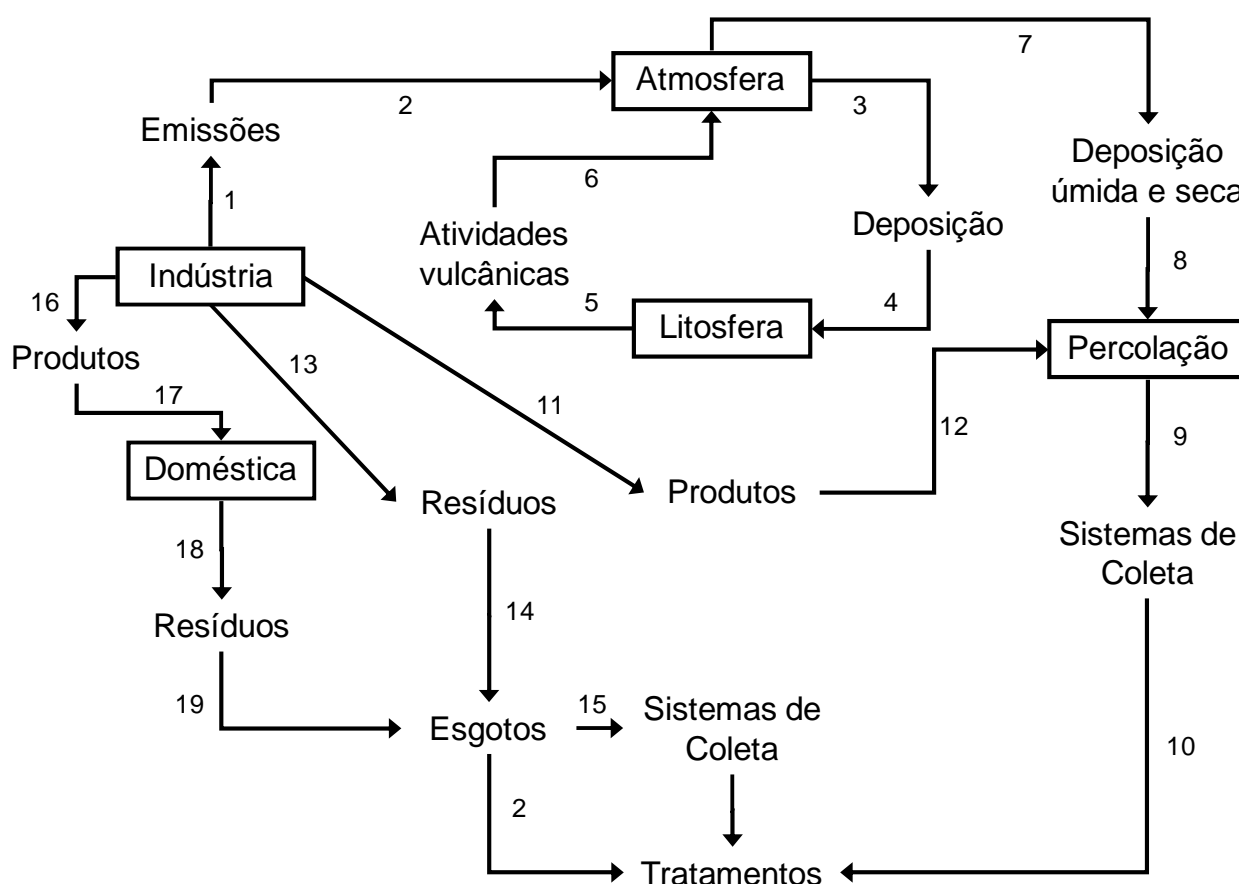


Figura 1: Vias de Transporte dos Metais no Meio Ambiente

Fonte: MULLIGAN; YONG; GIBBS, 2001

A partir das atividades industriais, fumos metálicos são emitidos (etapa 1) na atmosfera (etapa 2). Então, parte dos fumos metálicos se deposita (etapa 3) na litosfera (etapa 4); quando há alguma atividade vulcânica na região (etapa 5), estes metais depositados podem retornar para a atmosfera (etapa 6). Os fumos metálicos existentes na atmosfera também se depositam em vias úmidas e secas (etapa 8) e, através da percolação (etapa 9), vão para sistemas de coleta, a partir dos quais são encaminhados para estações de tratamento (etapa 10).

Os metais também são oriundos das atividades industriais na forma de produtos acabados (etapa 11), podendo se depositar no meio e, por percolação (etapa 12), atingir sistemas de coleta. Os resíduos das atividades industriais contendo metais (etapa 13) acabam nas redes de esgoto (etapa 14), de onde são enviados para sistemas de coleta e estações de tratamento (etapa 15).

Outro leque de produtos oriundos das atividades industriais (etapa 16) tem destinação nos domicílios (etapa 17), onde são gerados resíduos (etapa 18) que, por sua vez, são encaminhados para redes de esgoto (19) e destas redes para sistemas de tratamento (etapa 20).

Segundo Blais et al (2008), a maior parte dos elementos metálicos existentes no mundo podem ser tóxicos quando são adsorvidos em altas concentrações por organismos vivos. Apesar de alguns dos metais já estarem presentes normalmente na natureza em altas concentrações, alguns deles podem causar danos à vida animal e à vida humana.

3.3 Tratamento de Efluentes

3.3.1 Metais na Água Subterrânea

Segundo Evanko & Dzombak (1997), a água subterrânea pode ser contaminada por metais pela infiltração de percolado de resíduos sólidos dispostos no solo, vazamentos de redes de esgotos, percolação de lamas de estações de tratamento, infiltração de efluentes de indústrias de mineração, infiltração de efluentes de indústrias de galvanoplastia, entre outros.

Alguns fatores determinam as reações químicas que os metais realizam na água subterrânea: pH, potencial de oxidação-redução, presença de outros compostos dissolvidos

na água (reações de complexação), propriedades geológicas do solo (sorção e troca iônica com os metais). A ocorrência de uma ou mais reações é fator fundamental para avaliar o impacto da contaminação ambiental por metais pesados, dado que algumas formas químicas têm maior mobilidade na água subterrânea que outras (metais em complexos insolúveis possuem menor mobilidade que metais em complexos solúveis, por exemplo).

Além da forma como os metais estão dissolvidos na água subterrânea, outro fator que determina a extensão da contaminação ambiental é o transporte dos metais no subsolo. Evanko & Dzombak (1997) mostraram que as seguintes características físico-químicas do solo influenciam o transporte dos metais no subsolo:

- Presença de íons inorgânicos (carbonato, fosfato e sulfeto): esses ânions formam complexos insolúveis com os metais, causando dessorção e/ou precipitação dos metais quando existentes;
- pH do solo: os cátions metálicos são mais móveis sob condições ácidas;
- Presença de matéria orgânica: a existência de matéria orgânica com umidade causa complexação dos metais afetando sua remoção da solução;
- Distribuição do tamanho das partículas do solo: partículas finas possuem maior área superficial, fazendo com que a maior parte da contaminação se concentre nestas áreas;
- Estrutura do solo: a forma, o tamanho e o arranjo das partículas do solo afetam a propagação da contaminação.

3.3.2 Projetos de Tratamento da Água Subterrânea

De acordo com Mulligan, Yong & Gibbs (2001), o tratamento da contaminação de metais na água subterrânea é feito preferencialmente acima do solo, ou seja, são utilizados processos *ex-situ*. Em termos gerais, estas formas de tratamento envolvem na primeira etapa o bombeamento da água subterrânea e, num segundo momento, a retirada dos metais pesados desta água subterrânea através de alguma(s) rota(s) tecnológica(s).

A primeira etapa é o envio da água subterrânea a partir do subsolo para o sistema de bombeamento. A extração da água subterrânea pode ser feita com sistemas a vácuo

ou por bombas dedicadas. O sistema de bombeamento geralmente contém um tanque pulmão (ou mais de um) a partir do qual a água subterrânea é bombeada para o sistema de tratamento propriamente dito.

No sistema de tratamento os metais pesados dissolvidos são separados da água subterrânea por alguma rota tecnológica adequada. A seleção da rota tecnológica é o objetivo deste trabalho, dado que diversos critérios devem ser levados em consideração (técnicos, econômicos, ambientais, de saúde e segurança, por exemplo). A água tratada pode ser descartada / utilizada / re-injetada no solo. O lodo gerado em alguns processos deve ter destinação final adequada as suas características.

A **Figura 2** apresenta o fluxograma básico de um projeto de tratamento de água subterrânea contaminada com metais pesados.

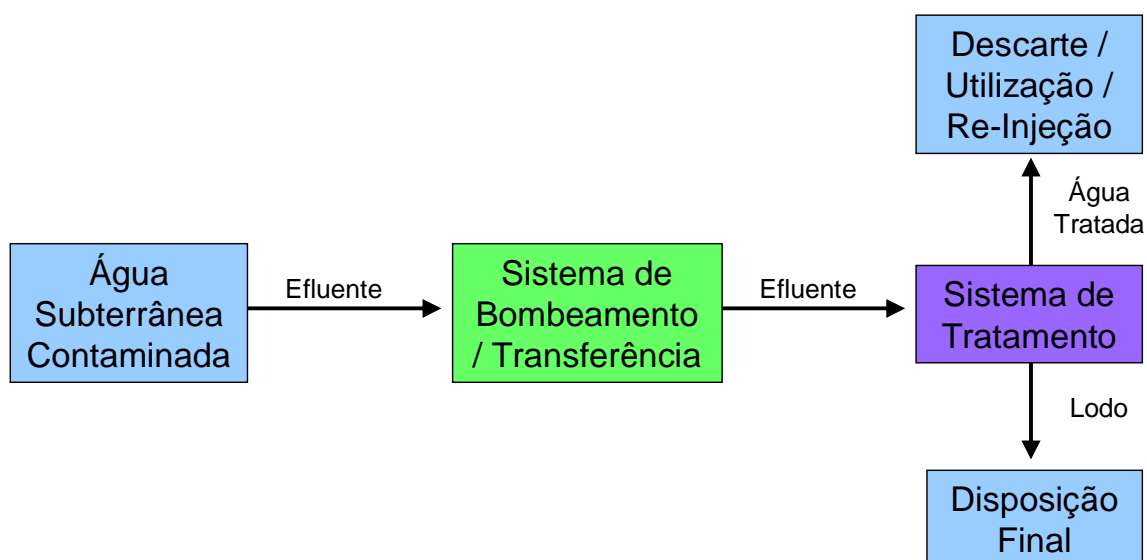


Figura 2: Fluxograma Básico – Projeto de Tratamento

Fonte: Elaborado pelo Autor.

O início de um projeto de tratamento começa com a retirada da água subterrânea contaminada do meio ambiente. Para tanto, usualmente são instalados poços de bombeamento em locais estratégicos definidos por estudos hidrogeológicos e modelos matemáticos de dispersão no subsolo. A partir destes poços a água subterrânea é retirada e enviada para o Sistema de Bombeamento. Esta retirada pode ser feita com o uso de bombas (dedicadas a cada poço) ou por meio de vácuo.

O Sistema de Bombeamento recebe a água subterrânea vinda dos poços e tem a função de encaminhá-la ao Sistema de Tratamento. Desta forma, usualmente o Sistema de Bombeamento é composto por tanques e bombas.

No Sistema de Tratamento, a água subterrânea passa pelo processo determinado em cada projeto, com a finalidade de remoção dos metais pesados dissolvidos. Como saídas do Sistema de Tratamento, geralmente tem-se a água tratada e os resíduos. A água tratada pode ser descartada em corpos receptores (cumprindo os requisitos legais para esta finalidade), ser re-injetada no subsolo (se for necessário proporcionar fluxo subterrâneo pela modelagem matemática) ou ser utilizada no local (geralmente uso industrial).

O método de seleção apresentado refere-se ao item “Sistema de Tratamento” do fluxograma acima. As demais etapas do Projeto de Tratamento não são avaliadas por este método já que se caracterizam por estudos independentes que envolvem outras áreas de conhecimento (hidrogeologia, geologia).

3.3.3 Dificuldades na Escolha de uma Rota Tecnológica

Existem diversas rotas tecnológicas já consagradas para a remoção de metais pesados em efluentes. Alguns sistemas de tratamento empregam apenas uma rota tecnológica, enquanto outros requerem duas ou mais rotas para se atingir os objetivos propostos.

Cada rota tecnológica possui particularidades. Parâmetros como concentração de metais pesados na entrada do sistema, vazão, limites permitidos para a concentração de metais na saída e interesse na recuperação de metais limitam o rendimento e extensão possível da separação.

Há vários estudos experimentais e análises teóricas sobre os princípios de funcionamento de cada rota tecnológica. Existem ainda alguns estudos sobre a comparação entre algumas rotas tecnológicas em relação a critérios específicos.

Blais et al (2008) apresentaram uma tabela com as rotas tecnológicas possíveis de serem utilizadas nos processos de tratamento de água subterrânea contaminada por metais pesados. Nesta tabela são brevemente apresentados exemplos, bem como

bibliografia de referência para cada rota. Critérios para definir qual rota tecnológica utilizar não são, porém, descritos. O **Anexo 2** apresenta a referida tabela de Blais et al (2008).

Kurniawan et al (2006) descreveram com parâmetros técnicos as diferentes rotas tecnológicas aplicáveis para o tratamento de água subterrânea contaminada por metais pesados. Eficiência, pH ótimo de operação e consumo de energia são comparados entre as diferentes rotas tecnológicas. Apesar da grande quantidade de informações técnicas sobre cada rota tecnológica individualmente, não são igualmente apresentados critérios de seleção para a rota tecnológica ótima em determinado processo.

Lazaridis et al (2004) apresentaram uma boa base de comparação entre diferentes opções da rota tecnológica flotação iônica; porém, não abordam as demais rotas tecnológicas disponíveis para o tratamento de água subterrânea contaminada por metais pesados.

Evanko & Dzombak (1997) prepararam um relatório técnico abrangente sobre o problema da contaminação ambiental por metais pesados. As rotas tecnológicas para tratamento de solo contaminado também foram apresentadas e avaliadas, técnica e economicamente. Porém, os autores não estudaram o tratamento de água subterrânea contaminada por metais.

Pereira Neto et al (2008) apresentaram estudo comparativo em termos de eficiência de processo entre algumas rotas tecnológicas para o tratamento de água subterrânea contaminada por metais pesados. Porém, maiores critérios comparativos e mais opções de rotas tecnológicas não foram abordados.

Desta forma, no início da elaboração de um projeto de sistema de tratamento de água contaminada com metais pesados, sobram informações individuais e faltam análises comparativas das rotas tecnológicas existentes.

3.3.4 Importância da Escolha da Melhor Rota Tecnológica

Os projetos para remoção de metais pesados da água subterrânea geralmente possuem horizonte de tempo de operação elevado, podendo durar mais de 10 anos. Sistemas de tratamento mal projetados podem culminar com a necessidade de adaptações ao longo da operação, quando não na substituição total da rota tecnológica

envolvida. Nestas situações, os custos sobem consideravelmente e há impactos ambientais imprevistos.

O raciocínio linear de que a melhor rota tecnológica é aquela que traz resultados no menor tempo de operação do sistema nem sempre se confirma. Desta forma, torna-se fundamental uma boa escolha das rotas tecnológicas a serem utilizadas no sistema de tratamento, de acordo com alguns critérios:

1. Levantamento das informações técnicas específicas sobre cada rota tecnológica, incluindo vantagens, desvantagens, limitações, parâmetros de processo e exemplos de casos reais;
2. Uma avaliação econômica deve ser feita com rigor, já que os custos de instalação devem ser analisados conjuntamente com os custos de operação do sistema. O tempo de operação de cada sistema é também uma variável de entrada na avaliação econômica.
3. Além disso, critérios ambientais e de saúde e segurança, muitas vezes ignorados na etapa conceitual do projeto, tornam-se críticos em certas situações. Limitações com relação ao uso de energia elétrica, disposição de resíduos, utilização de insumos com moderada toxicidade, riscos ergonômicos e ruído, por exemplo, são parâmetros importantes a serem analisados comparativamente entre as opções de rotas tecnológicas.

Portanto, a melhor rota tecnológica para cada processo deve ser escolhida após a realização de uma avaliação ampla, que precisa considerar critérios de fundo técnico, econômico, ambiental, de saúde e de segurança.

4 METODOLOGIA DE TRABALHO

Como existem diversas rotas tecnológicas já bem exploradas e em utilização em vários locais, gera-se a necessidade de se encontrar métodos para auxílio na seleção da melhor opção a ser adotada em cada situação.

A seguir é proposto um método para a escolha da melhor rota tecnológica para determinado projeto de tratamento de efluente contaminado por metais pesados. O método é baseado em análises técnica, econômica, ambiental, de saúde e de segurança. A seqüência de ações indicada na **Figura 3** apresenta o fluxograma do método de seleção proposto.

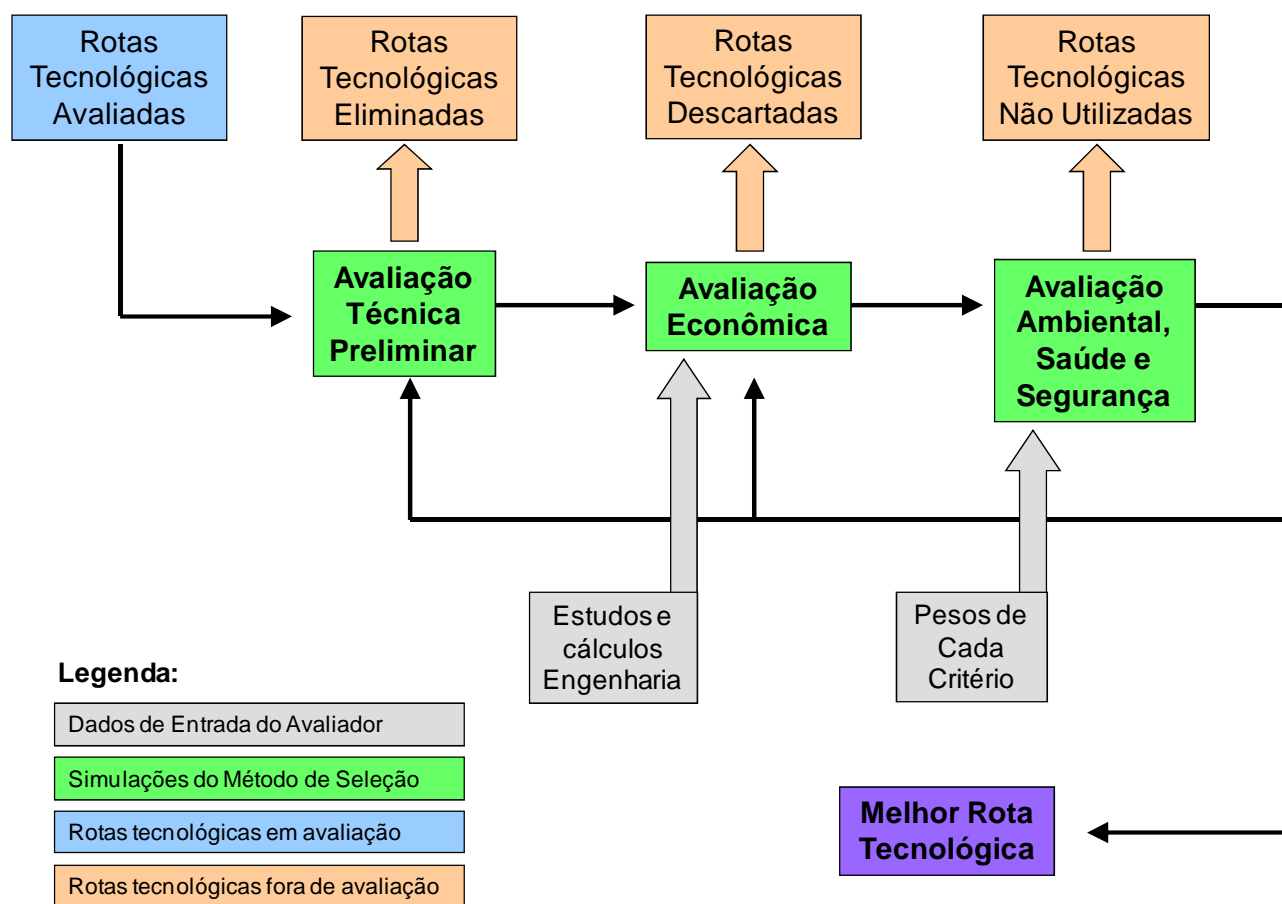


Figura 3: Fluxograma do Método de Seleção Proposto

Fonte: Elaborado pelo Autor.

4.1 Avaliação Técnica Preliminar

A primeira etapa do Método de Seleção é denominada “Avaliação Técnica Preliminar” que consiste na análise das especificidades técnicas de cada rota tecnológica a ser avaliada. São levantadas informações a respeito do funcionamento do processo, condições de contorno e demais detalhes técnicos.

Os critérios examinados dentro da Avaliação Técnica Preliminar são:

- Caracterização da tecnologia: principais aspectos técnicos que definem a rota tecnológica em questão;
- Utilização de insumos e geração de resíduos: quais são os insumos necessários para a realização do processo e quais são os principais resíduos gerados;
- Parâmetros de influência: quais são os principais parâmetros que regem cada rota tecnológica;
- Limitações: existem limitações para o uso da rota tecnológica (vazão, concentração, contaminantes, tempo de operação);

Além disso, as vantagens e desvantagens de cada rota tecnológica devem ser levantadas, a título de comparação entre elas.

No presente trabalho, cinco rotas tecnológicas foram escolhidas em função de serem as mais utilizadas atualmente em processos de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. Nada impede que outras rotas tecnológicas sejam avaliadas pelo método de seleção proposto.

O objetivo desta primeira etapa do Método de Seleção é confrontar as rotas tecnológicas com as condições do processo em análise (vazão, concentração e tipos de metais presentes no efluente). A partir desta avaliação, algumas rotas tecnológicas podem não ser *possíveis*, em virtude de suas limitações técnicas intrínsecas, tais como impossibilidade de remoção de determinado metal, restrição quanto à presença de certos íons. Estas rotas tecnológicas devem ser eliminadas nesta etapa do Método de Seleção, dado que podem não resultar em eficiência de tratamento. Portanto, a primeira etapa do

Método de Seleção define quais são as rotas tecnológicas possíveis de serem aplicadas para determinada situação.

No **Capítulo 5** apresenta-se a Avaliação Técnica Preliminar das cinco rotas tecnológicas avaliadas neste trabalho.

4.2 Avaliação Econômica

A segunda etapa do Método de Seleção consiste na “Avaliação Econômica”, a qual é baseada na estimativa dos custos totais de cada rota tecnológica. Um sistema de tratamento de efluente contaminado por metais pesados não visa proporcionar ganhos financeiros, pois não se caracteriza pela produção de determinado produto. Desta forma, a Avaliação Econômica é focada no levantamento dos custos totais de cada sistema.

Os custos envolvidos neste tipo de projeto podem ser divididos de maneira geral nos custos para a montagem e implantação do sistema (custos de instalação) e nos custos necessários para manter o sistema funcionando até que os objetivos do processo sejam atingidos (custos de operação).

Os custos para a realização da desmontagem / desativação do sistema não foram abordados neste estudo, em função da falta de parâmetros e de informações para estimá-los. Em algumas situações os equipamentos de um sistema desativado são realocados para um novo sistema, o que torna difícil determinar o custo para o fim do ciclo de vida de destes equipamentos.

Os custos de instalação englobam o projeto de engenharia, os materiais que compõem o sistema, a mão-de-obra para construir e os recursos necessários para comissionar e realizar o *start-up* do sistema. Já os custos de operação englobam os gastos com insumos, destinação dos resíduos, mão-de-obra operacional, análises químicas, supervisão, monitoramento, depreciação, impostos, entre outros. Juntos, os custos de instalação e de operação fornecem uma perspectiva precisa e completa dos custos totais de um sistema de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados.

Para se conseguir estimar os preços de alguns itens que compõem cada sistema, é necessário realizar alguns trabalhos de engenharia, tais como:

- Determinação do fluxograma do processo;

- Balanços de massa;
- Balanços de energia;
- Dimensionamento dos principais equipamentos;
- Levantamento de custos de insumos;
- Levantamento de custos de utilidades.

Outro critério importante para a Avaliação Econômica é o tempo total de operação do sistema, dado que os custos de operação geralmente são obtidos numa base anual. Quanto maior for a duração prevista para um sistema, maiores serão seus custos operacionais. Desta forma, antever o tempo total de duração do projeto é fundamental na etapa de Avaliação Econômica.

O produto final desta segunda etapa do Método de Seleção é o custo total de cada rota tecnológica avaliada. O objetivo desta etapa é proporcionar ao avaliador (tomador de decisão) uma estimativa dos custos totais para cada rota tecnológica de forma que ele possa definir se este custo está dentro da verba disponível para determinado projeto. Caso isso não ocorra, a rota tecnológica deverá ser eliminada nesta etapa do Método de Seleção.

No **Capítulo 6** apresentam-se os detalhes da etapa de Avaliação Econômica.

4.3 Avaliação Ambiental, de Saúde e de Segurança

A terceira etapa do método de seleção é a “Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança” das rotas tecnológicas, a qual é baseada na análise do ciclo de vida de processos industriais, tendo como objetivo a avaliação dos critérios ambientais, de saúde e de segurança nas diversas etapas que caracterizam este ciclo de vida.

As fronteiras de análise do ciclo de vida se limitaram até o nível de atuação direto do aplicador da tecnologia (responsável pelo projeto), ou seja, até o primeiro nível de influência.

Os critérios ambientais determinados para esta avaliação são: uso de materiais, uso de energia, geração de resíduos sólidos, efluentes líquidos e emissões gasosas. Já

os critérios de saúde e segurança são: riscos físicos, químicos, elétricos, ergonômicos e de ruído. Todos estes critérios foram definidos para abordar os principais aspectos relevantes em sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados.

Para cada critério é determinado um conceito e a soma destes gera uma nota percentual. Ao final do processo são geradas duas notas, uma para a avaliação ambiental e outra para a avaliação de saúde e segurança. A média destas notas gera o conceito final desta terceira etapa do Método de Seleção.

Avaliações do ciclo de vida são métodos quantitativos e, por isso, é necessário a atribuição de conceitos para a avaliação de cada critério. Desta forma, foi criado um roteiro técnico para utilização nesta etapa do processo. Seguindo-se os passos do roteiro, a atribuição dos conceitos torna-se objetiva e quantitativa.

O produto final desta terceira etapa do Método de Seleção é um valor em porcentagem para cada rota tecnológica nos aspectos avaliados. Caso alguma rota tecnológica não atinja um conceito pré-definido pelo avaliador (tomador de decisão) em determinado aspecto, ela poderá ser eliminada. Por fim, a Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança fornece um comparativo numérico (percentual) entre as diferentes rotas tecnológicas para os aspectos avaliados.

O **Capítulo 7** apresenta em detalhes a terceira etapa do Método de Seleção, a Avaliação Ambiental, de Saúde e de Segurança.

4.4 Aplicação do Método de Seleção

Para avaliar o Método de Seleção de rotas tecnológicas, foram feitas simulações de quatro cenários hipotéticos de efluente contaminado por metais pesados. Estes quatro cenários foram definidos variando-se a concentração de metais no efluente (dois cenários com alta concentração e dois cenários com baixa concentração) e a vazão do efluente (dois cenários com alta vazão e dois cenários com baixa vazão). Os valores limites (baixos e altos) de vazão e concentração foram definidos com base em dados coletados nas bibliografias estudadas.

Vazão e concentração de metais no efluente são dois dos principais parâmetros que afetam o desempenho e a escolha de uma rota tecnológica no tratamento de

efluentes contaminados por metais pesados, tendo, desta forma, impacto direto na escolha de qual rota utilizar.

A partir do resultado das simulações para estes quatro cenários, são formuladas conclusões sobre a aplicabilidade e funcionalidade do método de seleção. O **Capítulo 8** apresenta em detalhes as simulações feitas para testar o Método de Seleção.

O Método de Seleção proposto baseia-se, portanto, em três etapas: avaliação técnica preliminar, avaliação econômica e avaliação ambiental, de saúde e de segurança. Acredita-se que ao se aplicar este Método de Seleção o avaliador (tomador de decisão) terá subsídios suficientes para escolher determinada rota tecnológica para o sistema de tratamento em questão.

5 AVALIAÇÃO TÉCNICA PRELIMINAR

A seguir é aplicada a Avaliação Técnica Preliminar para as cinco rotas tecnológicas mais empregadas para tratamento de efluentes contaminados por metais pesados, tendo-se em mente os limites de processo estabelecidos pelos cenários hipotéticos avaliados, quais sejam:

- Vazão do efluente de entrada: de 1.000 a 5.000 L/h;
- Concentração de metais no efluente: de 10 a 100 mg/L;
- Metais presentes no efluente: Ni²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, Cr³⁺.

O método de seleção proposto e todas as suas etapas aplicam-se às condições de contorno estabelecidas acima. Isto não exclui a aplicabilidade do referido método para situações fora deste contorno.

5.1 Adsorção por Zeólitas

5.1.1 Definição / Caracterização

A adsorção de metais pesados por colunas contendo leitos de zeólita é um dos métodos mais usados para tratamento de efluentes (KURNIAWAN *et al*, 2006). Este método é baseado na adsorção dos metais dissolvidos no efluente por compostos denominados zeólitas, os quais são instalados geralmente em colunas de leito fixo, através das quais passa o efluente a ser tratado.

Zeólitas são compostos tipo aluminossilicatos cristalinos, com fórmula molecular padrão $M^{n+}_{x/n} [(AlO_2)_x (SiO_2)_y] \cdot z H_2O$, sendo que M é um elemento metálico (AGUIAR; NOVAES, 2002). Elas são formadas por tetraedros de SiO₄ e AlO₄, ligados por átomos de oxigênio (IGLESIAS; CASAGRANDE; ALLEONI, 2007). Devido as suas propriedades químicas e cristalográficas, as zeólitas realizam troca iônica com os metais dissolvidos na água.

O processo de remoção de metais pesados através da adsorção na zeólita é modelado numa reação com cinética de primeira ordem (JIMENEZ; BOSCO; CARVALHO, 2004): $[M] = [M_0] \cdot e^{-k \cdot t}$. M é um elemento metálico, t é tempo (horas) e k é a constante cinética.

De acordo com Aguiar & Novaes (2002), o processo de adsorção em zeólitas pode ser descontínuo ou contínuo. No primeiro caso, a operação é feita em um reator agitado, a taxa de remoção de metais tem proporção exponencial ao tempo de contato, o qual é determinado empiricamente para cada situação. No processo contínuo, a zeólita é instalada numa coluna pela qual a água com metais pesados flui. Em qualquer caso, a extensão de troca iônica é limitada pelo coeficiente de distribuição do metal entre a zeólita e o meio. Ainda de acordo com os mesmos autores, o processo contínuo requer menor espaço físico que o descontínuo e se mostra mais eficiente.

Kurniawan et al (2006) também enfatizaram o desempenho dos processos contínuos, observando nesta opção o melhor contato entre o efluente e a zona de adsorção.

No processo de dessorção das zeólitas, o sistema se comporta de acordo com o modelo da isoterma de Freundlich (BOSCO; JIMENEZ; CARVALHO, 2004), sendo que o sódio (Na^+) é preferível ao cálcio (Ca^{2+}). Os compostos usados na dessorção de zeólitas com metais adsorvidos são geralmente KCl (KATSOU et al, 2011) e NaCl (VACLAVIK, 2010).

De acordo com Katsou et al (2011), o processo de dessorção das zeólitas é função do tipo e da concentração do agente de dessorção e do tipo e concentração de metais no efluente. Segundo os mesmos autores, a eficiência da regeneração das zeólitas (após o processo de dessorção) é inversamente proporcional ao número de ciclos de regeneração, ou seja, quanto mais ciclos, menor a eficiência de adsorção das zeólitas.

5.1.2 Fluxograma Detalhado

O Fluxograma Conceitual do processo de remediação de efluente contaminado por metais pesados utilizando a rota tecnológica adsorção por zeólitas é apresentado na **Figura 4**.

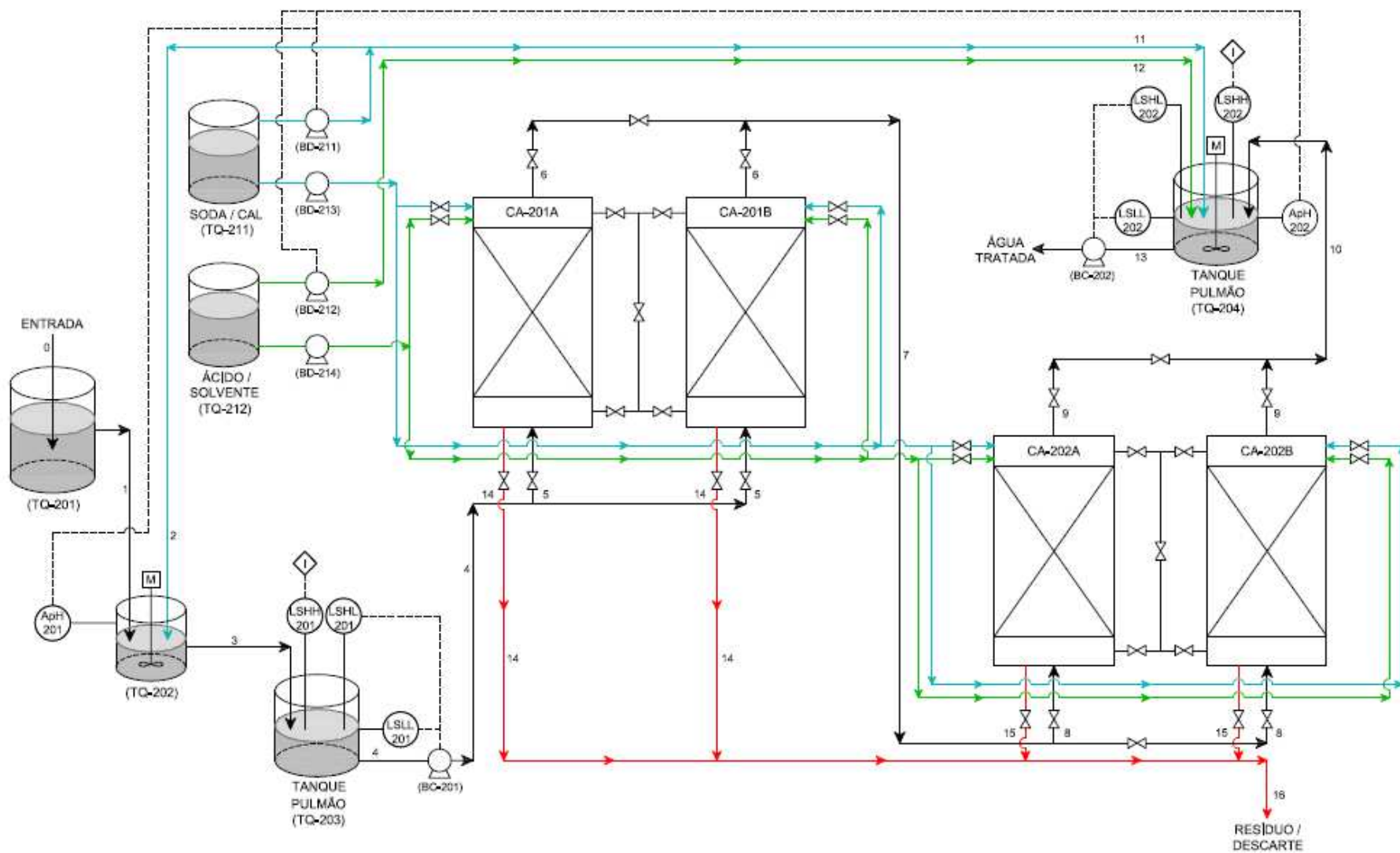


Figura 4: Fluxograma do Processo – Adsorção por Zeólitas

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste fluxograma, o efluente entra no tanque TQ-201, indo por gravidade para o tanque TQ-202, onde é adicionada solução básica (vinda do TQ-211). A injeção de solução básica é controlada pelo sensor mais controlador de pH (ApH-201). Na seqüência, o efluente segue por gravidade para o tanque TQ-203, de onde é bombeado para as colunas de zeólitas. A transferência é feita pela bomba centrífuga BC-201, a qual é comanda pela chave de nível LSHL-201. O efluente passa pelas duas primeiras colunas de zeólita em série ou paralelo (CA-201A e CA-201B); na seqüência, passa por mais duas colunas de zeólita em série ou paralelo (CA-202A e CA-202B). Após estas colunas, o efluente segue para o tanque TQ-204, onde ocorre a correção do pH, por meio da adição de solução ácida (vinda do TQ-212) ou básica (vinda do TQ-211). O efluente é transferido para fora da estação pela bomba centrífuga BC-202, a qual é comandada pela chave de nível LSHL-202.

As chaves de nível LSHH-201 e LSHH-202 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle, evitando o extravasamento dos tanques TQ-203 e TQ-204, respectivamente.

As chaves de nível LSLL-201 e LSLL-202 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle para desligar as bombas BC-201 e BC-202, respectivamente, evitando que as mesmas operem a seco (risco de danos).

As bombas dosadoras BD-211 e BD-212 têm a função de enviar soda/cal ou ácido/solvente respectivamente ao processo. As bombas dosadoras BD-213 e BD-214 têm a função de enviar soda/cal ou ácido/solvente às colunas de zeólitas para a retro-lavagem das mesmas.

Desta forma, os principais equipamentos e instrumentos utilizados nesta rota tecnológica são os seguintes:

- Colunas de Adsorção (CA-201A/B e CA-202A/B): a quantidade de colunas varia em função da vazão de projeto e da concentração de metais no efluente;
- Tanque de Insumo (TQ-211): tanque de álcali, utilizado no controle de pH;
- Tanque de Insumo (TQ-212): tanque de ácido, utilizado no controle de pH e na etapa de dessorção;

- Tanque de Insumo (TQ-213): tanque de cloreto de potássio, utilizado na etapa de dessorção;
- Tanque de Processo (TQ-201): tanque de equalização inicial que recebe o efluente a ser tratado;
- Tanque de Processo (TQ-202): tanque de elevação do pH antes da passagem pelas colunas de zeólita;
- Tanque de Processo (TQ-203): tanque pulmão do efluente antes das colunas de zeólita;
- Tanque de Processo (TQ-204): tanque que recebe a água tratada e onde é feita a correção final do pH (se necessário);
- Bombas de Insumo (BD-211 a BD-214): bombas de envio de álcali, ácido e cloreto de potássio para o processo;
- Bombas Centrífugas (BC-201 e BC-202): realizam a transferência da água através do processo;
- Chaves de Nível (conjuntos LS-201 e LS-202): atuam ligando e desligando as bombas centrífugas e geram alarmes do processo (níveis alto e baixo);
- Controladores de pH (ApH-201 e ApH-202): em conjunto com eletrodos de pH atuam ligando ou desligando as bombas dosadoras de álcali e ácido;
- Válvulas Diversas: tipo esfera (bloqueio de tubulações), tipo retenção (saída de bombas), tipo globo (controle manual da vazão);
- Tubulações: trechos em aço carbono e em PVC.

5.1.3 Utilização de Insumos e Geração de Resíduos

Para o funcionamento da rota tecnológica adsorção por zeólitas, os seguintes insumos são utilizados:

- Álcali: é utilizado em dois momentos no processo. Primeiramente é dosado no tanque TQ-202 para aumentar o pH do efluente antes da passagem pelas colunas de zeólitas. Ao fim de certo tempo de operação, o álcali também é utilizado para realizar o processo de dessorção nas zeólitas. Os álcalis mais

empregados neste tipo de processo são cal hidratada (Ca(OH)_2) e/ou soda cáustica (NaOH).

- Ácido: é usado para reduzir o pH da água tratada (após a passagem pelas colunas de zeólitas) antes do descarte, sendo, portanto, dosado no tanque TQ-204. Além disso, o ácido também é usado para realizar o processo de dessorção nas zeólitas. O ácido mais empregado neste tipo de processo é o ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- Zeólitas: os aluminossilicatos devem ser repostos quando estiverem saturados e não for mais possível realizar o processo de dessorção. Desta forma, deve-se prever um estoque de zeólitas para a continuidade da operação do sistema de tratamento.
- Agente de Dessorção: é utilizado para realizar o processo de dessorção/regeneração das zeólitas, a fim de aumentar sua vida útil e diminuir a quantidade de resíduos sólidos gerados (zeólitas com metais adsorvidos).

A geração de resíduos da rota tecnológica adsorção por zeólitas é a seguinte:

- Efluente contendo metais pesados. Durante o processo de dessorção das colunas de zeólita, os metais pesados são retirados pela passagem de soluções ácidas e/ou básicas. Desta forma, gera-se um efluente que pode ser descartado (tendo destinação adequada), ou processado para recuperação dos metais. Neste último caso, processos de evaporação são geralmente empregados.
- Resíduo sólido contendo metais pesados e zeólitas.
- Efluente líquido contendo solução do agente de dessorção e metais pesados dissolvidos.

5.1.4 Limitações e Parâmetros de Influência

Segundo Aguiar & Novaes (2002), a capacidade de adsorção da zeólita é função do volume e do diâmetro dos seus poros, bem como da natureza e da localização dos sítios ativos.

Segundo os mesmos autores, os parâmetros necessários para a eficiência da adsorção de metais em zeólitas são:

- Natureza e características do aluminossilicato;
- Concentração e natureza do metal (valência e hidratação);
- Presença de aditivos (eletrólitos e ligantes);
- pH.

Jimenez, Bosco & Carvalho (2004) mostraram que a elevação do pH aumenta a eficiência da retenção de metais pelas zeólitas, dado que os íons H^+ competem com os metais pela adsorção nas zeólitas. Porém, em altos valores de pH (elevadas concentrações de OH^-), a adsorção pode ser dificultada.

A utilização de zeólita requer um pré-tratamento na mesma. Este processo altera a densidade e a capacidade de troca iônica (AGUIAR; NOVAES, 2002). O processo de pré-tratamento requer a escolha de um cátion, sendo sódio (Na^+) o preferível.

A passagem do efluente pelas colunas geralmente é feita sob pH ácido, para não se atingir os limites de solubilidade dos metais. Entretanto, é recomendável não operar os aluminossilicatos em pH extremamente ácidos (menores que 2) (AGUIAR; NOVAES, 2002), dada a ocorrência da protonação da camada octaédrica pela conseqüente hidrólise da estrutura de alumínio, gerando perda da capacidade de troca iônica.

Segundo Bosco, Jimenez & Carvalho (2004), as zeólitas apresentam alta seletividade de troca, boa resistência física e química, e boa compatibilidade com o meio ambiente. Eles concluíram que os resultados da adsorção em zeólitas para efluentes com baixa concentração de metais (menor que 20 mg/L) são próximos a 100% de remoção; porém, para maiores concentrações, a eficiência diminui. Os autores mostraram que a temperatura favorece a remoção de moléculas de água para que os íons metálicos possam ser adsorvidos nas zeólitas. Desta forma, o aumento da temperatura do sistema aumenta a retenção de metais pelas zeólitas (faixa ideal de 20°C até no máximo 90°C).

Kurniawan et al (2006) apresentaram que o efluente pode estar na faixa de pH de 2 a 6 para processos de troca iônica, incluindo adsorção por zeólitas. Esta faixa de pH foi obtida a partir de testes de bancada com diversas resinas existentes no mercado (*Amberlite, Zeolite, Clinoptilolite, Amberjet*).

5.1.5 Vantagens / Desvantagens

Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), podem ser definidas as seguintes desvantagens da utilização de zeólitas:

- As zeólitas podem ser vulneráveis à oxidação por produtos químicos;
- As zeólitas são afetadas pela presença de íons de cálcio e magnésio; e
- As zeólitas são possíveis de colapsar na presença de orgânicos e precipitados.

De acordo com Kurniawan *et al* (2006) as principais desvantagens da utilização de zeólitas são:

- Necessidade de sistemas de pré-tratamento do efluente, para evitar a presença de sólidos em suspensão nas colunas de adsorção.

Kurniawan *et al* (2006) também estabeleceram as principais vantagens desta rota tecnológica:

- Não geração de resíduos para disposição final;
- Há maior facilidade para realização de ensaios de bancada que adiantam os resultados a serem alcançados nos projetos de larga escala;
- Possibilita a recuperação de metais valiosos no efluente; e
- Pode ocorrer a remoção total dos metais presentes no efluente, dependendo das condições do processo.

5.1.6 Exemplos de Utilização

Huang e Hao (1989) observaram que o pH ideal para a remoção de Pb^{2+} , Ni^{2+} , Cd^{2+} e Zn^{2+} está entre 4 e 7, apresentando taxas de remoção de 85, 83, 60 e 35% respectivamente. Em pH alcalino, as taxas de remoção dos metais aumentaram, mostrando correspondência com a região onde ocorre a adsorção química.

Bosco, Jimenez & Carvalho (2004) estudaram a remoção de metais pesados de efluentes industriais utilizando a zeólita natural *escolécita* ($Na_{0,3}Ca_{1,0}Al_{2,0}Si_{3,0}O_{10,0} \cdot 3H_2O$) e os metais Mn^{2+} , Cd^{2+} , Ni^{2+} e Cr^{3+} . A capacidade de troca iônica da zeólita *escolécita* foi de $5,01 \text{ kg}^{-1}$ equivalentes. Os mesmos autores concluíram que o cromo trivalente (Cr^{3+}) teve

rendimento de adsorção bem superior aos demais metais utilizados nos ensaios (Cd^{2+} , Ni^{2+} , Mn^{2+}). Esta situação é em virtude da preferência da zeólita *escolécita* pelo cromo trivalente devido a maior força iônica do mesmo se comparado aos outros metais do ensaio.

De acordo com estudos de Higarashi, Kunz & Mattei (2008), após a regeneração, a capacidade de adsorção das zeólitas fica em torno de 90% da original. Nestes estudos foram usadas zeólitas naturais, solução de NaCl (cloreto de sódio) como agente de dessorção e efluente de suinícolas.

Katsou et al (2011) apresentaram dados teóricos da capacidade máxima de adsorção de metais pesados nas zeólitas naturais: 247 mg/g para o metal Pb^+ , 96 mg/g para o metal Zn^{2+} e 130 mg/g para o metal Cd^{2+} .

Durante os ensaios de regeneração das zeólitas naturais, Katsou et al (2011) chegaram à conclusão de que o melhor produto para dessorção de zeólitas com zinco (Zn^{2+}) é uma solução de KCl (cloreto de potássio) a 1,0 molar. Segundo estes autores, a eficiência de regeneração das zeólitas ficou em 50% após 4 ciclos de dessorção com KCl 1,0 M.

5.1.7 Valores Adotados neste Trabalho

De acordo com a Análise Técnica Preliminar da rota tecnológica Adsorção por Zeólitas, adotou-se os seguintes valores para as demais etapas do Método de Seleção:

- Taxa adsorção teórica da zeólita natural para adsorção metais: 12 mg metal / g zeólita (KURNIAWAN et al, 2006 e KATSOU et al, 2011);
- Regeneração da zeólita: considerados 4 ciclos de dessorção com solução KCl 1,0 M (KATSOU et al, 2011);
- Correção no pH do efluente de entrada: levar até pH 7;
- Solução de álcali: solução saturada de cal (1,65 g cal / L água);
- Solução de ácido: solução ácido sulfúrico 1,0 mol/L.

A eficiência na remoção dos metais pesados no efluente foi definida como **99,9%** para as demais etapas do Método de Seleção.

5.2 Adsorção por Biossorventes

5.2.1 Definição / Caracterização

A rota tecnológica de remoção de metais pesados através de biossorventes é baseada na utilização de microorganismos (vivos ou mortos) para a adsorção com os íons complexos dos metais, utilizando grupos funcionais existentes na parede celular (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

De acordo com Miller (1995), os mecanismos da biossorção de metais são:

- Ligação / união do metal à superfície celular;
- Entrada do metal na célula;
- Volatilização do metal, como resultado da reação de biotransformação;
- Formação de precipitados metálicos pela reação com polímeros extracelulares.

O processo de adsorção por biossorventes não requer um mecanismo ativo de transporte por membrana, bem como energia metabólica, dado que é controlado por uma reação físico-química não-direta (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998). Por isso existe a possibilidade de utilização de microorganismos mortos como biossorventes.

De acordo com Athinkson, Bux & Kasan (1998), os principais microorganismos utilizados nesta rota tecnológica são: bactérias, fungos filamentosos e algas marinhas. Existem estudos para a utilização de populações heterogêneas de micróbios (vindos de lodos ativados).

Segundo Miller (1995), os biossorventes podem ser de diversos gêneros químicos, porém sempre aniônico ou catiônico. No caso de remoção de metais, são usados biossorventes catiônicos.

A cinética do processo de adsorção de metais por biossorventes é bem rápida, ocorrendo em minutos, ou mesmo segundos. Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), o processo acontece em duas etapas: um primeiro, e rápido, estágio independente do metabolismo da biomassa, e um segundo, e mais lento, estágio de equilíbrio químico. O

parâmetro que mais influencia a cinética da reação é a concentração inicial de metal no efluente.

O agente motivador da bioadsorção metálica é a carga negativa na superfície da biomassa (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998). O aumento da eletronegatividade da biomassa aumenta a atração e a conseqüente adsorção dos metais. A presença de proteínas, carboidratos, ácidos nucleicos e lipídios aumentam a eletronegatividade da biomassa.

Os bioadsorventes reduzem a tensão superficial na água pelo seu acúmulo na interface da mesma, facilitando a formação de emulsões líquidas de diferentes polaridades (MILLER, 1995). A quantidade de surfactante (bioadsorvente) necessária para tanto é definida como CMC (concentração micelar crítica). No caso de biosurfactantes, a CMC varia de 1 a 200 mg/L.

5.2.2 Fluxograma Detalhado

O Fluxograma Conceitual do processo de remediação de efluente contaminado por metais pesados utilizando a rota tecnológica adsorção por bioadsorventes é apresentado na **Figura 5**.

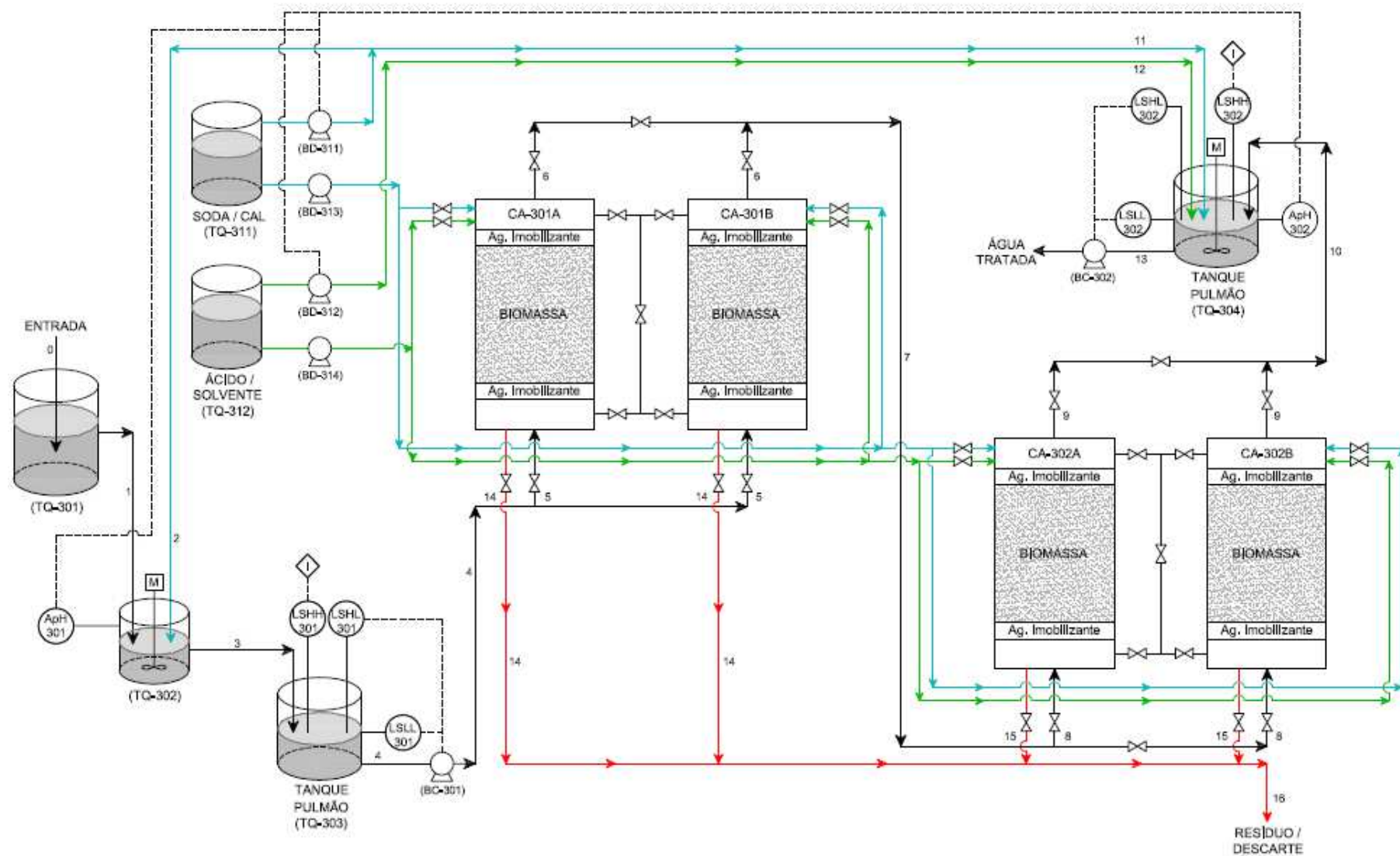


Figura 5: Fluxograma do Processo – Adsorção por Biossorventes

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste fluxograma, o efluente entra no tanque TQ-301, indo por gravidade para o tanque TQ-302, onde é adicionada solução básica (vinda do TQ-311). A injeção de solução básica é controlada pelo sensor mais controlador de pH (ApH-301). Na seqüência, o efluente segue por gravidade para o tanque TQ-303, de onde é bombeado para as colunas com bioissorvente. A transferência é feita pela bomba centrífuga BC-301, a qual é comanda pela chave de nível LSHL-301. O efluente passa pelas duas primeiras colunas com bioissorvente em série ou paralelo (CA-301A e CA-301B); na seqüência, passa por mais duas colunas com bioissorvente em série ou paralelo (CA-302A e CA-302B). Após estas colunas, o efluente segue para o tanque TQ-304, onde ocorre a correção do pH por meio da adição de solução ácida (vinda do TQ-312) ou básica (vinda do TQ-311). O efluente é transferido para fora da estação pela bomba centrífuga BC-302, a qual é comandada pela chave de nível LSHL-302.

As chaves de nível LSHH-301 e LSHH-302 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle, evitando o extravasamento dos tanques TQ-303 e TQ-304 respectivamente.

As chaves de nível LSLL-301 e LSLL-302 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle para desligar as bombas BC-301 e BC-302, respectivamente, evitando que as mesmas operem a seco (chance de danos).

As bombas dosadoras BD-311 e BD-312 têm a função de enviar soda/cal ou ácido/solvente respectivamente ao processo. As bombas dosadoras BD-313 e BD-314 têm a função de enviar soda/cal ou ácido/solvente às colunas com bioissorvente para a retro-lavagem das mesmas.

Desta forma, os principais equipamentos e instrumentos utilizados nesta rota tecnológica são os seguintes:

- Colunas de Adsorção (CA-301A/B e CA-302A/B): a quantidade de colunas varia em função da vazão de projeto e da concentração de metais no efluente;
- Tanque de Insumo (TQ-311): tanque de álcali, utilizado no controle de pH e na etapa de dessorção;

- Tanque de Insumo (TQ-312): tanque de ácido, utilizado no controle de pH e na etapa de dessorção;
- Tanque de Processo (TQ-301): tanque de equalização inicial que recebe o efluente a ser tratado;
- Tanque de Processo (TQ-302): tanque de elevação do pH antes da passagem pelas colunas de biomassa;
- Tanque de Processo (TQ-303): tanque pulmão do efluente antes das colunas de biomassa;
- Tanque de Processo (TQ-304): tanque que recebe a água tratada e onde é feita a correção final do pH (se necessário);
- Bombas de Insumo (BD-311 a BD-314): bombas de envio de álcali e ácido para o processo;
- Bombas Centrífugas (BC-301 e BC-302): realizam a transferência da água através do processo;
- Chaves de Nível (conjuntos LS-301 e LS-302): atuam ligando e desligando as bombas centrífugas e geram alarmes do processo (níveis alto e baixo);
- Controladores de pH (ApH-301 e ApH-302): em conjunto com eletrodos de pH atuam ligando ou desligando as bombas dosadoras de álcali e ácido;
- Válvulas Diversas: tipo esfera (bloqueio de tubulações), tipo retenção (saída de bombas), tipo globo (controle manual da vazão);
- Tubulações: trechos em aço carbono e em PVC.

5.2.3 Utilização de Insumos e Geração de Resíduos

Para o funcionamento da rota tecnológica adsorção por biossorventes, os seguintes insumos são utilizados:

- Álcali: é usado em dois momentos no processo. Primeiramente é dosado no tanque TQ-302 para aumentar o pH do efluente antes da passagem pelas colunas de biomassa. Ao fim de certo tempo de operação, o álcali também é usado para realizar o processo de dessorção nos biossorventes. Os álcalis

mais empregados neste tipo de processo são cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e/ou soda cáustica (NaOH).

- Ácido: é usado para reduzir o pH da água tratada (após a passagem pelas colunas de biomassa) antes do descarte, sendo, portanto, dosado no tanque TQ-204. Além disso, o ácido também é usado para realizar o processo de dessorção nos bioissorventes. O ácido mais empregado neste tipo de processo é o ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- Bioissorventes: a biomassa deve ser repostada quando estiver saturada e não for mais possível realizar o processo de dessorção (geralmente notado quando há aumento da concentração de metais no efluente de saída do sistema, o qual deve ser monitorado periodicamente). Desta forma, deve-se prever um estoque de bioissorvente para a continuidade da operação do sistema de tratamento.

A geração de resíduos da rota tecnológica adsorção por bioissorventes é a seguinte:

- Efluente contendo metais pesados. Durante o processo de dessorção das colunas de bioissorvente, os metais pesados são retirados através da passagem de soluções ácidas e/ou básicas. Desta forma, gera-se um efluente que pode ser descartado (tendo destinação adequada) ou processado para recuperação dos metais. Neste último caso, processos de evaporação são geralmente empregados.
- Resíduo sólido contendo metais pesados e biomassa.

5.2.4 Parâmetros de Influência

De acordo com Athinkson, Bux & Kasan (1998), o parâmetro mais importante é a afinidade do bioissorvente com o cátion metálico a ser adsorvido.

A utilização da rota tecnológica de adsorção por bioissorventes depende de vários fatores: capacidades do sistema, eficiência pretendida para o sistema, seletividade do metal no bioissorvente, facilidade de recuperação e de regeneração da biomassa, imunidade da biomassa a outros compostos químicos no efluente e capacidade de secagem antes da destinação do lodo resultante do tratamento.

Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), a decisão por processo contínuo ou em batelada leva em consideração: vazão, tipos de contaminantes (metais) e espaço disponível para instalação do sistema.

Athinkson, Bux & Kasan (1998) alertaram que sistemas de efluentes com grandes vazões e baixas concentrações na entrada devem operar com bioissorventes com grande afinidade para os metais de interesse. Já sistemas de efluentes com baixas vazões e grandes concentrações na entrada devem operar com bioissorventes com grande capacidade para evitar a saturação antes de terminar o tratamento.

5.2.5 Limitações

Um dos principais cuidados a serem tomados em sistemas de adsorção com bioissorventes é com relação à saturação da biomassa. Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), pode ocorrer a auto-dessorção dos metais de interesse caso haja saturação da biomassa.

Os mesmos autores alertaram ainda que íons de sódio e amônia podem causar a dessorção dos metais de interesse devido à interação eletrostática com a biomassa.

Além disso, a distância entre o local de produção do bioissorvente e o ponto de utilização (sistema de tratamento) é importante para o sucesso do projeto. Grandes distâncias podem inviabilizar os custos desta rota tecnológica, dada a elevada complexidade para transportar e manter a biomassa. O transporte da biomassa é feito geralmente em veículos refrigerados e com licença para este tipo de atividade. A biomassa deve ser estocada em local seco, arejado e preferencialmente refrigerado.

A geração de lodo deve ser minimizada em função do alto custo de sua disposição final (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998). A secagem de lodo geralmente é aconselhável em função da diminuição do seu volume e, conseqüentemente, do custo para sua destinação, o qual é proporcional à massa destinada (menos água resultada em menor massa no lodo). Para os lodos gerados em sistemas de adsorção de metais por biomassa, a redução da massa por equipamentos de secagem pode chegar a 60 ou 80%.

Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), os custos da preparação dos bioissorventes devem ser levados em consideração. A biomassa é geralmente misturada com os agentes imobilizantes numa proporção de 4 a 6% para 1%, respectivamente. O

encapsulamento celular confere maior força mecânica e resistência química à biomassa (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

5.2.6 Vantagens / Desvantagens

Segundo informações de Athinkson, Bux & Kasan (1998), o capital inicial dos sistemas de tratamento de metais por adsorção em bioissorventes é semelhante ao de sistemas de precipitação química, conhecidos por seu custo relativamente baixo.

Os custos específicos para aquisição e manutenção da biomassa podem ser significativos. A fim de minimizar estes custos, os processos de regeneração / dessorção da biomassa tornam-se importantes. Sabe-se que o ácido sulfúrico é uma das substâncias mais usadas para a dessorção de metais (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

De acordo com Miller (1995), o uso de bioissorventes é vantajoso em relação aos exopolímeros pelo menor tamanho e pela maior variedade química de suas moléculas, gerando maior seletividade metálica.

5.2.7 Considerações de Projeto

Em sistemas de bioissorventes, os tanques de reação devem ser projetados para funcionarem como clarificadores, sendo que o ideal é a utilização de tanques agitados com fundos cônicos (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

Os clarificadores de pratos inclinados (tipo lamelar) são preferíveis aos circulares, pois serem mais baratos, menores e mais eficientes (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

Os reatores de coluna por gravidade tendem a ser mais econômicos que aqueles dependentes de sistemas de bombeamento e transferência (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998). Porém, em reatores por gravidade não é possível o controle do tempo de retenção do efluente, o que pode gerar necessidade de criação de recirculações.

Segundo Athinkson, Bux & Kasan (1998), os principais tipos de reatores para uso em sistemas de bioissorventes são:

- Reatores de leito fixo (ascendente ou descendente);
- Reatores de leito fluidizado;

- Reatores de contatos biológicos rotativos;
- Reatores de filtros gotejantes;
- Reatores de enchimento de ar.

Na montagem dos sistemas, o bioissorvente deve ser empacotado livremente e imobilizado de maneira a manter íntegro o arranjo das partículas (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

5.2.8 Exemplos de Utilização

A realização de ensaios práticos para a avaliação do potencial de adsorção é fundamental para a definição e o dimensionamento dos sistemas de tratamento.

De acordo com Athinkson, Bux & Kasan (1998), as maiores oportunidades de mercado para os bioissorventes são no polimento final dos sistemas de tratamento. Nestas situações, os bioissorventes podem adsorver algum metal específico que não tenha sido removido pelo processo de tratamento anterior, bem como pode aumentar a remoção dos metais em geral no mesmo efluente.

Costa, Schneider & Rubio (2002) reportaram que macrófitos aquáticos possuem alta capacidade de acumular íons metálicos, dado que possuem íons carboxila. Este tipo de bioissorvente suporta vários processos de sorção e dessorção.

Segundo experimentos feitos por Costa, Schneider & Rubio (2002), os bioissorventes utilizados foram das espécies *Potamogeton lucens* e *Salvinia sp.* Os dados empíricos mostraram acúmulo médio de 33 mg de metais (cobre, níquel, zinco, ferro, cromo total) por grama de biomassa, num fluxo de efluente de 0,71 m³/m²/h e pH de 8,4. A biomassa foi regenerada por eluição com soluções ácidas (0,5% de HCl).

5.2.9 Valores Adotados neste Trabalho

De acordo com a Análise Técnica Preliminar da rota tecnológica Adsorção por Bioissorventes, adotou-se os seguintes valores para as demais etapas do Método de Seleção:

- Taxa adsorção bioissorvente de 146,5 mg metal / g bioissorvente (KURNIAWAN, 2006);

- Sem regeneração da biomassa;
- Correção no pH do efluente de entrada: levar até pH 7;
- Solução de álcali: solução saturada de cal (1,65 g cal / L água);
- Solução de ácido: solução ácido sulfúrico 1,0 mol/L.

A eficiência na remoção dos metais pesados no efluente foi definida como **99,9%** para as demais etapas do Método de Seleção.

5.3 Precipitação Química

5.3.1 Definição / Caracterização

De acordo com Jimenez, Bosco & Carvalho (2004), a precipitação química é o método mais utilizado no tratamento de metais existentes em água.

Segundo Costa, Schneider & Rubio (2002), a técnica de precipitação mais comum utiliza hidróxidos devido a sua simplicidade, baixo custo e facilidade para o controle de pH. Como consequência, neste processo a utilização de produtos químicos aumenta a salinidade e a condutividade da água (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

O pH mais utilizado neste processo, na grande maioria dos casos, é próximo a 11, no qual boa parte dos íons (zinco, cádmio, manganês, níquel) precipitam (KURNIAWAN ET AL, 2006).

A utilização de agentes coagulantes favorece a sedimentação das partículas formadas, desestabilizando as partículas coloidais (KURNIAWAN *et al*, 2006). Os agentes coagulantes mais usuais são sais de ferro e de alumínio.

A etapa de floculação é seguida da coagulação, a fim de aumentar o tamanho das partículas.

A precipitação por óxido de cálcio (CaO) é um método barato e simples, conseguindo tratar efluentes com concentração de metais acima de 1000 mg/L (KURNIAWAN ET AL, 2006). Porém, o uso de cal gera grande quantidade de rejeitos e um efluente com razoáveis concentrações de metais (BOSCO; JIMENEZ; CARVALHO,

2004). Por outro lado, o uso de CaO depende de equipamentos mais simples e uma operação mais segura do que quando se utilizam hidróxidos (KURNIAWAN ET AL, 2006).

De acordo com Pereira Neto et al (2008), os principais agentes alcalinizantes utilizados em precipitação são:

- MgO (óxido de magnésio): menos volume de lama e lodo mais compacto;
- NH₄OH (hidróxido de amônia): lama gelatinosa, de difícil filtragem.

Para minimizar a formação de lodo, bem como remover partículas coloidais de pequena dimensão, o uso da eletro-coagulação é recomendado (KURNIAWAN *et al*, 2006).

De acordo com Costa, Schneider & Rubio (2002), a precipitação é ideal para tratar efluentes com concentração de metais acima de 100 mg/L. Em baixas concentrações, o material precipitado apresenta cinética de precipitação baixa, aumentando o tempo necessário para a separação por decantação. Nestas situações, a utilização de outros sais ou polieletrólitos (agentes flocculantes) é fundamental para a eficiência do processo.

Efluentes com concentração de metais abaixo de 100 mg/L ou acima de 1000 mg/L também podem ser tratados pelo método de precipitação, desde que sejam usadas as etapas de coagulação mais floculação (KURNIAWAN *et al*, 2006).

A concentração final do efluente após o tratamento por precipitação química ainda pode estar acima dos limites legais. A presença de ânions como cloreto (Cl⁻), sulfato (SO₄²⁻) e cianeto (CN⁻) concorrem com o íon hidroxila (OH⁻) para formar os complexos com os metais (COSTA; SCHNEIDER; RUBIO, 2002).

5.3.2 Fluxograma Detalhado

O Fluxograma Conceitual do processo de remediação de efluente contaminado por metais pesados utilizando a rota tecnológica precipitação química é apresentado na **Figura 6**.

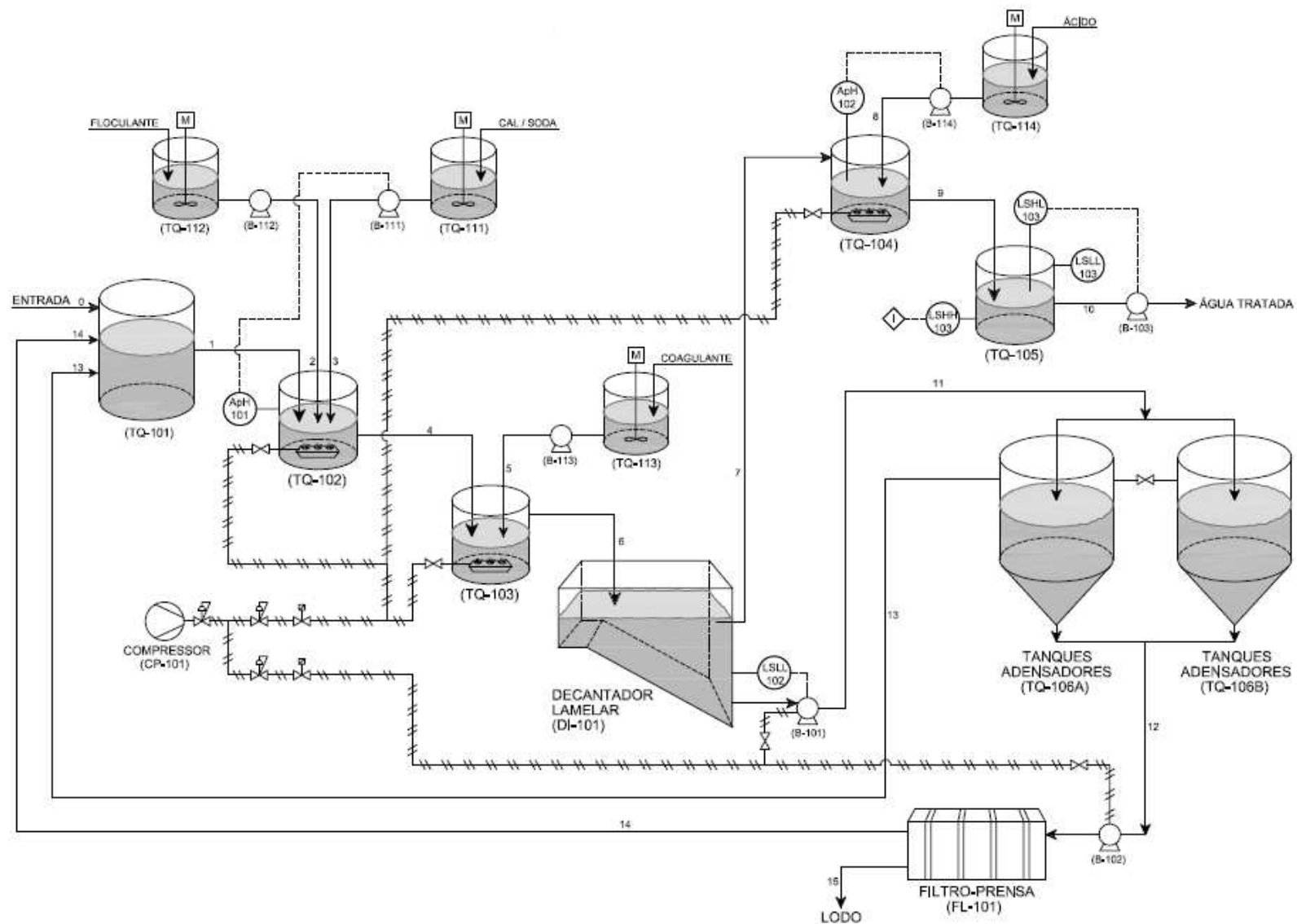


Figura 6: Fluxograma do Processo – Precipitação Química

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste fluxograma, o efluente entra no tanque TQ-101, seguindo por gravidade para o tanque TQ-102, onde é adicionada solução básica (vinda do TQ-112) e solução com o agente floculante (vinda do TQ-111). A injeção de solução básica é controlada pelo sensor + controlador de pH (ApH-101). Na seqüência, o efluente segue por gravidade para o tanque TQ-103, onde é adicionada solução com agente coagulante (vinda do TQ-113). O efluente segue por gravidade até o decantador lamelar (DL-101). No decantador lamelar, ocorre a separação das fases líquida (sobrenadante) e sólida (lodo).

O sobrenadante segue por gravidade para o tanque TQ-104, onde é adicionada solução ácida (vinda do TQ-114). A injeção de solução ácida é controlada pelo sensor + controlador de pH (ApH-102). O efluente segue por gravidade até o tanque TQ-105, de onde é bombeado para fora da estação. Esta transferência final é feita pela bomba centrífuga B-103, a qual é comanda pela chave de nível LSHL-103.

O lodo acumula-se na parte inferior do decantador lamelar e é transferida pela ação da bomba de diafragma B-101 para os tanques adensadores (TQ-106A e TQ-106B). Nestes tanques ocorre nova separação das fases, com adensamento do lodo. O sobrenadante destes tanques retorna ao processo, entrando no tanque TQ-101. O lodo acumula-se na parte inferior dos adensadores e é enviado pela ação da bomba de diafragma B-102 para o filtro prensa (FL-101). Neste, a fração sólida do lodo (torta) fica presa no tecido das placas e a fração líquida retorna ao processo entrando no tanque TQ-101.

O compressor CP-01 é o responsável pelo fornecimento de ar comprimido usado nos difusores de ar, os quais promovem a agitação dos seguintes tanques: TQ-102, TQ-103, TQ-104, TQ-111, TQ-112 e TQ-113. Nestes tanques ocorre dosagem de produtos químicos, sendo necessário prover agitação do conteúdo dos mesmos. No caso do tanque com insumo ácido (TQ-114), não é recomendada agitação via difusores de ar (volatilização do ácido pode causar problemas de saúde ocupacional). Neste tanque específico, deve ser usado um agitador mecânico.

O compressor CP-01 também é o responsável pelo fornecimento de ar comprimido para as bombas diafragmas B-101 (transferência do lodo do decantador lamelar para os tanques adensadores) e B-102 (passagem do lodo pelo filtro-prensa).

A chave de nível LSHH-103 tem a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle, evitando o extravasamento do tanque TQ-105.

As chaves de nível LSLL-102 e LSLL-103 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle para desligar as bombas B-101 e B-103, respectivamente, evitando que as mesmas operem a seco (chance de danos).

As bombas dosadoras BD-111 a BD-114 têm a função de enviar soda/cal, floculante, polieletrólito e ácido respectivamente ao processo.

Os tanques TQ-111, TQ-112, TQ-113, TQ-102, TQ-103 e TQ-104 possuem sistema de agitação por difusores de ar, a fim de proporcionar misturas homogêneas no seu interior.

Desta forma, os principais equipamentos e instrumentos utilizados nesta rota tecnológica são os seguintes:

- Tanque de Insumo (TQ-111): tanque de álcali, utilizado no controle de pH;
- Tanque de Insumo (TQ-112): tanque de agente floculante, utilizado para facilitar a geração de flocos contendo os metais pesados;
- Tanque de Insumo (TQ-113): tanque de agente coagulante, utilizado para gerar maior aglutinação dos flocos, facilitando a precipitação dos mesmos;
- Tanque de Insumo (TQ-114): tanque de ácido, utilizado no controle de pH;
- Tanque de Processo (TQ-101): tanque de equalização inicial que recebe o efluente a ser tratado;
- Tanque de Processo (TQ-102): tanque de dosagem de álcali e de floculante, para elevação do pH e formação dos flocos;
- Tanque de Processo (TQ-103): tanque de dosagem de polieletrólito;
- Decantador (DL-101): promove a separação da parte sólida (flocos com metais pesados) da parte líquida (água tratada), pelo método da decantação;
- Tanque de Processo (TQ-104): tanque que recebe a água tratada e onde é feita a correção final do pH (se necessário);

- Tanque de Processo (TQ-105): tanque pulmão de água tratada para destinação final;
- Tanques de Processo (TQ-106A e TQ-106B): tanques adensadores do lodo formado no decantador lamelar, promovendo uma maior separação entre as fases (líquida e sólida) por decantação;
- Filtro Prensa (FL-101): realiza a filtragem do lodo formado, criando a torta (metais pesados mais insumos utilizados) que deverá ser destinada;
- Bombas de Insumo (B-111 a B-114): bombas de envio de álcali, agente floculante, agente coagulante e ácido para o processo;
- Bombas Diafragmas (B-101 e BD-102): realizam a transferência do lodo através do processo;
- Bomba Centrífuga (B-103): realiza o envio da água tratada para a destinação final;
- Compressor (CP-101): gera ar comprimido para utilização nos difusores de ar da tancagem;
- Chaves de Nível (conjunto LS-103): atuam ligando e desligando a bomba centrífuga e geram alarmes do processo (níveis alto e baixo);
- Controladores de pH (ApH-101 e ApH-102): em conjunto com eletrodos de pH atuam ligando ou desligando as bombas dosadoras de álcali e ácido;
- Válvulas Diversas: tipo esfera (bloqueio de tubulações), tipo retenção (saída de bombas), tipo globo (controle manual da vazão);
- Tubulações: trechos em aço carbono e em PVC.

5.3.3 Utilização de Insumos e Geração de Resíduos

Para o funcionamento da rota tecnológica precipitação química, os seguintes insumos são utilizados:

- Álcali: é dosado no tanque TQ-102 para aumentar o pH do efluente a fim de permitir a precipitação dos metais pesados. Os álcalis mais empregados

neste tipo de processo são cal hidratada ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e/ou soda cáustica (NaOH).

- Agente Floculante: é dosado no tanque TQ-102 para facilitar a formação dos flocos. Os agentes floculantes mais comuns são sais de ferro e de alumínio.
- Agente Coagulante: é dosado no tanque TQ-103 para permitir maior agregação dos flocos e facilitar a precipitação dos mesmos por decantação. Geralmente é usado polieletrólito como agente coagulante, o qual pode ser catiônico, aniônico ou ambos.
- Ácido: é dosado no tanque TQ-104 para diminuir o pH do efluente a fim de permitir a sua destinação final (se necessário). O ácido mais empregado neste tipo de processo é o ácido sulfúrico (H_2SO_4).

A geração de resíduos da rota tecnológica precipitação química é a seguinte:

- Lodo contendo metais pesados e insumos usados no tratamento (álcali, floculante e polieletrólito).

5.3.4 Parâmetros de Influência

O parâmetro mais importante em um sistema de precipitação é o controle de pH (KURNIAWAN *et al*, 2006), já que é através do aumento do pH que os metais conseguem sair da sua forma dissolvida e fazem ligações com os ânions existentes.

5.3.5 Limitações

Uma das principais limitações da precipitação química é a não possibilidade de recuperação dos metais ao final do processo (JIMENEZ; BOSCO; CARVALHO, 2004; ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998; KURNIAWAN *et al*, 2006).

Segundo Jimenez, Bosco & Carvalho (2004), a precipitação não é viável para efluentes com grandes vazões e baixas concentrações de metais. Isso porque o método de precipitação química possui baixa eficiência operacional e elevados custos de extração nessas condições.

Desta forma, o lodo gerado pelo processo de precipitação química possui altas concentrações de metais, dificultando e aumentando os custos da disposição final (ATHINKSON; BUX; KASAN, 1998).

Os complexos de cianeto (CN^-) não conseguem ser tratados pelo processo usual de precipitação. Eles devem ser destruídos antes do início da floculação / correção de pH, geralmente por oxidação com hipoclorito de sódio (COSTA; SCHNEIDER; RUBIO, 2002).

O metal cromo hexavalente (Cr^{6+}) também não consegue ser tratado pela precipitação convencional. Desta forma, o cromo hexavalente deve ser reduzido para cromo trivalente (Cr^{3+}) antes da precipitação propriamente dita. Os compostos mais usuais para esta reação de redução são: metabissulfito de sódio, sulfato ferroso, e ferro metálico (COSTA; SCHNEIDER; RUBIO, 2002).

O método da precipitação química também não pode separar com eficiência o ferro (Fe^{2+}) e o zinco (Zn^{2+}) quando estão juntos no efluente (PEREIRA NETO *et al*, 2008). Estes cátions possuem pH de precipitação muito próximos ($\text{pH} = 7$), havendo a necessidade, para tanto, de oxidação prévia do ferro bivalente (Fe^{2+}) para o ferro trivalente (Fe^{3+}).

5.3.6 Vantagens / Desvantagens

As principais desvantagens da precipitação levantadas por Kurniawan et al (2006) são:

- Grande uso de insumos (e o custo destes insumos);
- Grande volume de lodo produzido (maior custo da disposição final);
- Toxicidade do lodo gerado;
- Agregação dos precipitados metálicos;
- Não aproveitamento dos metais.

Já Pereira Neto et al (2008) informaram algumas outras desvantagens deste processo:

- Ocorrência de reações paralelas em função da composição do efluente; e

- Determinação da quantidade de agente alcalinizante através de testes de jarro (empíricos).

Além destas, pode-se destacar como desvantagens do método de Precipitação Química a necessidade de grandes áreas para a instalação do sistema e a necessidade de transporte dos resíduos gerados (principalmente lodo), o que acaba encarecendo o processo.

5.3.7 Valores Adotados neste Trabalho

De acordo com a Análise Técnica Preliminar da rota tecnológica Precipitação Química, adotou-se os seguintes valores para as demais etapas do Método de Seleção:

- Separação de fases no decantador lamelar (DL-101): 10% lodo e 90% sobrenadante;
- Separação de fases nos tanques adensadores (TQ-106A/B): 15% lodo e 85% sobrenadante;
- 25% do lodo de entrada no filtro-prensa (FL-101) torna-se torta e 75% retorna ao processo como sobrenadante;
- Correção no pH do efluente de entrada: levar até pH 10;
- Solução de álcali: solução saturada de cal (1,65 g cal / L água);
- Solução de ácido: solução ácido sulfúrico 1,0 mol/L;
- Solução de agente floculante: solução de cloreto férrico 40% em massa;
- Solução de agente coagulante: solução de polieletrólito 1% em massa.

A eficiência na remoção dos metais pesados no efluente foi definida como **99,9%** para as demais etapas do Método de Seleção.

5.4 Osmose Reversa

5.4.1 Definição / Caracterização

“Quando uma solução diluída é colocada em contato com uma solução concentrada, ocorre a movimentação dos íons em direção à solução diluída e a movimentação de água pura em direção à solução mais concentrada. A este fenômeno se dá o nome de difusão. Quando a difusão se processa por meio de uma membrana semipermeável, que deixa passar a água, mas não os solutos, chama-se de osmose a saída da água pura em direção à água concentrada. A pressão necessária a ser aplicada para evitar a osmose, é chamada pressão osmótica a qual, é quantificada como a diferença de nível entre as duas soluções após se atingir o equilíbrio. Considerando-se que o interesse seja aumentar o volume da água pura (dessalinização), dever-se-ia aplicar uma pressão extra, superior à pressão osmótica, capaz de suplantar o potencial osmótico da solução mais concentrada, fazendo sair dela água pura em direção à solução menos concentrada. Como neste caso a água pura estaria se movimentando em sentido contrário ao sentido natural da osmose dá-se, a este processo, o nome de osmose reversa ou osmose inversa.” (SOARES et al, 2006, p. 732).

De acordo com Tomaszewska (2007), a osmose reversa pode ser utilizada em processos de dessalinização, remoção de óleos, remoção de componentes orgânicos e remoção de íons inorgânicos.

5.4.2 Fluxograma Detalhado

O Fluxograma Conceitual do processo de remediação de efluente contaminado por metais pesados utilizando a rota tecnológica osmose reversa é apresentado na **Figura 7**.

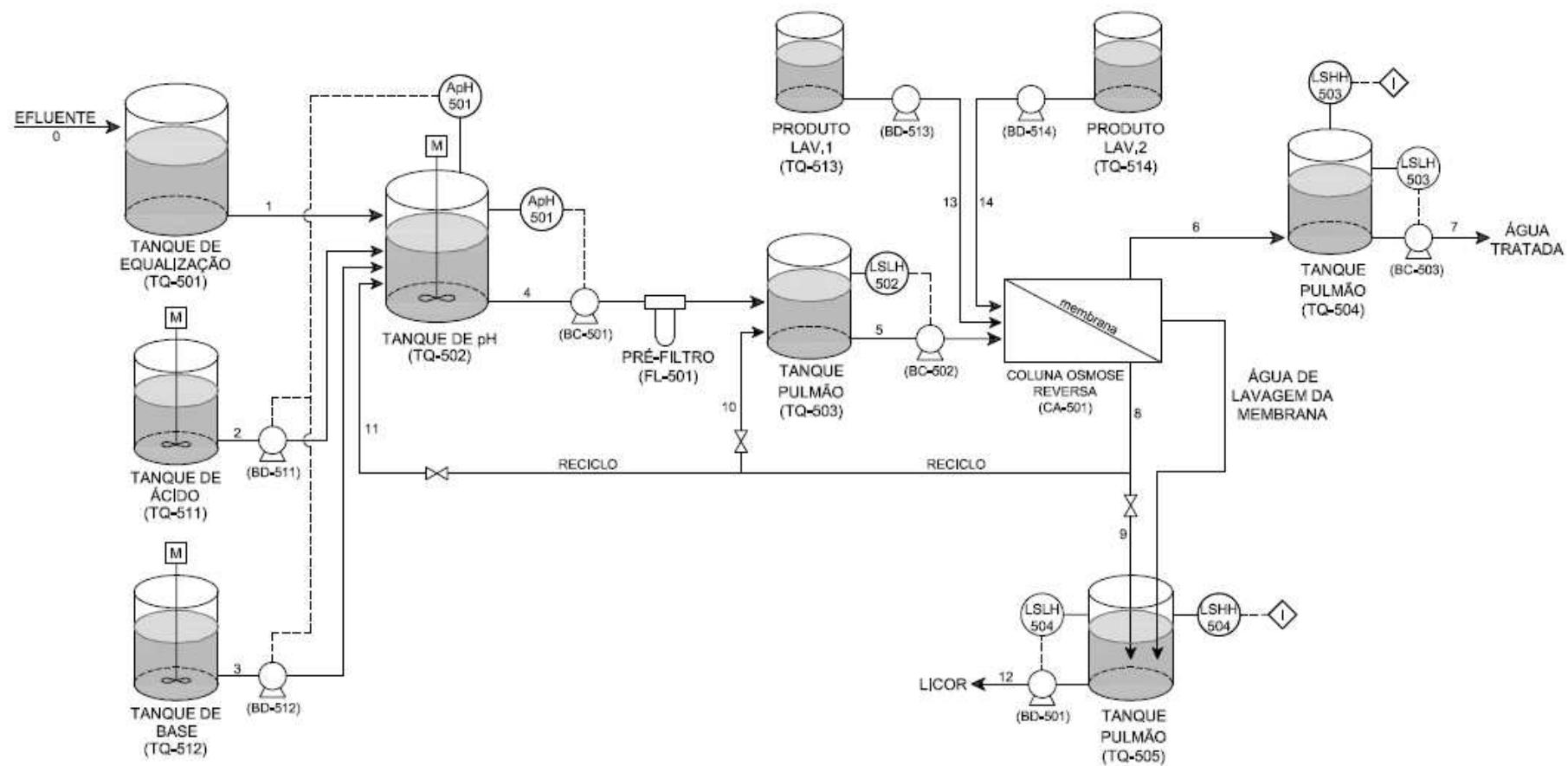


Figura 7: Fluxograma do Processo – Osmose Reversa

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste fluxograma, o efluente entra no tanque TQ-501, indo por gravidade para o tanque TQ-502. Neste tanque, ocorre a dosagem das soluções de ácido (vinda do TQ-511) e álcali (vinda do TQ-512). A injeção das soluções básica e ácida é controlada pelo sensor + controlador de pH (ApH-501). O efluente é transferido do tanque TQ-501 pela bomba centrífuga BC-501 (comandada pela chave de nível LSHL-501), passando por um filtro de linha (FL-501) e indo até o tanque TQ-503. O efluente é transferido deste tanque pela ação da bomba centrífuga BC-502 (comandada pela chave de nível LSHL-502), passando pela coluna de osmose reversa. Nesta coluna, os metais ficam retidos na membrana semipermeável, enquanto o efluente passa por ela.

O efluente sem metais segue para o tanque TQ-504, de onde é transferido para fora da estação pela bomba BC-503, a qual é comandada pela chave de nível LSHL-503.

Os metais que ficam retidos na membrana semipermeável saem da coluna de osmose reversa como licor, indo para o tanque TQ-505. Deste tanque, o licor juntamente com os eventuais produtos da lavagem da membrana é enviado para fora da estação pela bomba diafragma BD-501. Esta bomba é comandada pela chave de nível LSHL-504. Há linhas de reciclo do licor para o processo, através dos tanques TQ-502 e TQ-503. Tais manobras são feitas por válvulas manuais.

As chaves de nível LSHH-503 e LSHH-504 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle, evitando o extravasamento dos tanques TQ-504 e TQ-505, respectivamente.

As bombas dosadoras BD-511 e BD-512 têm a função de enviar ácido e álcali, respectivamente, ao processo.

As bombas dosadoras BD-513 e BD-514 têm a função de enviar os produtos de lavagem da membrana semipermeável à coluna de osmose reversa.

Desta forma, os principais equipamentos e instrumentos utilizados nesta rota tecnológica são os seguintes:

- Coluna de Osmose Reversa (CA-501): coluna com membrana semipermeável para a realização da osmose reversa. A quantidade de colunas é determinada no detalhamento do projeto executivo;

- Tanque de Insumo (TQ-511): tanque de ácido, utilizado no controle de pH do efluente antes da passagem pela membrana semipermeável;
- Tanque de Insumo (TQ-512): tanque de álcali, utilizado no controle de pH do efluente antes da passagem pela membrana semipermeável;
- Tanque de Insumo (TQ-513): tanque de produto específico para a lavagem da membrana semipermeável;
- Tanque de Insumo (TQ-514): tanque de produto específico para a lavagem da membrana semipermeável;
- Tanque de Processo (TQ-501): tanque de equalização inicial que recebe o efluente a ser tratado;
- Tanque de Processo (TQ-502): tanque de controle do pH antes da passagem pelas colunas de osmose reversa e onde também é recebido parte do licor de reciclo das colunas de osmose reversa;
- Tanque de Processo (TQ-503): tanque pulmão do efluente antes das colunas de osmose reversa;
- Tanque de Processo (TQ-504): tanque pulmão que recebe a água tratada para envio a sua destinação final;
- Tanque de Processo (TQ-505): tanque pulmão que recebe o licor proveniente das colunas de osmose reversa, para encaminhamento a sua destinação final;
- Pré-Filtro (FL-501): pré-filtro para retirada de partículas de maior tamanho antes da passagem pelas colunas de osmose reversa;
- Bombas de Insumo (BD-511 e BD-512): bombas de envio de ácido e álcali para o processo;
- Bombas de Insumo (BD-513 e BD-514): bombas de envio de produtos para a lavagem das membranas semipermeáveis;
- Bombas Centrífugas (BC-501 a BC-503): realizam a transferência da água através do processo;

- Bomba Diafragma (BD-501): realiza o envio do licor gerado nas colunas de osmose reversa para a destinação final;
- Chaves de Nível (conjuntos LS-501 a LS-504): atuam ligando e desligando as bombas centrífugas e geram alarmes do processo (níveis alto e baixo);
- Controlador de pH (ApH-501): em conjunto com eletrodo de pH atua ligando ou desligando as bombas dosadoras de álcali e ácido;
- Válvulas Diversas: tipo esfera (bloqueio de tubulações), tipo retenção (saída de bombas), tipo globo (controle manual da vazão);
- Tubulações: trechos em aço carbono e em PVC.

5.4.3 Utilização de Insumos e Geração de Resíduos

Para o funcionamento da rota tecnológica osmose reversa, os seguintes insumos são utilizados:

- Ácidos: os ácidos são dosados no tanque TQ-502 para diminuir o pH do efluente antes da passagem pelas colunas de osmose reversa. O ácido mais empregado neste tipo de processo é o ácido sulfúrico (H_2SO_4).
- Álcalis: os álcalis são dosados no tanque TQ-502 para aumentar o pH do efluente antes da passagem pelas colunas de osmose reversa. Os álcalis mais empregados neste tipo de processo são cal hidratada ($Ca(OH)_2$) e/ou soda cáustica (NaOH).
- Produtos de Lavagem das membranas semipermeáveis.

A geração de resíduos da rota tecnológica osmose reversa é a seguinte:

- Licor contendo metais pesados. Durante o processo de osmose reversa, os metais pesados são retirados pela passagem através de membranas semipermeáveis. Desta forma, gera-se um efluente com elevada concentração de metais pesados (licor) que pode ser descartado (por meio de ações de destinação final adequada) ou processado para recuperação dos metais. Neste último caso, processos de evaporação são geralmente empregados.

- Resíduo sólido caracterizado pelas membranas semipermeáveis sem possibilidade de recuperação e metais pesados adsorvidos na mesma.

5.4.4 Parâmetros de Influência

Os aspectos fundamentais do processo por osmose reversa são pressão e tipo de membrana semipermeável.

A osmose reversa requer pressões de trabalho na ordem de 60 a 100 bar (TOMASZEWSKA, 2007), bem mais elevadas do que em processos comuns de filtração.

De acordo com Kurniawan et al (2006), o pH ideal para a utilização das membranas de osmose reversa é de 7 a 9. Porém, em termos técnicos, o processo é viável para a faixa de pH de 3 a 11.

Ozaki, Sharma & Saktaywin (2002) estudaram o impacto da variação de alguns parâmetros na taxa de remoção de metais para membranas de pressão ultra-baixa:

- Aumento da concentração de metais no efluente de entrada: resultou em aumento da retenção de metais e em aumento da concentração de metais no permeado;
- Aumento da pressão de trabalho: resultou em aumento na retenção de metais, porém com eficiência diferente para os diversos tipos de metais;
- Aumento do pH (ainda dentro da faixa de 3 a 11): resultou em aumento na retenção de metais, devido à formação de precipitados;
- Presença de outros íons no efluente: diminuição na retenção de metais, dado que alguns íons negativos passam pela membrana e acabam atraindo íons positivos que conseqüentemente também passam pela membrana.

A osmose reversa produz como saída do processo um licor, caracterizado pelo material preso na membrana semipermeável. A destinação deste licor deve ser bem avaliada.

Soares et al (2005) avaliaram algumas opções para a destinação do licor:

- Cristalização dos sais: formação de alguns produtos, tais como gesso, cloreto de sódio e cloreto de cálcio;

- Tanques de evaporação: podem causar o aumento da concentração dos elementos tóxicos, trazendo dificuldade para a destinação destes na seqüência;
- Uso na irrigação: licor geralmente é diluído e grandes áreas são necessárias.

5.4.5 Limitações

De acordo com Athinkson, Bux & Kasan (1998), as membranas podem não resistir a alguns tipos de produtos químicos e de pH, além de se degradarem na presença de certos microorganismos presentes em alguns efluentes.

Segundo Tomaszewska (2007), as membranas utilizadas nos processos de osmose reversa são susceptíveis a falhas. Desta forma, deve-se realizar um pré-tratamento anterior para diminuir a probabilidade destas falhas. O pré-tratamento é caracterizado como uma etapa adicional de filtração, porém, com utilização de outro tipo de membrana. São recomendadas membranas que definem uma ultrafiltração ou microfiltração.

Benito & Ruíz (2001) destacaram situações em que é recomendado um processo de pré-tratamento no sistema:

- Presença de íons cianetos (CN^-) no efluente;
- Presença de sólidos em suspensão (acima de 5 μg);
- Necessidade de ajuste de pH.

Kurniawan et al (2006) reportaram que as membranas de osmose reversa podem formar pequenos poros e falhar quando na presença de óxidos de cloro ou de sólidos em suspensão. Além disso, os íons metálicos cádmio (Cd^{2+}) e cobre (Cu^{2+}) podem promover falha nas membranas.

5.4.6 Vantagens / Desvantagens

A principal desvantagem do processo de osmose reversa é a geração do licor, o qual, se não for gerenciado adequadamente, pode gerar custos elevados na sua destinação.

Kurniawan et al (2006) determinaram as principais desvantagens do método de osmose reversa como:

- Probabilidade de ocorrer falha na membrana, o que acarretaria paralisações da operação e gastos financeiros;
- Perda da eficiência de adsorção da membrana com o passar do tempo;
- Alto consumo de energia usada na pressurização do efluente na passagem pela membrana;
- Necessidade de operadores com razoável grau de instrução a fim de operar o processo.

Uma das principais vantagens do processo por osmose reversa é a possibilidade de recuperação dos metais ao final do processo (TOMASZEWSKA, 2007).

Além disso, o mesmo autor apresentou como benefícios do processo de osmose reversa:

- Baixo consumo de energia;
- Processo contínuo;
- Facilidade de aumento da escala do projeto.

Já Kurniawan et al (2006) complementaram esta relação de pontos fortes do processo de osmose reversa com as seguintes características:

- Alta retenção de metais (alta eficiência na remoção de metais) desde que não ocorra a saturação e/ou o colapso da membrana;
- Resistência ao ataque biológico;
- Estabilidade química (processo não incita a ocorrência de reações químicas);
- Possibilidade de uso de altas temperaturas.

5.4.7 Considerações de Projeto

Lazaridis et al (2005) e Matis (2003) alertaram quanto à importância de se evitar incrustações nas membranas. Para tanto, recomendam a utilização de fluxos em contracorrente, chicanas, retornos (*by-pass*) e injeção de ar.

Benito & Ruíz (2001) recomendaram que o processo de limpeza das membranas deve ser feito rapidamente, dado significar paralisação das operações.

5.4.8 Exemplos de Utilização

Kurniawan et al (2006) reportaram que membranas de poliamida possuem maior taxa de remoção de metais e podem trabalhar de 5 a 45°C. Estas membranas possuem maior porosidade e tendência hidrofílica.

No estudo de Benito & Ruíz (2001), foi utilizada uma membrana ACMTM (membrana de compósito de poliamida totalmente aromática), com 6 m² de área, 42 bar de pressão, 45°C e taxa de 5:1 (concentrado: permeado). A eficiência na separação de metais ficou acima de 95%. A concentração de poluentes no licor variou de 15 a 25% do volume de entrada.

Ozaki, Sharma & Saktaywin (2002) estudaram o comportamento de uma membrana de pressão ultra-baixa, denominada ULPROM (*ultra-low-pressure reverse osmosis membrane*). Eles obtiveram dados de retenção de metais (Cu²⁺, Ni²⁺ e Cr⁶⁺) acima de 95%.

5.4.9 Valores Adotados neste Trabalho

De acordo com a Análise Técnica Preliminar da rota tecnológica Osmose Reversa, adotou-se os seguintes valores para as demais etapas do Método de Seleção:

- 75% da vazão de entrada na coluna de osmose reversa (CA-501) é permeada e 25% fica retida (licor);
- Correção no pH do efluente de entrada: levar até pH 7;
- Solução de álcali: solução saturada de cal (1,65 g cal / L água);
- Solução de ácido: solução ácido sulfúrico 1,0 mol/L.

A eficiência na remoção dos metais pesados no efluente foi definida como **99,9%** para as demais etapas do Método de Seleção.

5.5 Flotação Iônica

5.5.1 Definição / Caracterização

O método da flotação é baseado na remoção dos íons metálicos na água pelo uso de agentes ativadores de superfície (surfactantes) e na subsequente remoção destas espécies hidrofóbicas por bolhas de ar (POLAT; ERDOGAN, 2007). Desta forma, são as bolhas de ar que carregam os íons metálicos até a superfície, fazendo com que acumulem na espuma. Ou seja: o mecanismo de transporte da flotação consiste da diferença de densidade proporcionada pela adição ao meio de bolhas de ar.

Uma molécula típica de surfactante possui uma parte polar (responsável por atrair o íon metálico) e uma parte apolar.

Kurniawan et al (2006) apresentaram os principais tipos de processos de flotação:

- Dispersão de ar;
- Ar dissolvido (DAF – *dissolved air flow*);
- Eletroflotação;
- Flotação biológica.

Lazaridis et al (2004) compararam três processos de flotação, usando a geração de bolhas por dispersão de ar:

- Flotação iônica (com xantatos);
- Flotação precipitativa (com hidróxido de cobre);
- Flotação sortiva (com zeólitas).

Lazaridis et al (2004) estudaram três processos de flotação com bolhas de ar:

- Flotação iônica: utilização de xantatos (minerais; orto-alquil-ditiocarbonatos), alta reatividade com metais pesados. O pH (2,5 a 5,5) não influenciou a remoção de metais;

- Flotação precipitativa: com a adição de hidróxido de sódio (NaOH). Foi necessário surfactante aniônico para coletar partículas precipitadas;
- Flotação sortiva: ocorrem três tipos de processo – adsorção superficial, difusão dentro do sólido e precipitação. Foram utilizadas zeólitas com carga superficial positiva e coletores aniônicos.

Na flotação iônica os surfactantes iônicos agem como coletores. Neste caso, as espécies iônicas são concentradas no topo da coluna.

Na flotação precipitativa, primeiramente, o íon é precipitado. Na seqüência, o ar carrega o precipitado.

Na flotação sortiva, ocorre a abstração primária dos metais por agentes ligantes. Os tipos de sorventes utilizados são geralmente zeólitas ou minerais finos. As bolhas de ar separam os sistemas metais e sorvente do líquido.

5.5.2 Fluxograma Detalhado

Optou-se pela flotação iônica em detrimento das demais em função dos resultados apresentados por Lazaridis et al (2004). Os autores chegaram a concentração final de cromo (Cr^{2+}) de 0,10 mg/L, 0,25 mg/L e 60,0 mg/L para uma concentração inicial de 240 mg/L para os métodos de flotação iônica, flotação sortiva e flotação precipitativa, respectivamente.

O Fluxograma Conceitual do processo de remediação de efluente contaminado por metais pesados utilizando a rota tecnológica flotação iônica é apresentado na **Figura 8**.

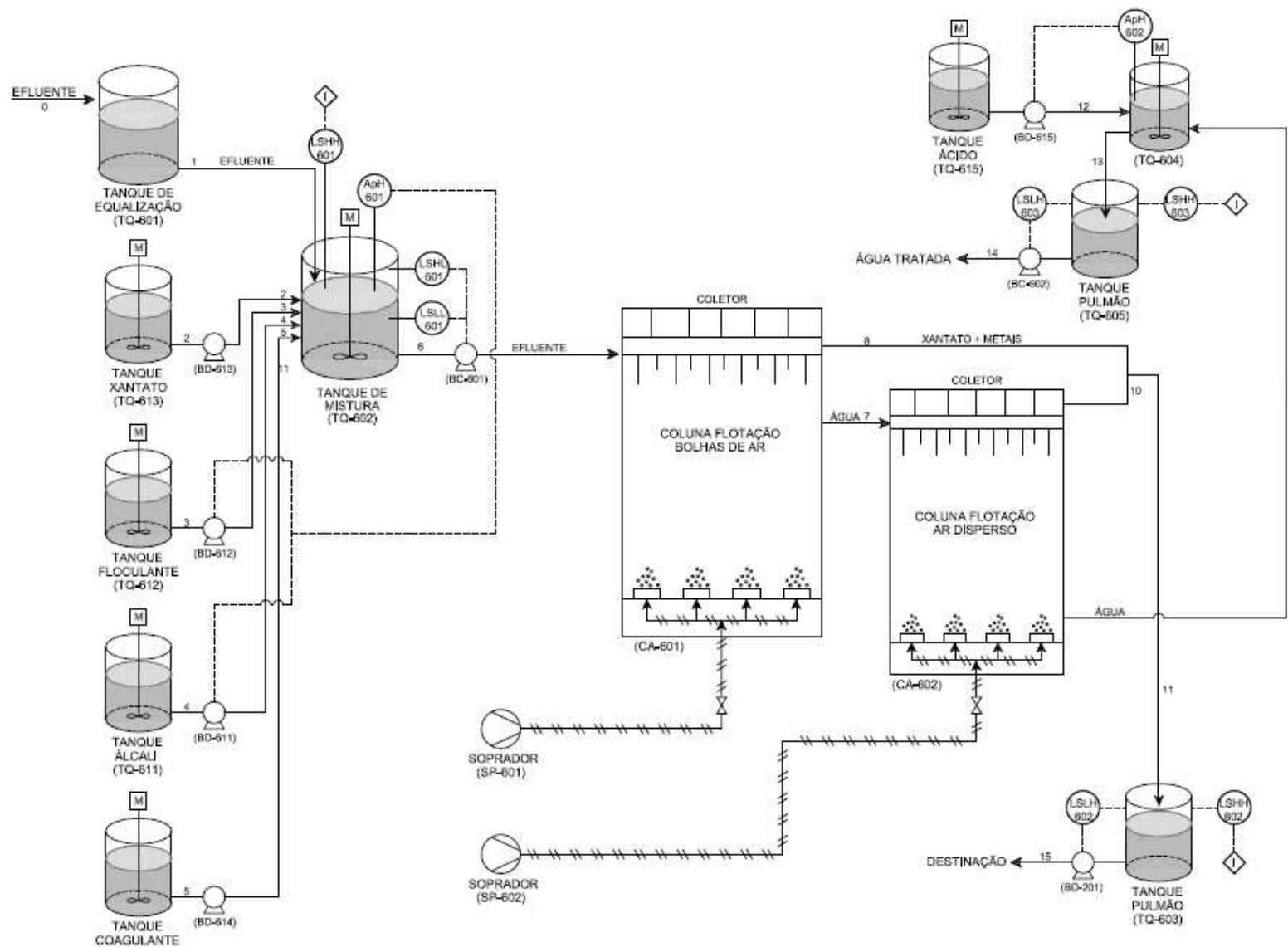


Figura 8: Fluxograma do Processo – Flotação Iônica

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Neste fluxograma, o efluente entra no tanque TQ-601, indo por gravidade para o tanque TQ-602. Neste tanque com agitação mecânica, ocorre a dosagem das soluções de álcali (vinda do TQ-611), agente floculante (vinda do TQ-612), xantato (vinda do TQ-613) e agente coagulante (vinda do TQ-614). A injeção das soluções básica e ácida é controlada pelo sensor + controlador de pH (ApH-601). O efluente é transferido do tanque TQ-602 pela bomba centrífuga BC-601 (comandada pela chave de nível LSHL-601) para a coluna de flotação com bolhas de ar (CA-601). Nesta coluna, bolhas de ar sobem da parte inferior do tanque e carregam a espuma até o coletor. O efluente restante segue por gravidade para a coluna de flotação por ar disperso (CA-602). Nesta coluna, ar é injetado a partir da parte inferior do tanque e carrega a espuma até o coletor. O efluente restante segue por gravidade até o tanque TQ-604, no qual é feita a dosagem de ácido (vindo do TQ-615) para correção do pH (10,0 para 7,0). Do TQ-604 o efluente vai para o TQ-605 por gravidade e é enviado para fora da estação pela bomba centrífuga BC-602. Esta bomba é controlada pela chave de nível LSHL-603.

A espuma armazenada nos coletores das duas colunas de flotação (CA-601 e CA-602) segue para o tanque TQ-603, sendo transferida para fora da estação pela bomba diafragma BD-601. Esta bomba é controlada pela chave de nível LSHL-602.

As chaves de nível LSHH-601, LSHH-602 e LSHH-603 têm a função de enviar sinal de alarme ao Painel de Controle, evitando o extravasamento dos tanques TQ-602, TQ-603 e TQ-605 respectivamente.

As bombas dosadoras BD-611 a BD-615 têm a função de enviar álcali, agente floculante, xantato, agente coagulante e ácido respectivamente ao processo.

O ar utilizado nas colunas de flotação é gerado pelos sopradores SP-601 e SP-602.

Desta forma, os principais equipamentos e instrumentos utilizados nesta rota tecnológica são os seguintes:

- Colunas de Flotação (CA-601 e CA-602): colunas onde ocorre a flotação de bolhas de ar (CA-601) e dispersão de ar (CA-602), encaminhando o precipitado para coletores localizados na parte superior das mesmas;
- Tanque de Insumo (TQ-611): tanque de álcali, utilizada no controle de pH do efluente;

- Tanque de Insumo (TQ-612): tanque de agente floculante, utilizado na promoção da floculação dos metais pesados existentes no efluente;
- Tanque de Insumo (TQ-613): tanque de xantato, que funciona como agente surfactante facilitando a geração da espuma contendo os metais pesados;
- Tanque de Insumo (TQ-614): tanque de agente coagulante, que promove a coagulação das partículas de metais pesados, facilitando sua remoção nas colunas de flotação;
- Tanque de Insumo (TQ-615): tanque de ácido, utilizado para correção final do pH do efluente;
- Tanque de Processo (TQ-601): tanque de equalização inicial que recebe o efluente a ser tratado;
- Tanque de Processo (TQ-602): tanque de correção do pH e adição de xantato antes da passagem pelas colunas de flotação;
- Tanque de Processo (TQ-603): tanque pulmão que recebe as correntes de xantato + metais (espumas) encaminhadas a partir dos coletores das colunas de flotação, antes da destinação final;
- Tanque de Processo (TQ-604): tanque de mistura onde ocorre a correção final do pH do efluente;
- Tanque de Processo (TQ-605): tanque pulmão que recebe a água tratada antes do envio para a destinação final;
- Bombas de Insumo (BD-611 a BD-615): bombas de envio de álcali, agente floculante, xantato, agente coagulante e ácido para o processo;
- Bombas Centrífugas (BC-601 e BC-602): realizam a transferência do efluente para as colunas de flotação e da água tratada para a destinação final;
- Bomba Diafragma (BD-601): realiza a transferência espuma contendo xantato + metais pesados + álcalis + ácidos para a destinação final;

- Sopradores (SP-601 e SP-602): geram ar para as colunas de flotação, sendo um soprador exclusivo para cada coluna;
- Chaves de Nível (conjuntos LS-601 a LS-603): atuam ligando e desligando as bombas centrífugas e geram alarmes do processo (níveis alto e baixo);
- Controladores de pH (ApH-601 e ApH-602): em conjunto com eletrodos de pH atua ligando ou desligando as bombas dosadoras de álcali e ácido;
- Válvulas Diversas: tipo esfera (bloqueio de tubulações), tipo retenção (saída de bombas), tipo globo (controle manual da vazão);
- Tubulações: trechos em aço carbono e em PVC.

5.5.3 Utilização de Insumos e Geração de Resíduos

Para o funcionamento da rota tecnológica flotação iônica, os seguintes insumos são utilizados:

- Álcalis: os álcalis são dosados no tanque TQ-602 para aumentar o pH do efluente antes da passagem pelas colunas de flotação. Os álcalis mais empregados neste tipo de processo são cal hidratada (Ca(OH)_2) e/ou soda cáustica (NaOH).
- Agente Floculante: é dosado no tanque TQ-602 para facilitar a formação dos flocos. Os agentes floculantes mais comuns são sais de ferro e de alumínio.
- Xantatos: os xantatos são usados como agentes ativadores de superfície (surfactantes), facilitando a segregação dos metais pesados na espuma a ser encaminhada para os coletores nas colunas de flotação.
- Agente Coagulante: é dosado no tanque TQ-602 para permitir maior agregação dos flocos e facilitar a precipitação dos mesmos por decantação. Geralmente é usado polieletrólito como agente coagulante, o qual pode ser catiônico, aniônico ou ambos.
- Ácido: é dosado no tanque TQ-604 para diminuir o pH do efluente a fim de permitir a sua destinação final (se necessário). O ácido mais empregado neste tipo de processo é o ácido sulfúrico (H_2SO_4).

A geração de resíduos da rota tecnológica flotação iônica é a seguinte:

- Espuma contendo metais pesados, xantatos, álcalis e ácidos. A espuma é encaminhada para os coletores das colunas de flotação sendo depois encaminhada para o tanque pulmão TQ-603.

5.5.4 Parâmetros de Influência

De acordo com Polat & Erdogan (2007), o tamanho das bolhas de ar deve ser bem definido (centenas de μm), a fim de gerar razoável área superficial para a coleta do sistema metais + surfactantes.

Os agentes que controlam o tamanho das bolhas, reduzindo a tensão interfacial ar / água, são chamados de espumantes.

O sucesso na remoção dos íons metálicos corresponde a uma grande razão íon metálico / água na espuma.

Segundo Polat & Erdogan (2007), o pH é extremamente importante na flotação: determina o tipo e a carga das espécies presentes na solução e, conseqüentemente, a estrutura do surfactante (coletores aniônicos e catiônicos) a ser usado. Kurniawan et al (2006) também alertaram que o pH é fundamental para o processo de flotação, juntamente com a química interfacial e a efetividade da agregação.

De acordo com Lazaridis et al (2005), os principais parâmetros que influenciam na flotação são:

- Tamanho das partículas do surfactante;
- Concentração do surfactante;
- Tamanho e vazão das bolhas de ar;

Para o controle do coletor, alguns parâmetros tornam-se fundamentais (LAZARIDIS et al, 2005):

- pH;
- Presença de compostos orgânicos;
- Força iônica dos metais a serem removidos.

5.5.5 Limitações

O processo de flotação necessita de um coletor que recebe a espuma e faz a remoção dos metais. Assim, os cuidados com o tipo de coletor são fundamentais para o desempenho do processo como um todo.

O aumento da perda de carga nas membranas é um fator a ser considerado caso o coletor usado seja do tipo membrana. Nestas situações, deve-se realizar controle freqüente da limpeza desta membrana (LAZARIDIS *et al*, 2005).

5.5.6 Vantagens / Desvantagens

O método de flotação é considerado de baixo custo na aquisição dos equipamentos de processo, pela sua simplicidade construtiva (POLAT; ERDOGAN, 2007).

Kurniawan *et al* (2006) apresentaram as seguintes vantagens adicionais para o método da flotação:

- Boa remoção de pequenas partículas;
- Pequeno tempo de retenção hidráulico.

Pode-se destacar a necessidade de grande variedade de insumos (álcali, ácido, agente floculante, xantato, agente coagulante) como uma das desvantagens do método de flotação iônica.

A necessidade de sopradores de ar de grande porte para gerar as bolhas de ar responsáveis pela flotação dentro das colunas também é considerada uma desvantagem deste método, uma vez que aumenta os custos de instalação e eleva o consumo de energia elétrica na operação do sistema.

5.5.7 Considerações de Projeto

Lazaridis *et al* (2005) compararam duas técnicas de flotação: precipitação-flotação e flotação com adsorção coloidal. A precipitação-flotação é insensível à força iônica, sendo que um aumento na concentração do coletor possibilita melhor geração de bolhas.

Os mesmos autores perceberam também por meio de experimentação que o fluxo de ar contracorrente melhora os resultados do processo. Além disso, notaram que quanto mais finas as bolhas de ar, menor a perda de carga nas membranas.

5.5.8 Exemplos de Utilização

De acordo com Polat & Erdogan (2007), ensaios mostraram que é possível separar em torno de 90% dos metais existentes no efluente inicial numa espuma com 20% da quantidade de água inicial. Segundo os mesmos autores, também seria possível separar individualmente alguns metais, sob certas condições. Nos ensaios realizados, foi possível separar o cobre do zinco e da prata através do controle de pH. Para a separação de cobre e zinco, o pH ideal encontrado nos ensaios foi de 4, no qual ambos os metais estão dissolvidos, porém há maior afinidade do cobre pelas moléculas da espuma. Para a separação de cobre e prata, o pH ideal encontrado nos ensaios foi de 10, no qual o cobre precipita (na forma de $\text{Cu}(\text{OH})_2$) e a prata continua dissociada na água.

Kurniawan et al (2006) informaram que, nos estudos desenvolvidos no início do século XXI, tem-se notado razoável utilização da flotação combinada com outros métodos, tais como filtração ou carvão ativado, tendo sido encontradas eficiências de remoção de zinco (Zn^{2+}) e cromo (Cr^{2+}) na ordem de 97% para soluções com concentração inicial próxima de 60 mg/L.

Matis et al (2003) estudaram o uso do método da flotação em combinação com a bioissorção, realizando um processo em duas etapas:

- Primeira etapa: sorção dos metais em microorganismos;
- Segunda etapa: flotação (por dispersão de ar) da carga de biomassa.

Os ensaios de Matis et al (2003) utilizaram surfactante catiônico. A aplicação de coletores nos ciclos de bioissorção / flotação foi bem recebida, resultando em recuperações próximas a 100% de biomassa.

Nos resultados dos ensaios de Matis et al (2003) nota-se que a turbidez diminuiu bastante após a flotação, denotando a importância da realização de uma efetiva floculação. Os autores notaram também que o aumento da vazão de ar proporcionou maior recuperação dos metais.

Por fim, Matis et al (2003) notaram que o tipo de bioissorvente não influenciou muito os resultados do processo conjunto bioissorção /flotação.

5.5.9 Valores Adotados neste Trabalho

De acordo com a Análise Técnica Preliminar da rota tecnológica Flotação Iônica, adotou-se os seguintes valores para as demais etapas do Método de Seleção:

- 60% da mistura de reagentes (xantato + base + flocculante + polieletrólito) e 60% dos metais dissolvidos saem na espuma da coluna CA-601;
- 40% da mistura de reagentes (xantato + base + flocculante + polieletrólito) e 40% dos metais dissolvidos saem na espuma da coluna CA-602;
- Correção no pH do efluente de entrada: levar até pH 10;
- Solução de álcali: solução saturada de cal (1,65 g cal / L água);
- Solução de ácido: solução ácido sulfúrico 1,0 mol/L;
- Solução de agente flocculante: solução de cloreto férrico 40% em massa;
- Solução de agente coagulante: solução de polieletrólito 1% em massa;
- Solução de surfactante: solução de xantato 1% em massa.

A eficiência na remoção dos metais pesados no efluente foi definida como **99,9%** para as demais etapas do Método de Seleção.

6 AVALIAÇÃO ECONÔMICA

A Avaliação Econômica das rotas tecnológicas é a segunda etapa do método de seleção proposto, caracterizando-se pela estimativa dos custos de instalação e operação de cada rota tecnológica.

A Avaliação Econômica das Rotas Tecnológicas foi baseada na metodologia proposta por Coulson & Richardson's em seu livro "*Chemical Engineering – Volume 6 – 3ª Edição - 1993*", a qual se adequou às necessidades desta etapa: estimar os custos de instalação e de operação de determinado processo.

Houve necessidade de alteração de alguns dos critérios definidos pelos autores para melhor adequação a sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. Pesquisas de mercado e análises de projetos em operação no Estado de São Paulo em 2011 e 2012 nortearam as alterações dos critérios.

6.1 Metodologia da Avaliação Econômica

A Avaliação Econômica consiste na estimativa de todos os custos envolvidos na construção e na operação de um sistema de tratamento. Diferentemente de uma planta industrial, sistemas de remediação em geral não são projetados para gerar retorno financeiro ao cliente, eles são desenvolvidos para solucionar o problema encontrado (contaminação ambiental com conseqüente risco de exposição) da forma mais eficiente e eficaz possível, obedecendo aos requisitos de projeto (financeiros, sociais, tecnológicos e legais).

Desta forma, a Avaliação Econômica de um Sistema de Tratamento de Efluentes com Metais Pesados consiste na estimativa dos Custos de Instalação e dos Custos de Operação ao longo dos anos.

6.1.1 Custos de Instalação

Os Custos de Instalação (*C_I*) envolvem tudo o que é necessário antes da operação do sistema. Eles são definidos pelo montante financeiro de Capital Fixo somado ao Capital de Trabalho.

Para a estimativa dos custos de Capital Fixo foi utilizado o Método de Fatores de Lang, desenvolvido por Lang em 1948, o qual aparece como um dos mais consagrados ao longo da história para estimativa de custos de unidades industriais. Este método define que o Capital Fixo é calculado a partir dos custos de compra dos principais equipamentos do sistema, estabelecendo percentuais de valores para os demais itens em função do custo total dos equipamentos. O Método de Fatores de Lang foi utilizado por Coulson & Richardson's (1993) os quais atualizaram os percentuais atribuídos a cada item em função da análise de dados reais.

Para a aplicação desta metodologia, todos os percentuais recomendados por Coulson & Richardson's (1993) foram confrontados com dados reais obtidos de projetos de remediação de efluentes contaminados por metais pesados desenvolvidos pela empresa ENVIRON no Brasil, no ano de 2011. Quando algum dos percentuais recomendados pelos autores não estava de acordo com os dados reais, o mesmo foi substituído por um valor mais próximo da realidade brasileira com base nos dados dos projetos da ENVIRON.

Desta forma, sabendo-se o preço dos principais equipamentos, os demais itens são determinados como sendo porcentagem deste preço, através da seguinte equação:

$$Cf = f_L \times Ce$$

onde “Cf” é o Capital Fixo, “f_L” é o fator de Lang (para cada tipo de processo) e “Ce” é o preço total dos equipamentos principais do sistema. O fator de Lang (f_L) é definido como 3,1 para processos com sólidos predominantemente, 4,7 para processos com fluidos predominantemente e 3,6 para processos com fluidos e sólidos. Neste trabalho foi adotado o valor de **3,6** (sistema de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados).

O **Capital Fixo** é o custo total para que o sistema fique pronto para a fase de *Start-up*. O Capital Fixo é definido pela soma dos Custos Indiretos e dos Custos Diretos do sistema.

Os Custos Indiretos são definidos pela soma de três etapas:

- Projeto e Engenharia: custos referentes à elaboração do Projeto Executivo para o sistema de tratamento, etapa de compras (aquisição e inspeção dos

materiais) e supervisionamento da obra (construção). Os custos de Projeto e Engenharia foram definidos como 25% dos Custos Diretos do sistema, sendo este percentual aplicável atualmente.

- Lucros Empreiteiros: as equipes de montagem (civil, mecânica e elétrica) geralmente estimam os preços considerando certo lucro para si. Desta forma, este montante deve ser adicionado aos Custos Indiretos do sistema. Os custos de Lucros para Empreiteiros foram definidos como 10% dos Custos Diretos do sistema, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Imprevistos: uma obra está sempre sujeita a imprevistos, tais como: más condições climáticas, quebra de máquinas e equipamentos, acidentes com pessoal, mudanças de projeto, etc. Estes contratempos ocasionam maiores custos para os responsáveis pelo projeto, dado que geralmente as empresas contratadas (empreiteiros) se resguardam de tais imprevistos colocando cláusulas defensivas em seus contratos de trabalho. Sendo assim, os custos de Imprevistos foram definidos como 10% dos Custos Diretos do sistema, sendo este percentual aplicável atualmente.

Os Custos Diretos são definidos pela soma de duas etapas:

- Custo dos Equipamentos Principais: para a determinação do custo dos principais equipamentos, uma análise de engenharia mais apurada em cada sistema deve ser feita, envolvendo as etapas de Balanço de Massa, Balanço de Energia, Fluxograma Conceitual, definição de Materiais de Construção e, finalmente, o Dimensionamento dos Equipamentos. Com este dimensionamento executado, pode-se realizar a estimativa de custo dos equipamentos principais por dois métodos:
 - Estimativa Real de Custo: a partir de recentes cotações com equipamentos similares, pode-se estimar com maior precisão o custo para o sistema em questão.
 - Utilização do Método Fatorial: existem tabelas e gráficos com custo para cada tipo de equipamento em função de suas capacidades e materiais construtivos. Para tanto, a seguinte fórmula é utilizada:

$$C_e = C \times S^n$$

onde “Ce” é o custo do equipamento, “C” é um custo constante (determinado em tabelas), “S” é uma característica da capacidade do equipamento (obtido por cálculo e depois por tabelas) e “n” é um índice para cada tipo de equipamento, obtido em tabela.

O Custo dos Equipamentos Principais é determinado pela soma dos custos individuais dos equipamentos.

- Custo dos Acessórios: após os equipamentos, deve ser estimado o custo dos demais componentes para a construção do sistema. Este custo é obtido como porcentagem do custo dos Equipamentos Principais, conforme o Método de Fatores de Lang:
 - Suportes e Movimentação: incluem movimentação vertical e horizontal dos equipamentos até o local de instalação, bem como os suportes mecânicos necessários para cada equipamento. Custo definido como 40% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 40% para 20% (sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados), em função da presença de poucos equipamentos de grande porte e que necessitem de suportes complexos.
 - Tubulação: inclui tubos, conexões, isolamentos térmicos e pintura. Custo definido como 70% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 70% para 20% (com base em casos reais existentes no Estado de São Paulo no ano de 2011 de sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados), em função da possibilidade de utilização de PVC como material de grande parte da tubulação neste tipo de sistema, diminuindo seu custo.
 - Instrumentação e Controle: incluem instrumentos, painéis elétricos, sala de controle, CLP e Sistema Supervisório. Custo definido como 20% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 20% para 30% (com base em casos reais existentes no Estado de São Paulo no ano de 2011 de sistemas de tratamento de efluentes por

metais pesados), em função dos painéis elétricos (controle do sistema) representarem um custo significativo neste tipo de projeto.

- Elétrica e Iluminação: inclui cabos elétricos, eletrodutos, conduítes, conectores, iluminação, tomadas. Custo definido como 10% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 10% para 20% (com base em casos reais existentes no Estado de São Paulo no ano de 2011 de sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados), em função dos conduítes e cabos elétricos representarem um custo razoável neste tipo de sistema, dado que as distâncias entre os equipamentos podem ser significativas.
- Civil: inclui fundações, bases, abrigos e demais estruturas. Custo definido como 15% do custo total dos equipamentos, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Utilidades: incluem a preparação do sistema para ar comprimido e água. Não incluem o custo da utilidade em si (a ser considerado nos Custos de Operação do sistema). Custo definido como 50% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 50% para 25% (com base em casos reais existentes no Estado de São Paulo no ano de 2011 de sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados), em função deste tipo de projeto requerer geralmente apenas linhas simples de ar comprimido e, em muitos casos, o próprio cliente se encarrega de realizar a alimentação elétrica e o fornecimento de ar comprimido.
- Infraestrutura Local: inclui a preparação do local para a instalação do sistema, envolvendo nivelamento terreno, demarcação de área, limpeza do local. Custo definido como 5% do custo total dos equipamentos. O fator foi alterado de 5% para 10% (com base em casos reais existentes no Estado de São Paulo no ano de 2011 de sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados) em função da necessidade de adequação do local para a instalação do sistema,

por se tratar geralmente de uma área isolada dentro de fábricas ou mesmo área externa desprotegida (insegura).

O **Capital de Trabalho** é o custo necessário para testar e ligar o sistema (realizar o *start-up*) e deixá-lo pronto para a operação. Desta forma, o Capital de Trabalho envolve as seguintes etapas:

- Matérias-Primas Iniciais: insumos necessários para o início da operação do sistema.
- Suporte Fornecedores: verba para realizar o contato e garantir visitas de fornecedores para auxiliar nos testes e na partida inicial de elementos críticos do sistema (painéis elétricos, equipamentos, etc.).
- Comissionamento e Start-up: verificação da correta construção de cada item do sistema, teste individual de cada equipamento e instrumento, teste em grupo de cada subsistema, verificação da comunicação entre os subsistemas e testes gerais de funcionamento integral do sistema. Partida inicial do sistema (*start-up*).

O custo do Capital de Trabalho varia de 5 a 30% do Capital Fixo, em função da complexidade do sistema. Desta forma, para os Sistemas de Tratamento de Efluentes com Metais Pesados o custo do Capital de Trabalho foi definido como 10% do Capital Fixo em virtude da pouca complexidade do processo (não utilização de energia nem vapor, ocorrência somente de reações de precipitação, não ocorrência de reações exotérmicas e endotérmicas, sem controle de temperatura, não liberação de gases).

A **Figura 9** a seguir apresenta o organograma dos Custos de Instalação de um Sistema de Tratamento de Efluentes com Metais Pesados.

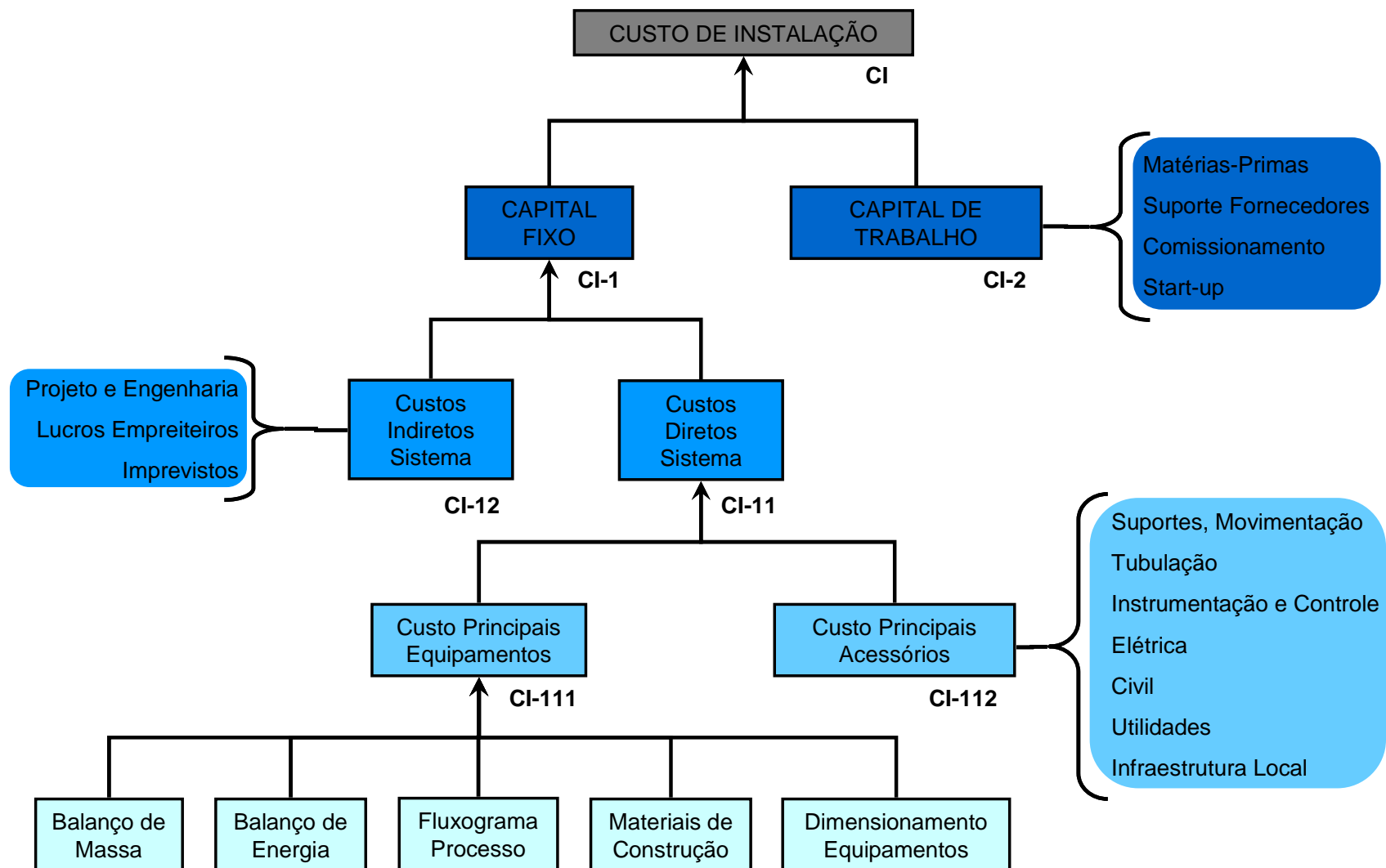


Figura 9: Avaliação Econômica – Custo de Instalação
 Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.1.2 Custos de Operação

Os Custos de Operação (CO) envolvem tudo o que é necessário para garantir a operação do sistema ao longo de um ano. Eles são definidos pela somatória dos Custos Diretos e dos Custos Extras.

Os **Custos Diretos** são definidos pela soma dos Custos Fixos e dos Custos Variáveis na operação de um sistema.

Os Custos Fixos são definidos pela soma dos seguintes itens:

- Manutenção: incluem os custos para realização de manutenções no sistema, envolvendo materiais e mão-de-obra. Os custos de manutenção são calculados em função da complexidade de cada sistema e da variedade de produtos e equipamentos utilizados. Os custos de manutenção variam de 5 a 15% do Capital Fixo. Para Sistemas de Tratamento de Efluente com Metais Pesados foi definido custo de manutenção em 10% do Capital Fixo.
- Operadores: incluem os custos com a mão-de-obra para realizar a operação do sistema, sendo em função do número de funcionários e da necessidade (em dias) de presença no sistema semanalmente. Para determinação dos custos de Operadores, foi estimado um valor por hora de trabalho de R\$ 30,00 (pesquisa de mercado no Estado de São Paulo para o segundo semestre de 2011).
- Laboratório: incluem os custos com as coletas de amostras e análises químicas para determinação da eficiência do sistema de tratamento. Geralmente análises químicas da entrada (efluente bruto) e da saída (efluente tratado) são feitas mensalmente, sendo que o valor estimado para cada análise é de R\$ 400,00 (pesquisa de mercado na cidade de São Paulo no ano de 2011).
- Supervisão: inclui o custo humano para o gerenciamento da operação do sistema. Os custos de Supervisão foram definidos como 20% dos custos de Operadores, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Custos Adicionais: incluem custos não mencionados nos itens anteriores, tais como recursos humanos para a elaboração de relatórios técnicos de

avaliação da eficiência e da eficácia do sistema de tratamento. Os Custos Adicionais foram definidos como 50% dos custos de Operadores. O fator foi alterado de 50% para 30% (sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados), em função da pouca variedade de materiais manipulados no sistema e na relativa simplicidade do processo.

- Depreciação: custos de depreciação do sistema anualmente. Em média, foi definido um custo de Depreciação anual de 10% do Capital Fixo, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Impostos: impostos e taxas necessários à operação do sistema, definidos como 2% do Capital Fixo, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Seguro: seguro para a operação do sistema, definido como 1% do Capital Fixo, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Patentes: necessidade de pagamento de patentes para a operação do sistema (se necessário). Nestes casos, os custos de Patente variam de 1 a 5% do Capital Fixo.

Os Custos Variáveis são definidos pela soma dos seguintes itens:

- Insumos: quantidade total anual de insumos necessários na rota tecnológica determinada. Incluem ácidos, álcalis, adsorventes, absorventes, floculantes, polieletrólitos, produtos para os processos de dessorção e retrolavagem. A quantidade de insumos é determinada pelo Balanço de Massa de cada rota tecnológica. O valor dos insumos é determinado por pesquisas de mercado.
- Materiais de Operação Diversos: incluem os materiais necessários à operação do sistema, que não foram abordados nos insumos e nem nos materiais de manutenção, como por exemplo: EPI's, materiais de limpeza, reposição de materiais (devido a danos, roubo, etc.). Os custos de Materiais de Operação Diversos foram definidos como 10% dos custos de manutenção, sendo este percentual aplicável atualmente.
- Utilidades: incluem os custos com energia elétrica, ar comprimido e água. A quantidade de utilidades é obtida por Balanço de Massa e do Balanço de

Energia de cada rota tecnológica. O valor de cada utilidade deve ser obtido por análises de mercado para cada situação.

- Destinação Resíduos: incluem os custos com a destinação dos resíduos gerados ao final do processo de tratamento. A quantidade de resíduo a ser gerado é estimada pelo Balanço de Massa de cada rota tecnológica. O valor para a destinação de cada tipo de resíduo é determinado por pesquisas de mercado para as diferentes opções de destinação (aterro, co-processamento, dessorção térmica, incineração).

Os **Custos Extras** são definidos pela soma dos seguintes itens:

- Inflação: aumento dos custos em função da inflação existente no país onde o sistema será implantado.
- Pesquisa e Desenvolvimento: incluem gastos de engenharia e laboratório para pesquisas de melhorias no sistema.

O fator foi alterado de 20% para 5% nos Custos de Operação Diretos, em função da pouca execução de pesquisa e desenvolvimento para este tipo de sistema ao longo da sua operação.

A **Figura 10** a seguir apresenta o organograma dos Custos de Operação de um Sistema de Tratamento de Efluentes com Metais Pesados.

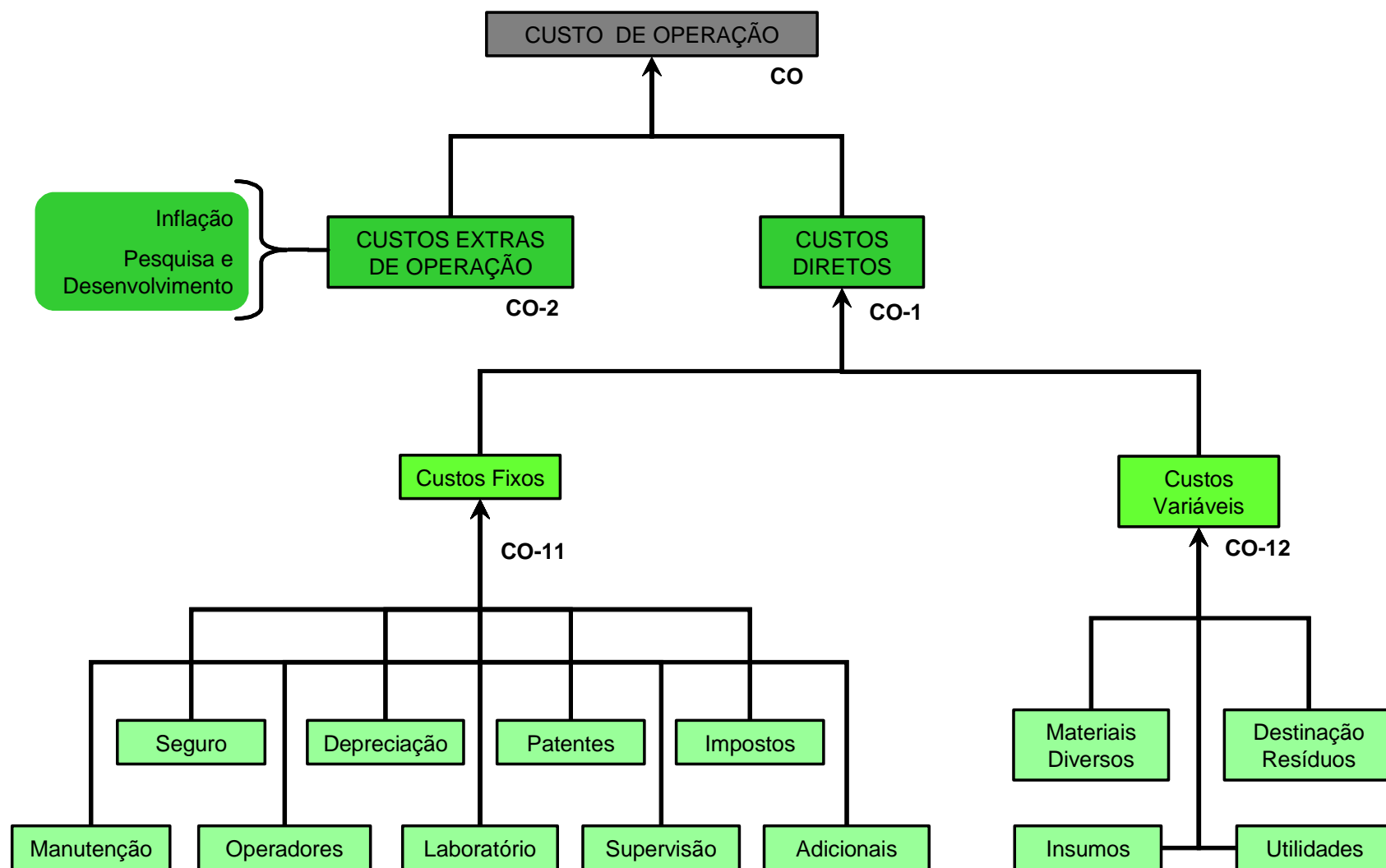


Figura 10: Avaliação Econômica – Custo de Operação
Fonte: Elaborado pelo Autor.

6.1.3 Custo Total

O Custo Total de um Sistema de Tratamento de Efluentes com Metais Pesados é definido pelo Custo de Instalação somado ao Custo de Operação.

O parâmetro tempo de operação é fundamental na aceção do custo total, dado que a metodologia de cálculo para o Custo de Operação tem base anual. Sendo assim, o Custo Total pode ser definido pela equação a seguir:

$$CT = CI + CO \times t_{op}$$

Onde, “CT” é o Custo Total, “CI” é o Custo de Instalação (**item 6.1.1**), “CO” é o Custo Operacional (**item 6.1.2**) e t_{op} é o tempo de operação estimado para o Sistema de Tratamento (em anos).

A **Tabela 1** a seguir apresenta a base dos cálculos para o Custo Total do sistema, a partir da metodologia de estimativa de custos definida nos itens anteriores.

Tabela 1: Avaliação Econômica – Custo Total de um Sistema de Tratamento

Custo Principais Equipamentos			
Equipamentos	Quant.	Material	Custo Efetivo
			R\$ 0,00
			R\$ 0,00
			R\$ 0,00
			R\$ 0,00
			R\$ 0,00
			R\$ 0,00
Total CI-111			R\$ 0,00

Custo Acessórios		
Acessórios	% do CI-111	Custo Efetivo
Suportes, Movimentação	20%	R\$ 0,00
Tubulação	20%	R\$ 0,00
Instrumentação, Controle	30%	R\$ 0,00
Elétrica, Iluminação	20%	R\$ 0,00
Estruturas Civil	15%	R\$ 0,00
Utilidades (ar, água, vapor)	10%	R\$ 0,00
Infraestrutura Local	10%	R\$ 0,00
Total CI-112		R\$ 0,00

Custos Diretos Sistema		
Item	Definição	Custo Efetivo
Estimativa Custo Equipamentos	Total CI-111	R\$ 0,00
Estimativa Custo Acessórios	Total CI-112	R\$ 0,00
Total CI-11		R\$ 0,00

Custos Indiretos Sistema		
Item	% do Total CI-11	Custo Efetivo
Projeto e Engenharia	25%	R\$ 0,00
Lucros Empreiteiros	10%	R\$ 0,00
Imprevistos	10%	R\$ 0,00
Total CI-12		R\$ 0,00

CAPITAL FIXO		
Item	Definição	Custo Efetivo
Custos Diretos Sistema	Total CI-11	R\$ 0,00
Custos Indiretos Sistema	Total CI-12	R\$ 0,00
Total CI-1		R\$ 0,00

CAPITAL DE TRABALHO		
Item	% do Total CI-1	Custo Efetivo
Matérias-Primas Iniciais	1%	R\$ 0,00
Suporte Fornecedores	4%	R\$ 0,00
Comissionamento e Start-up	5%	R\$ 0,00
Total CI-2		R\$ 0,00

CUSTO INSTALAÇÃO		
Item	Definição	Custo Efetivo
Capital Fixo	Total CI-1	R\$ 0,00
Capital de Trabalho	Total CI-2	R\$ 0,00
Total CI		R\$ 0,00

Custos Operação Fixos		
Item	Definição	Custo Efetivo
Manutenção	5% de CI-1	R\$ 0,00
Operadores	Estimativa	R\$ 0,00
Laboratório	Estimativa	R\$ 0,00
Supervisão	20% de Opera.	R\$ 0,00
Custos Adicionais	30% de Opera.	R\$ 0,00
Depreciação	10% de CI-1	R\$ 0,00
Impostos	2% de CI-1	R\$ 0,00
Seguro	1% de CI-1	R\$ 0,00
Patentes	Se necessário	R\$ 0,00
Total CO-11		R\$ 0,00

Custos Operação Variáveis		
Item	Definição	Custo Efetivo
Insumo 1	Balanço Massa	R\$ 0,00
Insumo 2	Balanço Massa	R\$ 0,00
Insumo 3	Balanço Massa	R\$ 0,00
Insumo 4	Balanço Massa	R\$ 0,00
Materiais Diversos	10% Manut.	R\$ 0,00
Utilidade - Água	Balanço Massa	R\$ 0,00
Utilidade - Energia Elétrica	Balanço Energia	R\$ 0,00
Destinação Resíduos	Balanço Massa	R\$ 0,00
Destinação Resíduos	Balanço Massa	R\$ 0,00
Total CO-12		R\$ 0,00

Custos de Operação Diretos		
Item	Definição	Custo Efetivo
Custos de Operação Fixos	Total CO-11	R\$ 0,00
Custos de Operação Variáveis	Total CO-12	R\$ 0,00
Total CO-1		R\$ 0,00

Custos Extras de Operação		
Item	Definição	Custo Efetivo
Despesas com Vendas	5% de CO-1	R\$ 0,00
Inflação		
Pesquisa e Desenvolvimento		
Total CO-2		R\$ 0,00

CUSTO OPERAÇÃO ANUAL		
Item	Definição	Custo Efetivo
Custos de Operação Diretos	Total CO-1	R\$ 0,00
Custos de Operação Extras	Total CO-2	R\$ 0,00
Total CO		R\$ 0,00

CUSTO TOTAL		
Item	Definição	Custo Efetivo
Custo de Instalação	Total CI	R\$ 0,00
Custo de Operação Anual	Total CO	R\$ 0,00
Anos de Operação (previsão)	anos	0
CUSTO TOTAL SISTEMA		R\$ 0,00

Lengeda:

Vermelho: parâmetro que sofreu alteração no processo de calibração.

Item a ser completado pelo Avaliador.

7 AVALIAÇÃO AMBIENTAL, DE SAÚDE E SEGURANÇA

A Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança é a terceira etapa do Método de Seleção proposto. Ela é baseada na análise do ciclo de vida de processos industriais, tendo como objetivo a avaliação dos critérios ambientais, de saúde e de segurança nas diversas etapas que caracterizam este ciclo de vida.

Os procedimentos foram baseados na metodologia proposta por Graedel & Howard-Grenville (2005). Tal metodologia foi escolhida por ser representativa para os propósitos deste trabalho, na medida em que avalia o ciclo de vida de processos industriais, os quais definem as rotas tecnológicas avaliadas. As fronteiras de análise do ciclo de vida se limitaram até o nível de atuação direto do aplicador da tecnologia (responsável pelo projeto), ou seja, até o primeiro nível de influência.

A sua importância reside no fato de que alguns destes critérios frequentemente norteiam a escolha da rota tecnológica a ser aplicada. Limitações quanto à geração de resíduos, uso de insumos químicos, geração de ruídos ou dificuldade operacional são frequentemente considerados nas análises de projeto atualmente.

A avaliação ambiental, de saúde e segurança de cada rota tecnológica fornece um quadro qualitativo comparativo entre as rotas tecnológicas avaliadas. Cabe aos avaliadores (tomadores de decisão) analisarem o resultado desta avaliação tendo em vista as particularidades de seu projeto, verificando se há critérios limitantes em alguma das rotas tecnológicas.

7.1 Metodologia da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança

A Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança é dividida em duas fases: avaliação ambiental e avaliação de saúde e segurança. A metodologia para a Avaliação Ambiental baseia-se na Matriz de Abordagem de Avaliação apresentada por Graedel & Howard-Grenville (2005). Esta matriz objetiva identificar e quantificar todos os aspectos da interação entre processos industriais e meio ambiente, sendo composta por cinco linhas “i” (etapas do ciclo de vida de um processo industrial) e cinco colunas “j” (critérios a serem avaliados).

Cada processo industrial é avaliado em conceitos de 0 (maior impacto ambiental, avaliação com caráter negativo) a 4 (menor impacto ambiental, avaliação com caráter positivo). Somando-se os 25 campos da matriz, obtém-se a nota “ R_{am} ” da rota tecnológica, numa escala de 0 a 100, de acordo com a fórmula a seguir:

$$R_{am} = \sum_i \times \sum_j \times M_{i,j}$$

Onde “ $M_{i,j}$ ” representa o “conceito atribuído” para cada célula da matriz, “ i ” varia de 0 a 5 e “ j ” varia de 0 a 5, totalizando 25 células na matriz.

A metodologia para a Avaliação de Saúde e Segurança é semelhante à Avaliação Ambiental, também se baseando na Matriz de Abordagem de Avaliação apresentada por Graedel & Howard-Grenville (2005). As cinco etapas do ciclo de vida são as mesmas da Avaliação Ambiental, porém, no caso específico de Avaliação de Saúde e Segurança, as 5 colunas da matriz contêm itens de referência para saúde e segurança. A nota “ R_{ss} ” da rota tecnológica também é obtida numa escala de 0 a 100.

$$R_{ss} = \sum_i \times \sum_j \times M_{i,j}$$

Por fim, é calculada a nota final “ R ” para cada rota tecnológica, através da média aritmética das notas da Avaliação Ambiental (R_{am}) e da Avaliação de Saúde e Segurança (R_{ss}). Optou-se pelo cálculo da média aritmética a fim de proporcionar o mesmo peso para a Avaliação Ambiental e a Avaliação de Saúde e Segurança.

$$R = (R_{am} + R_{ss}) \div 2$$

As etapas do ciclo de vida que definem os processos industriais são:

1. Provisionamento de Recursos: avaliação dos impactos ambientais causados na produção dos materiais que fazem parte dos equipamentos e instrumentos que serão usados na construção do sistema.
2. Implementação do Processo: avaliação dos impactos ambientais causados pelas atividades executadas para implementar/construir o sistema.
3. Operações Principais do Processo: avaliação dos impactos ambientais causados pelas principais atividades do processo, analisando matérias-primas, insumos, emissões, resíduos e utilidades (água, energia, ar).

4. Operações Secundárias (Manutenções Preventivas): avaliação dos impactos ambientais causados pelas atividades de suporte ao processo (etapas de limpeza, preparação de materiais). No caso específico deste Método de Seleção, tal etapa do ciclo de vida foi alterada para “Manutenções Preventivas”, caracterizada pela avaliação dos impactos ambientais causados pelas atividades de manutenção preventiva no sistema.
5. Finalização / Destinação Final: avaliação dos impactos ambientais causados pela destinação final dos materiais usados no sistema, analisando sua destinação final (reciclagem, reutilização, disposição, destruição).

Para a Avaliação Ambiental, as colunas da Matriz de Abordagem de Avaliação são formadas pelos seguintes critérios, obtidos de Graedel & Howard-Grenville (2005):

1. Ecologia / Materiais – tipo e toxicidade dos materiais utilizados em cada etapa do ciclo de vida;
2. Uso de Energia – quantidade de energia elétrica utilizada em cada etapa do ciclo de vida;
3. Resíduos Sólidos – quantidade e toxicidade de resíduos sólidos gerados em cada etapa do ciclo de vida;
4. Efluentes Líquidos – quantidade e toxicidade dos efluentes líquidos gerados em cada etapa do ciclo de vida;
5. Emissões Gasosas – quantidade e qualidade das emissões gasosas geradas em cada etapa do ciclo de vida.

Para a Avaliação de Saúde e Segurança, as colunas da Matriz de Abordagem de Avaliação são formadas pelos seguintes critérios, obtidos de Graedel & Howard-Grenville (2005):

1. Riscos Físicos – probabilidade de ocorrer quedas, escoriações, choques físicos e/ou acidentes dos Operadores com os elementos do sistema;
2. Riscos Químicos / Biológicos – probabilidade dos Operadores terem contato com materiais tóxicos, (potencialmente) carcinogênicos, irritantes;

3. Riscos Elétricos – probabilidade dos Operadores sofrerem choques elétricos, descargas, arcos elétricos;
4. Riscos Ergonômicos – probabilidade dos Operadores serem submetidos a tarefas repetitivas, esforços em demasia, posição desajeitada;
5. Riscos de Ruído – probabilidade dos sistemas emitirem ruído acima dos limites legais (NR-15) para os Operadores.

As **Tabelas 2 e 3** apresentam as matrizes utilizadas para a Avaliação Ambiental e a Avaliação de Saúde e Segurança, respectivamente.

Tabela 2: Matriz de Abordagem de Avaliação – Avaliação Ambiental

Avaliação Ambiental		Ecologia / Materiais	Uso de Energia	Resíduos Sólidos	Efluentes Líquidos	Emissões Gasosas
Etapa do Ciclo de Vida		1	2	3	4	5
1	Provisionamento de Recursos	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
2	Implementação do Processo	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
3	Operações Principais do Processo	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
4	Manutenções Preventivas	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
5	Finalização, Destinação Final	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5

Fonte: Graedel, Howard-Grenville (2005).

Tabela 3: Matriz de Abordagem de Avaliação – Avaliação de Saúde e Segurança

Avaliação de Saúde e Segurança		Riscos Físicos	Riscos Químicos / Biológicos	Riscos Elétricos	Riscos Ergonômicos	Riscos de Ruído
Etapa do Ciclo de Vida		1	2	3	4	5
1	Provisionamento de Recursos	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
2	Implementação do Processo	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5
3	Operações Principais do Processo	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5
4	Manutenções Preventivas	4,1	4,2	4,3	4,4	4,5
5	Finalização, Destinação Final	5,1	5,2	5,3	5,4	5,5

Fonte: Graedel, Howard-Grenville (2005).

A atribuição do conceito para cada elemento das matrizes é feita seguindo-se um roteiro de perguntas pré-estabelecidas. A primeira questão refere-se a uma Condição Negativa, a qual, sendo obedecida, remete ao conceito “zero”. A segunda questão refere-se a uma Condição Positiva, a qual, sendo obedecida, remete ao conceito “quatro”. Caso nenhuma destas duas primeiras condições seja obedecida, deve-se seguir com o roteiro e responder mais três perguntas. Cada resposta SIM é somada, podendo-se chegar aos conceitos “três”, “dois”, “um” ou “zero”.

Este roteiro foi adaptado de Graedel, Howard-Grenville (2005) com o objetivo de equalizar o número de perguntas (5 no máximo) para cada elemento da matriz. Os referidos autores propuseram um roteiro no qual o número de perguntas varia dependendo do elemento da matriz. Desta forma, a equalização do número de perguntas (adaptação sugerida aqui) diminui a subjetividade dos conceitos de cada elemento da matriz.

A **Figura 11** a seguir apresenta o roteiro proposto para a Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança.

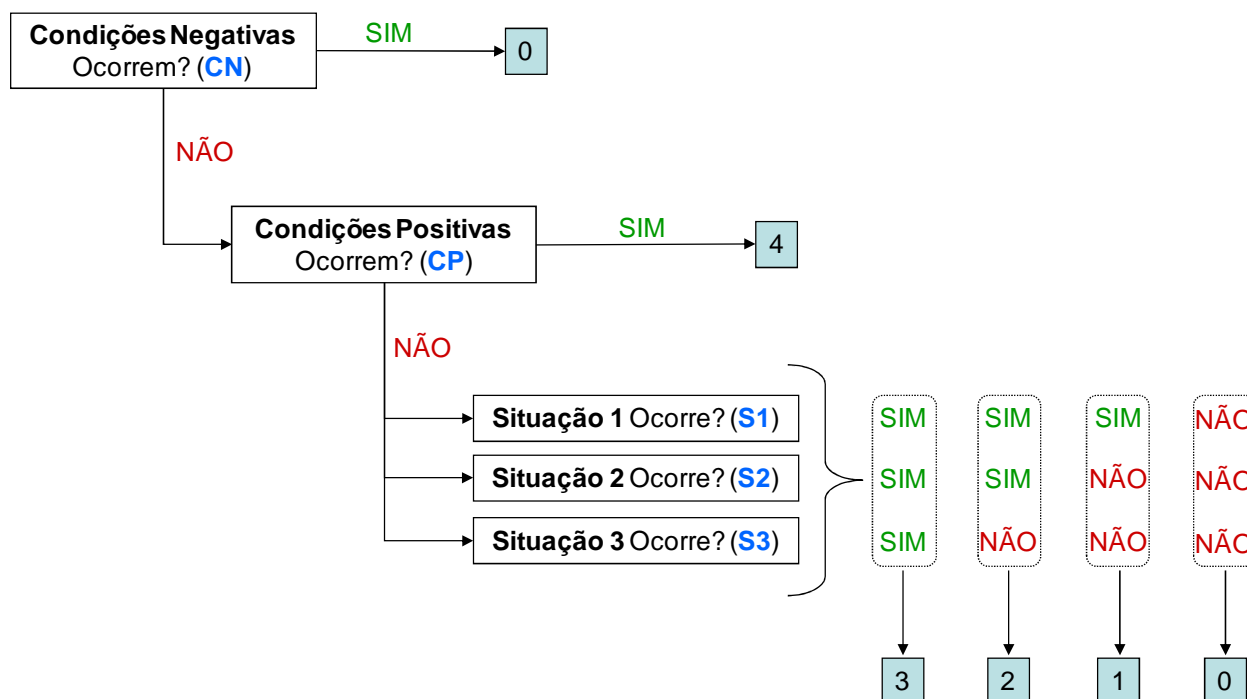


Figura 11: Roteiro para Determinação Conceitos Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança
Fonte: Elaborado pelo Autor.

- Condições Negativas (CN) remetem a perguntas de confirmação de grande impacto ambiental e/ou de saúde e segurança. Sendo “sim” a resposta a esta pergunta, o processo recebe conceito “zero” no elemento da matriz em análise;
- Condições Positivas (CP) remetem a perguntas de confirmação de mínimo impacto ambiental e/ou de saúde e segurança. Sendo “sim” a resposta a esta pergunta, o processo recebe conceito “quatro” (valor máximo) no elemento da matriz em análise;
- Situações 1, 2 e 3 (S1, S2 e S3): remetem a perguntas mais específicas sobre o impacto ambiental e/ou de saúde e segurança, objetivando graduar qual é este impacto. A cada resposta “sim”, o processo soma “um ponto”, podendo variar, portanto, sua nota de “zero” a “três”.

Os **Apêndices 1 e 2** apresentam as diretrizes e os procedimentos para a determinação dos conceitos de cada uma das 25 células (elementos das matrizes) das **Tabelas 2 e 3** respectivamente.

Através da aplicação desta terceira etapa do Método de Seleção, o avaliador (tomador de decisão) pode comparar as rotas tecnológicas no que tange aos aspectos de meio ambiente, saúde e segurança, sendo que quanto melhor a rota tecnológica for nestes aspectos, maior será sua “nota” final na Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança.

8 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Para avaliar o método de seleção de rotas tecnológicas, foram feitas simulações de quatro cenários de efluente contaminado por metais pesados.

Estes quatro cenários foram definidos variando-se a os dois principais parâmetros de processo no caso de sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados: concentração de metais no efluente e vazão do efluente de entrada. Foram escolhidos quatro cenários hipotéticos, variando-se a vazão (alta e baixa) e a concentração de metais (alta e baixa).

O *range* de vazão foi determinado a partir das referências bibliográficas consultadas, tendo sido escolhidos o valor de 1.000 L/h como baixo (vazão média do efluente em sistema remediação de água subterrânea contaminado por metais pesados) e o valor de 5.000 L/h como alto (vazão do efluente em indústrias de galvanoplastia de médio porte).

O *range* de concentração de metais foi determinado a partir das referências bibliográficas consultadas, tendo sido escolhidos o valor de 10 mg/L como baixo (concentração média de metais na água subterrânea em locais contaminados por metais pesados) e o valor de 100 mg/L como alto (concentração média de metais no efluente em indústrias de galvanoplastia de médio porte).

Os metais pesados definidos para os cenários hipotéticos avaliados foram os mais comumente encontrados em água subterrânea e efluentes de indústrias de galvanoplastia. Tomou-se o cuidado também de não haver metais nos cenários hipotéticos que inviabilizassem tecnicamente alguma rota tecnológica, a fim de permitir um estudo completo de todas.

A **Tabela 4** a seguir apresenta os cenários hipotéticos simulados.

Tabela 4: Cenários Hipotéticos – simulações para teste do método de seleção

Cenário	Vazão de Efluente	Concentração de Metais no Efluente	Metais existentes no Efluente
I	5.000 L/h (alta vazão)	100 mg/L (alta concentração)	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ³⁺
II	1.000 L/h (baixa vazão)	100 mg/L (alta concentração)	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ³⁺
III	5.000 L/h (alta vazão)	10 mg/L (baixa concentração)	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ³⁺
IV	1.000 L/h (baixa vazão)	10 mg/L (baixa concentração)	Ni ²⁺ , Zn ²⁺ , Cu ²⁺ , Cr ³⁺

Fonte: Elaborado pelo Autor.

8.1 Avaliação Técnica Preliminar – Cenários Hipotéticos

Nesta primeira etapa do método de seleção, são avaliados potenciais problemas de determinada rota tecnológica para as aplicações pretendidas, tendo-se em vista as limitações das mesmas, que impedem sua aplicação, e suas restrições, que limitam o seu escopo de aplicação.

Uma análise técnica revela que há restrições específicas para os diferentes métodos. Na rota por adsorção de zeólitas há restrições quanto à saturação das zeólitas em função de alta concentração e/ou alta vazão. Na rota por adsorção por biossorventes, há restrições quanto à saturação da biomassa em função de alta concentração e/ou alta vazão. Na rota de precipitação química, não há limitações, pois o efluente não possui íons de cianeto (CN⁻) nem de cromo hexavalente (Cr⁶⁺), conhecidos limitantes desta técnica. Para a rota de osmose reversa, não há restrições, pois o efluente não apresenta compostos que atacam as membranas. Para a rota de flotação iônica, não há restrições, pois o efluente possui metais conhecidos como passíveis de serem coletados em forma de espuma pelos coletores das colunas de flotação.

A despeito das limitações técnicas existentes, as demais etapas do Método de Seleção foram aplicadas a todas as rotas tecnológicas, a fim de gerar dados que

permitissem uma melhor análise comparativa entre elas, nos aspectos econômicos, ambientais e de saúde e segurança.

Para a continuação da aplicação do Método de Seleção, foi considerada uma eficiência de remoção de metais no efluente de **99,9%** para as cinco rotas tecnológicas avaliadas. Esta eficiência é difícil de ser obtida em termos práticos; porém, para fins comparativos entre as rotas tecnológicas, optou-se por usar uma eficiência máxima a todos os processos.

As condições de contorno do processo aplicáveis às análises subsequentes do Método de Seleção são:

- Vazão do efluente de entrada: de 1.000 a 5.000 L/h;
- Concentração de metais no efluente: de 10 a 100 mg/L;
- Metais presentes no efluente: Ni²⁺, Zn²⁺, Cu²⁺, Cr³⁺.

O método de seleção proposto e todas as suas etapas aplicam-se às condições de contorno estabelecidas acima. Isto não exclui a aplicabilidade do referido método para situações fora deste contorno.

8.2 Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos

Após a Avaliação Técnica Preliminar, foi realizada a segunda etapa do Método de Seleção, caracterizada pela Avaliação Econômica das rotas tecnológicas para os quatro cenários hipotéticos avaliados.

8.2.1 Balanço de Massa e Balanço de Energia

Foram feitos cálculos de Balanço de Massa para cada rota tecnológica nos quatro cenários hipotéticos apresentados. Os **Apêndice 3** e **4** apresentam os detalhes destes cálculos e as **Tabelas 5 a 8** a seguir resumem os principais resultados.

Tabela 5: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético I

Cenário	Correntes	Adsorção por Zeólitas	Adsorção por Biossorventes	Precipitação Química	Osmose Reversa	Flotação Iônica
I	Entradas	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente
		234,8 kg/h água (tipo industrial)	157,8 kg/h água (tipo industrial)	1824,4 kg/h água (tipo industrial)	157,8 kg/h água (tipo industrial)	1824,4 kg/h água (tipo industrial)
		0,26 kg/h cal virgem puro	0,26 kg/h cal virgem puro	3,0 kg/h cal virgem puro	0,26 kg/h cal virgem puro	3,0 kg/h cal virgem puro
		15,63 kg/h zeólita natural	3,4 kg/h biossorvente	1,07 kg/h solução 40% cloreto férrico	-	0,38 kg/h solução 40% cloreto férrico
		6,33 kg/h cloreto potássio puro	-	0,76 kg/h solução 1% polieletrólito	-	0,50 kg/h solução 1% polieletrólito
		-	-	0,05 kg/h solução 1M ácido sulfúrico	-	0,05 kg/h solução 1M ácido sulfúrico
		-	-	-	-	0,50 kg/h solução 1% xantato
	Saídas	5157,9 kg/h água tratada	5157,3 kg/h água tratada	6801,0 kg/h água tratada	4298,4 kg/h água tratada	6824,0 kg/h água tratada
		0,76 kg/h metais+cal	0,8 kg/h metais+cal	28,3 kg/h lodo (torta filtro-prensa)-	859,7 kg/h licor (metais+água)-	4,9 kg/h espuma (metais+insumos)
		15,63 kg/h zeólita natural saturada	3,4 kg/h biossorvente saturado	-	-	-
		83,3 kg/h solução dessorção saturada	-	-	-	-

Cenário I: entrada com 5000 L/h vazão e 100 mg/L metais totais dissolvidos – ALTA VAZÃO e ALTA CONCENTRAÇÃO.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 6: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético II

Cenário	Correntes	Adsorção por Zeólitas	Adsorção por Biossorventes	Precipitação Química	Osmose Reversa	Flotação Iônica
II	Entradas	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente
		47,0 kg/h água (tipo industrial)	31,5 kg/h água (tipo industrial)	364,9 kg/h água (tipo industrial)	31,5 kg/h água (tipo industrial)	364,9 kg/h água (tipo industrial)
		0,1 kg/h cal virgem puro	0,1 kg/h cal virgem puro	0,6 kg/h cal virgem puro	0,1 kg/h cal virgem puro	0,6 kg/h cal virgem puro
		3,13 kg/h zeólita natural	0,7 kg/h biossorvente	0,22 kg/h solução 40% cloreto férrico	-	0,08 kg/h solução 40% cloreto férrico
		1,27 kg/h cloreto potássio puro	-	0,15 kg/h solução 1% polieletrólito	-	0,10 kg/h solução 1% polieletrólito
		-	-	0,01 kg/h solução 1M ácido sulfúrico	-	0,01 kg/h solução 1M ácido sulfúrico
		-	-	-	-	0,10 kg/h solução 1% xantato
	Saídas	1031,6 kg/h água tratada	1031,5 kg/h água tratada	1360,3 kg/h água tratada	859,7 kg/h água tratada	1364,8 kg/h água tratada
		0,2 kg/h metais+cal	0,2 kg/h metais+cal	5,7 kg/h lodo (torta filtro-prensa)-	171,9 kg/h licor (metais+água)-	1,0 kg/h espuma (metais+insumos)
		3,13 kg/h zeólita natural saturada	0,7 kg/h biossorvente saturado	-	-	-
		16,7 kg/h solução dessorção saturada	-	-	-	-

Cenário II: entrada com 1000 L/h vazão e 100 mg/L metais totais dissolvidos – BAIXA VAZÃO e ALTA CONCENTRAÇÃO.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 7: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético III

Cenário	Correntes	Adsorção por Zeólitas	Adsorção por Biossorventes	Precipitação Química	Osmose Reversa	Flotação Iônica
III	Entradas	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente	5000,0 kg/h efluente
		23,4 kg/h água (tipo industrial)	15,7 kg/h água (tipo industrial)	182,4 kg/h água (tipo industrial)	15,7 kg/h água (tipo industrial)	182,4 kg/h água (tipo industrial)
		0,03 kg/h cal virgem puro	0,03 kg/h cal virgem puro	0,3 kg/h cal virgem puro	0,03 kg/h cal virgem puro	0,3 kg/h cal virgem puro
		1,56 kg/h zeólita natural	0,34 kg/h biossorvente	1,04 kg/h solução 40% cloreto férrico	-	0,38 kg/h solução 40% cloreto férrico
		0,63 kg/h cloreto potássio puro	-	0,57 kg/h solução 1% polieletrólito	-	0,50 kg/h solução 1% polieletrólito
		-	-	0,05 kg/h solução 1M ácido sulfúrico	-	0,05 kg/h solução 1M ácido sulfúrico
		-	-	-	-	0,50 kg/h solução 1% xantato
		5015,2 kg/h água tratada	5015,2 kg/h água tratada	5162,9 kg/h água tratada	4179,9 kg/h água tratada	5182,0 kg/h água tratada
		0,53 kg/h metais+cal	0,5 kg/h metais+cal	21,5 kg/h lodo (torta filtro-prensa)-	836,0 kg/h licor (metais+água)-	2,2 kg/h espuma (metais+insumos)
		Saídas	1,56 kg/h zeólita natural saturada	0,34 kg/h biossorvente saturado	-	-
8,3 kg/h solução dessorção saturada	-		-	-	-	

Cenário III: entrada com 5000 L/h vazão e 10 mg/L metais totais dissolvidos – ALTA VAZÃO e BAIXA CONCENTRAÇÃO.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 8: Resultados dos Balanços de Massa e Energia – Cenário Hipotético IV

Cenário	Correntes	Adsorção por Zeólitas	Adsorção por Biossorventes	Precipitação Química	Osmose Reversa	Flotação Iônica
IV	Entradas	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente	1000,0 kg/h efluente
		7,00 kg/h água (tipo industrial)	3,15 kg/h água (tipo industrial)	53,1 kg/h água (tipo industrial)	3,15 kg/h água (tipo industrial)	53,1 kg/h água (tipo industrial)
		0,01 kg/h cal virgem puro	0,01 kg/h cal virgem puro	0,09 kg/h cal virgem puro	0,01 kg/h cal virgem puro	0,09 kg/h cal virgem puro
		0,31 kg/h zeólita natural	0,07 kg/h biossorvente	0,21 kg/h solução 40% cloreto férrico	-	0,08 kg/h solução 40% cloreto férrico
		0,32 kg/h cloreto potássio puro	-	0,12 kg/h solução 1% polieletrólito	-	0,10 kg/h solução 1% polieletrólito
		-	-	0,01 kg/h solução 1M ácido sulfúrico	-	0,01 kg/h solução 1M ácido sulfúrico
		-	-	-	-	0,10 kg/h solução 1% xantato
	Saídas	1003,1 kg/h água tratada	1003,0 kg/h água tratada	1049,2 kg/h água tratada	836,0 kg/h água tratada	1053,1 kg/h água tratada
		0,11 kg/h metais+cal	0,1 kg/h metais+cal	4,4 kg/h lodo (torta filtro-prensa)-	167,2 kg/h licor (metais+água)-	0,5 kg/h espuma (metais+insumos)
		0,31 kg/h zeólita natural saturada	0,07 kg/h biossorvente saturado	-	-	-
		4,2 kg/h solução dessorção saturada	-	-	-	-
		-	-	-	-	-
		-	-	-	-	-

Cenário IV: entrada com 1000 L/h vazão e 10 mg/L metais totais dissolvidos – BAIXA VAZÃO e BAIXA CONCENTRAÇÃO.

Fonte: Elaborado pelo Autor.

8.2.2 Dimensionamento e Custo dos Equipamentos

A partir dos balanços de massa e de energia, foram dimensionados os principais equipamentos para cada rota tecnológica em cada cenário hipotético avaliado.

O **Apêndice 5** apresenta as dimensões e os custos dos principais equipamentos para cada rota tecnológica em cada cenário hipotético avaliado. Para os equipamentos mais específicos, foram consultados fornecedores especializados no mercado do Estado de São Paulo, durante o 1º semestre de 2012; estes equipamentos estão com notação “custo obtido de cotações específicas” nas planilhas. Para os demais equipamentos, o custo foi estimado em função de análises de alguns projetos em operação no Estado de São Paulo entre os anos de 2011 e 2012; estes equipamentos estão com notação “custo estimado de projetos reais” nas planilhas. Todas as hipóteses e simplificações utilizadas no dimensionamento dos equipamentos também são apresentadas no **Apêndice 5**.

8.2.3 Custos de Operação

Com os custos dos equipamentos definidos, o Custo de Instalação é calculado através dos percentuais definidos no **item 6.1.1**. Para se determinar o Custo de Operação, é necessário determinar outras variáveis, as quais são apresentadas na seqüência.

Custo de Operação Fixo – Operadores:

Com base em projetos de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados em funcionamento no Estado de São Paulo, foram determinados os esforços operacionais (mão-de-obra) para cada rota tecnológica avaliada. O preço médio da hora trabalhada foi definido como R\$ 60,00 (sessenta reais), através de pesquisas em empresas de projeto/consultoria ambiental no Estado de São Paulo em 2011. Os quatro cenários hipotéticos avaliados tiveram as seguintes estimativas de custo com mão-de-obra operacional:

- Rota Tecnológica A - Adsorção por Zeólitas: demanda operacional para regeneração/avaliação das zeólitas, regulagem e monitoramento do sistema.
 - Cenários I, II e III: estimativa de 1 operador atuando no sistema 3 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita;

- Cenário IV: estimativa de 1 operador atuando no sistema 1 vez por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita.
- Rota Tecnológica B - Adsorção por Biossorventes: demanda operacional para regeneração/avaliação do biossorvente, regulagem e monitoramento do sistema.
 - Cenários I, II e III: estimativa de 1 operador atuando no sistema 3 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita;
 - Cenário IV: estimativa de 1 operador atuando no sistema 1 vez por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita.
- Rota Tecnológica C – Precipitação Química: demanda operacional para operação filtro-prensa, ajuste dosagem insumos, regulagem e monitoramento do sistema.
 - Cenário I e III: estimativa de 2 operadores atuando no sistema 3 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita;
 - Cenários II e IV: estimativa de 2 operadores atuando no sistema 2 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita.
- Rota Tecnológica D – Osmose Reversa: demanda operacional para destinação e controle percolado, verificação integridade membrana, regulagem e monitoramento do sistema.
 - Cenário I e III: estimativa de 1 operador atuando no sistema 3 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita;
 - Cenário II e IV: estimativa de 1 operador atuando no sistema 2 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita.
- Rota Tecnológica E – Flotação Lônica: demanda operacional para controle da formação bolhas de ar, dosagem de insumos, regulagem e monitoramento do sistema.
 - Cenários I e III: estimativa de 2 operadores atuando no sistema 3 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita;

- o Cenários II e IV: estimativa de 2 operadores atuando no sistema 2 vezes por semana, gastando 8 horas/dia em cada visita.

Custo de Operação Fixo – Laboratório:

Para se avaliar a eficiência do sistema de tratamento em cada projeto, é necessário realizar mensalmente análise química do efluente na entrada e na saída do sistema. Em cada um dos dois pontos, os principais metais presentes no efluente devem ser quantificados. Com base em laboratórios credenciados pelo INMETRO estabelecidos no Estado de São Paulo, foram determinados os custos destas análises químicas. Para cada ponto coletado, considerando análise de 5 metais, o valor da análise química foi estimado em R\$ 300,00. Desta forma, o custo anual de Laboratório foi definido como R\$ 300,00 multiplicados por 2 pontos/mês multiplicados por 12 meses/ano, totalizando R\$ 7.200,00/ano independentemente da rota tecnológica aplicada ou do cenário hipotético.

Custo de Operação Variáveis – Insumos:

Com base em pesquisas de mercado em fornecedores do município de São Paulo no 2º semestre de 2011, foram determinados os custos de cada insumo necessário para a operação do sistema de tratamento. A quantidade de cada insumo foi previamente determinada pelos balanços de massa apresentados nas **Tabelas 5 a 8**. Os custos estimados para cada insumo são apresentados a seguir.

- Cal Virgem: R\$ 0,25 por quilograma;
- Solução Ácido Sulfúrico 1,0 mol/L: R\$ 10,00 por quilograma;
- Zeólita tipo *Watercel ZZ*: R\$ 4,00 por quilograma – zeólita utilizada para remoção de metais em efluentes, aplicável para os metais: cobre, chumbo, níquel, cádmio, zinco, cromo, estanho, cobalto, prata e mercúrio; composição de 75% watercel-ZZ 0410 e 25% watercel-ZZ 3080;
- Biossorvente: R\$ 25,00 por quilograma;
- Cloreto de Potássio puro: R\$ 0,90 por quilograma;
- Solução 40% cloreto férrico: R\$ 1,50 por quilograma;
- Solução 1% polieletrólito: R\$ 1,00 por quilograma;

- Solução 1% xantato: R\$ 5,00 por quilograma.

Custo de Operação Variáveis – Utilidades:

Com base em pesquisas de mercado em indústrias de galvanoplastia e metalúrgicas do município de São Paulo no 2º semestre de 2011, foram determinados os custos médio de cada utilidade necessária para a operação do sistema de tratamento. A quantidade de cada utilidade foi previamente determinada pelos balanços de energia, estando apresentadas nas **Tabelas 5 a 8**. Os custos estimados para cada utilidade são apresentados a seguir. Estes custos variam em função de acordos individuais feitos por cada consumidor (indústria), porém, servem como base para os propósitos deste trabalho.

- Água (industrial / reuso): R\$ 16,50 por m³;
- Energia Elétrica: R\$ 0,17 por KWh.

Custo de Operação Variáveis – Resíduo:

A quantidade e as características de cada resíduo foram previamente determinadas pelos balanços de massa, estando apresentadas nas **Tabelas 5 a 8**. Os custos estimados para destinação dos resíduos foram obtidos através pesquisas de mercado em empresas especializadas em destinação final de resíduos na região sudeste do Brasil:

- Resíduos Sólidos e/ou Pastosos contendo metais: R\$ 400,00 por tonelada. Este custo foi obtido considerando-se destinação tipo aterro industrial para resíduos classe I;
- Resíduos Líquidos – Solução Dessorção Zeólitas: R\$ 500,00 por m³. Este custo foi obtido considerando-se envio para Estações de Tratamento de Efluente visando formação de blend líquido;
- Resíduos Líquidos – Licor da Osmose Reversa: R\$ 120,00 por m³. Este custo foi obtido considerando-se envio para Estações de Tratamento de Efluente com leitos de secagem.

8.2.4 Estimativa do Custo Total

Após as estimativas de custo apresentadas nos capítulos anteriores (**itens 8.2.1 a 8.2.3**) pôde-se determinar o Custo Total para cada cenário hipotético e cada rota tecnológica. O **Apêndice 6** apresenta os cálculos detalhados utilizados na Avaliação

Econômica. A **Tabela 9** apresenta os resultados finais da Avaliação Econômica dos quatro cenários hipotéticos, considerando um tempo total de operação de 6 anos (tempo médio de duração de sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados).

A **Figura 12** a seguir apresenta os custos médios de instalação e de operação anual para as cinco rotas tecnológicas avaliadas, considerando os resultados das simulações para os quatro cenários hipotéticos.

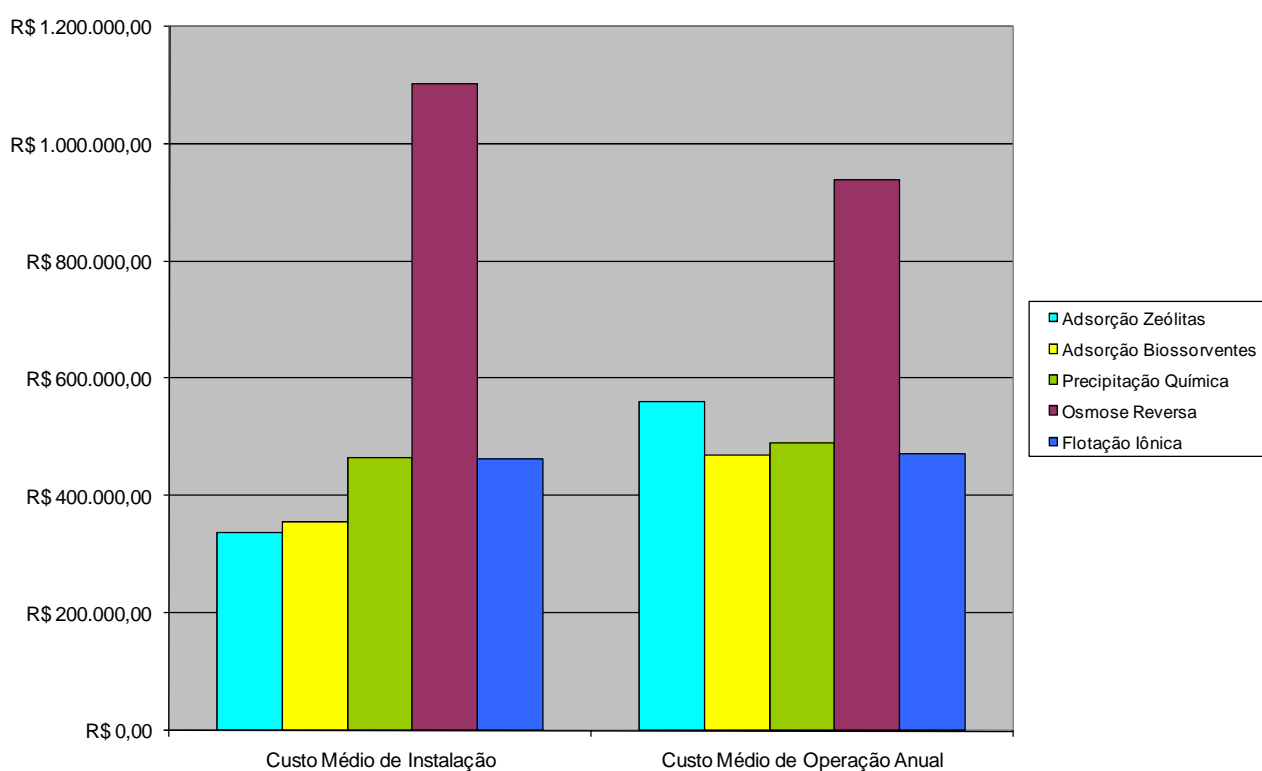


Figura 12: Custos Médios de Instalação e de Operação Anual

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 9: Resultados da Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos

Cenários	Item	Adsorção por Zeólitas	Adsorção por Biossorventes	Precipitação Química	Osmose Reversa	Flotação Iônica
Cenário I	Custo Instalação	R\$ 598.603,50	R\$ 539.748,00	R\$ 662.842,13	R\$ 1.755.975,38	R\$ 639.425,53
	Custo Operação Anual	R\$ 1.377.082,61	R\$ 1.080.682,66	R\$ 824.976,57	R\$ 1.512.818,55	R\$ 766.558,74
	Custo Total (6 anos)	R\$ 8.861.099,13	R\$ 7.023.843,98	R\$ 5.612.701,53	R\$ 10.832.886,69	R\$ 5.238.777,98
Cenário II	Custo Instalação	R\$ 254.980,69	R\$ 207.322,09	R\$ 274.718,81	R\$ 706.624,88	R\$ 382.488,98
	Custo Operação Anual	R\$ 415.080,56	R\$ 351.984,46	R\$ 326.030,96	R\$ 454.299,67	R\$ 357.591,80
	Custo Total (6 anos)	R\$ 2.745.464,06	R\$ 2.319.228,82	R\$ 2.230.904,56	R\$ 3.432.422,91	R\$ 2.528.039,75
Cenário III	Custo Instalação	R\$ 318.322,13	R\$ 479.457,00	R\$ 650.640,38	R\$ 1.383.822,00	R\$ 518.215,50
	Custo Operação Anual	R\$ 318.753,40	R\$ 328.766,45	R\$ 539.591,10	R\$ 1.379.307,51	R\$ 473.446,72
	Custo Total (6 anos)	R\$ 2.230.842,54	R\$ 2.452.055,73	R\$ 3.888.186,99	R\$ 9.659.667,06	R\$ 3.358.895,82
Cenário IV	Custo Instalação	R\$ 180.334,69	R\$ 191.531,59	R\$ 270.412,31	R\$ 558.050,63	R\$ 309.256,94
	Custo Operação Anual	R\$ 133.381,63	R\$ 117.463,13	R\$ 271.353,81	R\$ 410.565,44	R\$ 290.481,71
	Custo Total (6 anos)	R\$ 980.624,49	R\$ 896.310,37	R\$ 1.898.535,19	R\$ 3.021.443,27	R\$ 2.052.147,18

Fonte: Elaborado pelo Autor.

8.3 Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança – Cenários Hipotéticos

Após a Avaliação Econômica, foi realizada a terceira etapa do Método de Seleção, caracterizada pela Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança das rotas tecnológicas para os quatro cenários hipotéticos avaliados. Para os propósitos deste trabalho, todas as rotas tecnológicas previamente estudadas foram consideradas nesta terceira etapa do Método de Seleção.

8.3.1 Matrizes da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança

Dentro de cada um dos quatro cenários hipotéticos, as rotas tecnológicas foram avaliadas segundo a metodologia estabelecida no **Capítulo 7.1**, utilizando os critérios apresentados nos **Apêndices 1 e 2**. Avaliando-se as características que distinguem os quatro cenários hipotéticos, vazão do efluente e concentração de metais no efluente, conclui-se que elas não afetam os resultados da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança, de acordo com os critérios estabelecidos. Portanto, cada rota tecnológica foi avaliada somente uma vez, não sendo feitas simulações para cada cenário hipotético.

O **Apêndice 7** apresenta as matrizes-base resultantes da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança para cada rota tecnológica em cada cenário hipotético considerado, para cada etapa do ciclo de vida dos processos.

8.3.2 Resultados da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança

A partir dos conceitos atribuídos a cada rota tecnológica nas matrizes-base, foram somados os conceitos de cada rota tecnológica em cada critério, a fim de gerar dados que permitissem a comparação entre os métodos. As **Tabelas 10 e 11** a seguir apresentam os conceitos atribuídos " M_{ij} " de cada rota tecnológica, nas Avaliações Ambiental e de Saúde e Segurança, respectivamente.

Tabela 10: Conceitos Atribuídos da Avaliação Ambiental – rotas tecnológicas

Rota Tecnológica versus Resultados	Ecologia / Materiais	Uso de Energia	Resíduos Sólidos	Efluentes Líquidos	Emissões Gasosas
Adsorção por Zeólitas	11	12	7	11	15
Adsorção por Biossorventes	11	12	7	11	15
Precipitação Química	10	12	6	9	15
Osmose Reversa	10	11	10	9	15
Flotação Iônica	10	12	8	9	15

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 11: Conceitos Atribuídos da Avaliação de Saúde e Segurança – rotas tecnológicas

Rota Tecnológica versus Resultados	Riscos Físicos	Riscos Químicos/ Biológicos	Riscos Elétricos	Riscos Ergonômicos	Riscos de Ruído
Adsorção por Zeólitas	13	11	17	9	15
Adsorção por Biossorventes	13	15	17	10	15
Precipitação Química	10	7	17	6	15
Osmose Reversa	13	11	17	8	15
Flotação Iônica	12	9	17	8	15

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com a metodologia proposta para a Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança, foram calculados os conceitos atribuídos “ M_{ij} ”, chegando-se à nota “R” para cada rota tecnológica. Optou-se por usar a média aritmética de “ R_{am} ” e “ R_{ss} ” para cálculo da nota final “R” a fim de dar o mesmo peso para as análises ambiental e de saúde e segurança.

A **Tabela 12** apresenta as notas “ R_{am} , R_{ss} e R ” para as cinco rotas tecnológicas após a Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança.

Tabela 12: Notas de cada Rota Tecnológica na Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança

Rota Tecnológica	Nota da Avaliação Ambiental (R_{am})	Nota da Avaliação de Saúde e Segurança (R_{ss})	Nota Final (R)
Método A: Adsorção por Zeólitas	56,0%	65,0%	60,5%
Método B: Adsorção por Biossorventes	56,0%	70,0%	63,0%
Método C: Precipitação Química	52,0%	55,0%	53,5%
Método D: Osmose Reversa	55,0%	64,0%	59,5%
Método E: Flotação Iônica	54,0%	61,0%	57,5%

Fonte: Elaborado pelo Autor.

8.4 Discussões do Método de Seleção

O Método de Seleção proposto tem como primeira etapa uma Avaliação Técnica Preliminar das rotas tecnológicas passíveis de utilização para determinado projeto. Em muitos casos reais, esta avaliação técnica preliminar é a única etapa realizada para se escolher qual rota tecnológica será usada em determinado projeto. Como foi demonstrado ao longo do **Capítulo 5**, a etapa de avaliação técnica é fundamental, porém, não única para uma análise global da situação.

A segunda etapa do Método de Seleção caracteriza-se pela Avaliação Econômica das rotas tecnológicas que passaram pela primeira etapa do Método de Seleção. Em outros casos reais, uma avaliação econômica simplificada é a única etapa realizada para se escolher qual rota tecnológica será utilizada em determinado projeto. Situações como esta ocorrem geralmente quando a verba disponível é restrita. Como foi demonstrado ao longo do **Capítulo 6**, a etapa de avaliação econômica é a mais trabalhosa, tendo como exigência um conhecimento técnico de cada rota tecnológica, bem como necessitando de

profissionais capazes de realizar balanços de massa e energia e com conhecimento técnico suficiente para conhecer as limitações de cada rota tecnológica.

A terceira etapa do Método de Seleção caracteriza-se pela Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança das rotas tecnológicas que passaram pela segunda etapa do Método de Seleção

Uma avaliação ambiental, de saúde e segurança raramente é feita nos casos reais, mas o avanço no controle ambiental pelos órgãos públicos associado à melhoria das práticas de saúde e segurança apontam que num futuro próximo estes critérios tenham maior peso em decisões a respeito de grandes projetos. Além de possibilitar uma avaliação ambiental, o método proposto é útil quando há preocupação com algum dos critérios avaliados (por exemplo, ruído, destinação final dos produtos). Desta forma, o Método de Seleção fornece subsídios suficientes para a tomada de decisão de qual é a rota tecnológica ótima para determinado projeto.

8.5 Discussões da Avaliação Econômica

Avaliando-se os dados da **Tabela 9**, nota-se que para o cenário I (vazão alta e alta concentração de metais), os custos de instalação das rotas tecnológicas adsorção por zeólitas, adsorção por bioissorventes, precipitação química e flotação iônica tiveram apenas 23% de variação entre si. Já o método de osmose reversa apresentou custo bem superior aos demais, 225% acima do menor valor. Com relação aos custos de operação para o cenário I, os processos de adsorção (por zeólitas e por bioissorventes) e a osmose reversa apresentaram valores bem superiores aos métodos de precipitação e flotação iônica. Considerando-se um horizonte de 6 anos de projeto, as rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para o cenário I seriam, em ordem decrescente de viabilidade, flotação iônica, precipitação química e adsorção por bioissorventes.

Avaliando-se os dados da **Tabela 9**, nota-se que para o cenário II (vazão baixa e alta concentração de metais), os custos de instalação das rotas tecnológicas adsorção por zeólitas, adsorção por bioissorventes e precipitação química tiveram apenas 33% de variação entre si. Já o método de osmose reversa apresentou custo bem superior aos demais (241% acima do menor valor), sendo que o custo da flotação iônica ficou

intermediário. Com relação aos custos de operação para o cenário II, os processos tiveram valores sem muita discrepância, havendo variação máxima de 39%. Considerando-se um horizonte de 6 anos de projeto, as rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para o cenário II seriam, em ordem decrescente de viabilidade, precipitação química, adsorção por bioissorventes e flotação iônica.

Avaliando-se os dados da **Tabela 9**, nota-se que para o cenário III (alta vazão e baixa concentração de metais), os custos de instalação tiveram bastante variação entre si, sendo que a adsorção por zeólitas teve o menor custo e a osmose reversa o maior (variação de 435% entre eles). Com relação aos custos de operação para o cenário III, os processos de adsorção (por zeólitas e por bioissorventes) apresentaram os menores valores, seguidos pelos processos de flotação iônica e precipitação química, respectivamente. A rota tecnológica osmose reversa apresentou custo de operação 433% superior ao menor valor (adsorção por zeólitas). Considerando-se um horizonte de 6 anos de projeto, as rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para o cenário III seriam, em ordem decrescente de viabilidade, adsorção por zeólitas e adsorção por bioissorventes.

Avaliando-se os dados da **Tabela 9**, nota-se que para o cenário IV (baixa vazão e baixa concentração de metais), os custos de instalação das rotas tecnológicas adsorção por zeólitas, adsorção por bioissorventes e precipitação química tiveram apenas 50% de variação entre si. Já o método de osmose reversa apresentou custo bem superior aos demais (209% acima do menor valor), sendo que o custo da flotação iônica ficou intermediário. Com relação aos custos de operação para o cenário IV, os processos de adsorção (por zeólitas e por bioissorventes) apresentaram os menores valores, seguidos pelos processos de precipitação química e flotação iônica, respectivamente. A rota tecnológica osmose reversa apresentou custo de operação 250% superior ao menor valor (adsorção por bioissorventes). Considerando-se um horizonte de 6 anos de projeto, as rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para o cenário IV seriam, em ordem decrescente de viabilidade, adsorção por bioissorventes e adsorção por zeólitas.

Avaliando-se os dados mostrados na **Figura 12** nota-se que a osmose reversa é a rota tecnológica que realmente apresentou os maiores custos médios de instalação e de operação. As rotas tecnológicas flotação iônica e precipitação iônica tiveram custos

médios semelhantes, tanto para instalação (diferença de 0,5%) como para operação (diferença de 3,8%). Já as rotas tecnológicas por adsorção tiveram comportamento interessante: comparativamente, a adsorção por zeólitas apresentou menor custo de instalação (diferença de 4,6%), porém, maior custo de operação (diferença de 19,4%) que a adsorção por bioissorventes. Dado o tempo médio de operação ter sido definido em 6 anos, o processo de adsorção por bioissorventes possui custo médio total inferior ao processo de adsorção por zeólitas.

De forma geral, observa-se que a adsorção por zeólitas apresentou a menor fração custo médio de instalação por custo médio de operação anual (60%), seguida de adsorção por bioissorvente (75%), precipitação química (95%) e flotação iônica (98%). Somente a osmose reversa apresentou um custo médio de instalação maior que o custo médio de operação anual (fração 117%). Isso mostra que os equipamentos que fazem parte do processo osmose reversa possuem realmente um custo significativo.

A **Tabela 13** a seguir apresenta um resumo das rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para cada cenário hipotético avaliado.

Tabela 13: Rotas tecnológicas mais viáveis economicamente para cada cenário hipotético

	<u>Baixa Concentração</u> de Metais no Efluente	<u>Alta Concentração</u> de Metais no Efluente
<u>Baixa Vazão de Efluente</u>	Adsorção por Bioissorventes Adsorção por Zeólitas	Precipitação Química Adsorção por Bioissorventes Flotação Iônica
<u>Alta Vazão de Efluente</u>	Adsorção por Zeólitas Adsorção por Bioissorventes	Flotação Iônica Precipitação Química Adsorção por Bioissorventes

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Através dos resultados da Avaliação Econômica expressados na **Tabela 13**, nota-se que a rota tecnológica osmose reversa apresenta custos de instalação e de operação bem acima das demais, para quaisquer dos cenários avaliados. Este fato é decorrência da complexidade das colunas de osmose reversa, o que ocasiona elevado custo de

instalação. Além disso, o volume de licor destinado no processo de osmose reversa também é elevado se comparado às demais rotas tecnológicas, aumentando o custo de operação.

Os processos de adsorção (por zeólitas e por biossorventes) apresentam vantagens financeiras de instalação e operação se comparados aos demais processos para as situações de baixa concentração de metais no efluente (cenários hipotéticos III e IV). Esta situação é decorrente da menor necessidade de material nas colunas de adsorção (diminuição no custo de instalação), tal como na menor geração de resíduos, i.e., material com metal adsorvido (diminuição no custo de operação).

Para altas concentrações de metais no efluente, as rotas tecnológicas precipitação química e flotação iônica tornam-se mais atraentes. Esta situação acontece por exceção, dado que altas concentrações de metais culminam em maior necessidade de material adsorvente (zeólitas e/ou biossorventes), aumentando os custos das outras rotas tecnológicas.

Nota-se, por fim, que a adsorção por biossorventes é a mais flexível das rotas tecnológicas estudadas, apresentando-se entre as mais viáveis economicamente para praticamente todos os cenários estudados.

8.6 Discussões da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança

Avaliando-se os dados da **Tabela 10**, dentro da Avaliação Ambiental, nota-se que a rota tecnológica precipitação química teve os menores (piores) conceitos finais nos quesitos ecologia/materiais, resíduos sólidos e efluentes líquidos. Estas constatações se justificam porque nesta rota tecnológica é empregada grande quantidade de insumos no tratamento do efluente, que acabam incorporando-se aos resíduos (lodo).

Avaliando-se os dados da **Tabela 11**, dentro da Avaliação de Saúde e Segurança, nota-se que a rota tecnológica precipitação química teve os menores (piores) conceitos finais nos quesitos riscos químicos/biológicos e riscos ergonômicos. Estas constatações se justificam pela grande manipulação de insumos no processo, pelo fluido ser transferido por gravidade em boa parte do processo (susceptibilidade de contato/vazamento) e pela necessidade de operação do filtro-prensa. Além disso, a precipitação química apresentou

conceito final em riscos físicos menores que as demais rotas tecnológicas, dado que a grande quantidade de tanques e elementos no processo contribui para o maior risco de acidentes.

Todas as cinco rotas tecnológicas avaliadas tiveram conceitos finais semelhantes em riscos elétricos e riscos de ruído, dado o consumo de energia e as instalações elétricas serem parecidas nestes processos, bem como não é esperada geração de níveis elevados de ruído nestas rotas tecnológicas.

Avaliando-se os dados da **Tabela 12**, nota-se que, de maneira, geral a rota tecnológica precipitação química apresentou o menor conceito tanto na parte Ambiental como na parte de Saúde e Segurança, tendo um conceito final 53,5%. Já a rota tecnológica adsorção por bioissorventes apresentou o maior conceito global: 63,0%.

A Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança hierarquiza as rotas tecnológicas avaliadas, através da análise de 10 fatores em 5 momentos do ciclo de vida destes processos. Optar pela rota tecnológica precipitação química é escolher um processo que tende a ser mais impactante do ponto de vista ambiental, bem como tende a gerar mais riscos à saúde e à segurança do trabalhador.

8.7 Definição das Rotas Tecnológicas para os Cenários Avaliados

Após a aplicação do Método de Seleção, pôde-se avaliar qual a melhor rota tecnológica para cada um dos quatro cenários hipotéticos avaliados.

Para sistemas de tratamento de efluentes com alta vazão e contaminados com metais pesados em alta concentração (cenário hipotético I), o processo de flotação iônica é o mais viável economicamente, porém, apresenta riscos químicos/biológicos e preocupações ambientais relacionadas a efluentes líquidos maiores que a adsorção por bioissorventes. Assim, se a verba disponível para o projeto permitir, a melhor rota tecnológica para situações semelhantes às do cenário I será a adsorção por bioissorventes; caso contrário, a flotação iônica deverá ser escolhida.

Para sistemas de tratamento de efluentes com baixa vazão e contaminados com metais pesados em alta concentração (cenário hipotético II), o processo de precipitação química é o mais viável economicamente, porém, apresenta riscos químicos/biológicos,

riscos ergonômicos e preocupações ambientais relacionadas a resíduos sólidos e efluentes líquidos maiores que a adsorção por bioissorventes. Assim, se a verba disponível para o projeto permitir, a melhor rota tecnológica para situações semelhantes às do cenário II será a adsorção por bioissorventes.

Para sistemas de tratamento de efluentes com alta vazão e contaminados com metais pesados em baixa concentração (cenário hipotético III), o processo de adsorção por zeólitas é o mais viável economicamente, porém, apresenta riscos químicos/biológicos maiores que a adsorção por bioissorventes. Tendo-se em vista a pouca diferença (10%) nos custos entre estas duas rotas tecnológicas, a melhor rota tecnológica para situações semelhantes às do cenário III será a adsorção por bioissorventes. Entende-se que a rota tecnológica adsorção por zeólitas também apresenta bons resultados para situações semelhantes às do cenário III.

Para sistemas de tratamento de efluentes com baixa vazão e contaminados com metais pesados em baixa concentração (cenário hipotético IV), o processo de adsorção por bioissorventes é o mais viável economicamente e o melhor avaliado nos pontos de vista ambiental, de saúde e segurança. Desta forma, a melhor rota tecnológica para situações semelhantes às do cenário IV será a adsorção por bioissorventes.

Assim, o processo de adsorção por bioissorventes apresentou-se como um dos mais viáveis economicamente para todos os cenários hipotéticos avaliados e teve a maior nota final na avaliação ambiental, de saúde e segurança.

9 CONCLUSÕES

Foi desenvolvido um Método de Seleção de rota tecnológica para sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados. Apesar da farta e consolidada bibliografia a respeito das especificações técnicas de diversas rotas tecnológicas, a literatura não apresentava uma metodologia que levasse em consideração critérios para a tomada de decisão, de forma integrada, fatores econômicos, ambientais, de saúde e segurança.

A primeira etapa do Método de Seleção, avaliação técnica preliminar, possibilita conhecer as particularidades técnicas de cada rota tecnológica, observando-se as suas principais vantagens, desvantagens, limitações e parâmetros de processo. O estudo desenvolvido ao longo do **Capítulo 5** pode ser aproveitado em sistemas de tratamento de efluentes por metais pesados, tomando-se o cuidado de avaliar as particularidades de cada processo (vazão de efluente, concentração de metais, etc.).

A segunda etapa do Método de Seleção, avaliação econômica, resulta na obtenção dos custos de instalação e de operação de cada rota tecnológica. Ela é estritamente necessária para avaliar a viabilidade econômica de cada processo estudado.

A terceira e última etapa do Método de Seleção, avaliação ambiental e de saúde e segurança, permite observar quais rotas tecnológicas são mais críticas em determinados critérios, os quais podem ser decisivos para certo projeto.

Com as três etapas do Método de Seleção finalizadas, tem-se uma visão global e detalhada das particularidades de cada rota tecnológica estudada. Desta forma, o avaliador (responsável pelo projeto) recebe informações valiosas que possibilitam uma tomada de decisão embasada e justificada.

O Método de Seleção foi demonstrado pela sua aplicação para quatro cenários hipotéticos e cinco rotas tecnológicas. A rota tecnológica de osmose reversa foi a que apresentou maior custo médio de instalação e maior custo médio de operação, sendo a menos viável economicamente. Nos aspectos ambientais, de saúde e segurança, a osmose reversa ficou em terceiro lugar, sendo inferior aos processos de adsorção e nota superior aos processos de precipitação e flotação.

As rotas tecnológicas precipitação química e flotação iônica apresentaram os menores conceitos globais nos aspectos ambientais, de saúde e segurança. Isto ocorre pela grande quantidade de insumos (e, conseqüentemente, produção de resíduos) manipulados nestes processos. Os custos destas rotas tecnológicas estiveram de maneira geral acima dos processos de adsorção; entretanto, para condições específicas (altas concentrações de metais >100mg/L e altas vazões de efluente > 5m³/h) estes processos podem ser mais viáveis economicamente.

Os processos por adsorção (zeólitas e biossorventes) foram os mais bem avaliados pelo Método de Seleção, mostrando-se com custos médios compatíveis com os processos de precipitação e flotação e até mais baixos que estes, além de serem superiores nos aspectos ambiental, de saúde e segurança. Para situações com baixa concentração de metais (> 10 mg/L), os processos por adsorção são os mais viáveis economicamente.

As rotas tecnológicas por adsorção estão ganhando espaço no mercado de sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados, tendo sido observados diversos casos em literatura de desenvolvimento de sorventes com maior poder de adsorção e de regeneração.

Comparativamente, a adsorção por biossorventes foi melhor avaliada que a adsorção por zeólitas, devido ao maior poder de adsorção dos biossorventes e ao menor risco químico envolvido neste tipo de processo.

Desta forma, com base nos cenários hipotéticos avaliados pelo Método de Seleção proposto, a rota tecnológica adsorção por biossorventes apresenta o maior potencial de utilização em sistemas de tratamento de efluentes contaminados por metais pesados.

A manipulação e a análise dos resultados apresentados pelo Método de Seleção pelo avaliador (tomador de decisão) fornecem uma boa gama de informações que possibilitam uma tomada de decisão embasada técnica, econômica e ambientalmente.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. R. M. P.; NOVAES, A. C. Remoção de Metais Pesados de Efluentes Industriais por Aluminossilicatos (2002). **Química Nova**, Rio de Janeiro, v.25, No. 6B, p.1145-1154, 2002.

ALLOWAY, B. J. Heavy metals in soils. **John Wiley & Sons, Inc.** New York, p.339, 1990.

ATHINKSON, B. W.; BUX, F.; KASAN, H. C. Considerations for application of biosorption technology to remediate metal-contaminated industrial effluents. **Water SA**, Durban, v.24, No. 2, Abril, 1998.

BENITO, Y.; RUÍZ, M. L. Reverse osmosis applied to metal finishing wastewater. **Desalination**, Madrid, v.142, p.229-234, 2002.

BLAIS, J. F. et al. Metals Precipitation from Effluents: Review. **Practice Periodical of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste Management**, Québec, v.12, No. 3, July, 2008.

BOSCO, S. M. D.; JIMENEZ, R. S.; CARVALHO, W. A. Aplicação da zeólita natural esolecita na remoção de metais pesados de efluentes industriais: competição entre os cátions e processo de dessorção. **Eclética Química**, São Paulo, v.29 (1), p.47-56, 2004.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1999. **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: Cetesb/GTZ, 1999. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/manual-de-gerenciamento-de-ACs/7->>.

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2005. **Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo**. São Paulo: 2005. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/solo/relatorios/tabela_valores_2005.pdf>

CETESB – Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 2011. **O que são áreas contaminadas**. São Paulo: 2011. Disponível em: <<http://www.cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas>>

COULSON, J. M.; RICHARDSON'S, J. F. In: SINNOTT, R. K. (Ed). **Chemical Engineering Design**. Volume 6. 4 ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann. 2005. p. 242-283.

COSTA, C. A.; SCHNEIDER, I. A. H.; RUBIO, J. Plantas aquáticas secas: uma alternativa moderna para remoção de metais pesados de efluentes industriais. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.5, n.1/2, p.19-24, 2000.

EVANKO, C. R.; DZOMBAK, D. A. D. **Remediation of Metals-Contaminated Soils and Groundwater**. Pittsburgh, PA: GWRTAC, 1997, 53 p.

GRAEDEL, T. E.; HOWARD-GRENVILLE, J. A. **Greening the Industrial Facility**. New York: Springer. 2005. 617 p.

GÜNTHER, W. M. R. Áreas contaminadas no contexto da gestão urbana. **São Paulo em Perspectiva**, São Paulo, Fundação Seade, v. 20, n. 2, p. 105-117, 2006.

HIGARASHI, M. M.; KUNZ, A.; MATTEI, R. M. Aplicação de adsorção para remover amônia de efluentes suínícolas pré-tratados. **Química Nova**, Concórdia, v. 31, No. 5, p.1156-1160, 2008.

HUANG, C. P.; HAO, O. J. **Environmental Technology Letters**, v.10, p.863, 1989.

IGLESIAS, C. S. M.; CASAGRANDE, J. C.; ALLEONI, L. R. F. Efeito da natureza do eletrólito e da força iônica na energia livre da reação de adsorção de níquel em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, São Carlos, v.31, p.897-903, 2007.

JIMENEZ, R. S.; BOSCO, S. M. D.; CARVALHO, W. A. Remoção de metais pesados de efluentes aquosos pela zeólita natural escolécita – influência da temperatura e do pH na adsorção em sistemas monoelementares. **Química Nova**, Campinas, v. 27, No. 5, p.734-738, 2004.

KATSOU, E. et al. Regeneration of Zeolite Loaded with Lead and Zinc After Wastewater Treatment. **Journal of Hazardous Materials**, Athens, v.183, issue 3, p.773–786, 2011.

KURNIAWAN, T. A. et al. Physico–chemical treatment techniques for wastewater laden with heavy metals. **Chemical Engineering Journal**, Hong Kong, v.118, p.83–98, 2006.

LANG, H. J. Simplified approach to preliminary cost estimates. **Chemical Engineering**, New York, v.55, p.112, 1948.

LAZARIDIS, N. K. et al. Copper removal from effluents by various separation techniques. **Hydrometallurgy**, Thessaloniki, v.74, p.149–156, 2004.

MATIS, K. A. et al. A hybrid flotation—microfiltration process for metal ions recovery. **Journal of Membrane Science**, Thessaloniki, v.247, p.29–35, 2005.

MATIS, K. A. et al. Sorptive flotation for metal ions recovery. **International Journal of Mineral Processing**, Thessaloniki, v.70, p.99–108, 2003.

MILLER, R. M. Biosurfactant-facilitated Remediation of Metal-contaminated Soils. **Environ Health Perspective**, Tucson, v.103(Suppl 1), p.59-62, 1995.

MOURA, J. R. S.; PEIXOTO, M. N. O.; SILVA, T. M. Geometria do relevo e estratigrafia do quaternário como base à tipologia de cabeceiras de drenagem em anfiteatro: médio vale do Rio Paraíba do Sul. **Revista Brasileira de Geociências**, São Paulo, v.21, n.3, p.255-265, mar. 1991.

MULLIGAN, C. N.; YONG, R. N.; GIBBS, B. F. Remediation technologies for metal-contaminated soils and groundwater: an evaluation. **Engineering Geology**, Quebec, v.60, p.193-207, 2001.

OZAKI, H.; SHARMA, K.; SAKTAYWIN, W. Performance of an ultra-low-pressure reverse osmosis membrane (ULPROM) for separating heavy metal: effects of interference parameters. **Desalination**, Osaka, v.144, p.287-294, 2002.

PEREIRA NETO, A. et al. Alternativas para o tratamento de efluentes da indústria galvânica. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**. Belo Horizonte. v.13, No. 3, p.263-270, 2008.

POLAT, H.; ERDOGAN, D. Heavy metal removal from waste waters by ion flotation. **Journal of Hazardous Materials**, Urla-Izmir, v.148, p.267–273, 2007.

SOARES, T. M. et al. Destinação de águas residuárias provenientes do processo de dessalinização por osmose reversa. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.10, n.3, p.730–737, 2006.

TOMASZEWSKA, M. Industrial wastewater treatment by means of membrane techniques. **Polish Journal of Chemical Technology**, Szczecin, v.9, 3, p.138—142, 2007.

VACLAVIK, F. D. **Avaliação e Otimização do Uso de Zeólitas no Tratamento Terciário de Efluentes Líquidos Industriais**. Porto Alegre, 2010. Trabalho de Conclusão de Curso (Químico Industrial) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2010.

Apêndice 1 – Diretrizes para Determinação dos Conceitos na Avaliação Ambiental

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 1,1

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Ambiental: Ecologia / Materiais

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Para o caso onde são usados componentes ou sub-sistemas inteiros de fornecedores: não há informação ou pouco se sabe sobre o conteúdo químico do processo e equipamentos fornecidos?
- Para o caso onde são usados materiais adquiridos a partir de fornecedores: um material escasso é utilizado quando uma alternativa razoável está disponível (materiais escassos são definidos como antimônio, berílio, boro, cobalto, cromo, ouro, mercúrio, os metais de platina - Pt, Ir, Os, Pa, Rh, Ru - prata, tório, e urânio)?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Material virgem não é usado em componentes de entrada ou materiais?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais em abastecimento restrito?
- O processo visa utilizar materiais reciclados ou componentes, sempre que possível?
- Dos materiais potenciais de consumo, são os escolhidos aqueles cuja extração resulta em menor impacto ambiental?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 1,2

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Um ou mais dos principais materiais utilizados no processo requer(em) extração intensa de energia, sendo que materiais alternativos menos impactantes estão disponíveis? (Materiais que necessitam de intensiva energia de extração são definidos como alumínio virgem, aço virgem e petróleo virgem)

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Insignificante energia é necessária para extrair ou enviar os materiais ou componentes para esse processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo visa minimizar o uso de materiais virgens, cuja extração requer energia intensa?
- O desenho do processo evita ou minimiza o uso de materiais de alta densidade cujo transporte de exigirá a utilização significativa de energia? (Tais materiais são definidos como aquelas com uma gravidade específica superior a 7,0).
- A distância de transporte dos materiais e componentes é minimizada?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 1,3

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Para o caso no qual os materiais são adquiridos a partir de fornecedores: metais a partir de minérios virgens são utilizados, criando resíduos substanciais que podem ser evitados pela utilização de material virgem, o qual está disponível a partir de processos de reciclagem?
- Para o caso no qual os componentes do fornecedor / sub-sistemas são utilizados: todas as embalagens de entrada são feitas de fontes virgens e consistem em três ou mais tipos de materiais?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Para o caso no qual os materiais são adquiridos a partir de fornecedores: nenhum resultado de resíduos sólidos a partir de extração de recursos ou durante a produção de materiais por reciclagem (exemplo: petróleo)?
- Para o caso no qual os componentes de fornecedores e sub-sistemas são utilizados: nenhum material de embalagem é usado ou o fornecedor toma de volta o material de embalagem, ou a embalagem é totalmente reutilizada / reciclada?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais cuja extração ou purificação envolve a produção de grandes quantidades de resíduos sólidos (isto é, carvão e todos os metais virgens)?

- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais cuja extração ou purificação envolve a produção de resíduos sólidos tóxicos? (esta categoria inclui todos os materiais radioativos)
- As embalagens utilizadas minimizam a diversidade de materiais na sua fabricação?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 1,4

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Ambiental: Efluentes Líquidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Para o caso no qual os componentes de fornecedores e sub-sistemas são usados: metais de minérios virgens que causam a drenagem de minas substancial de ácido são usados sendo que material virgem adequado está disponível a partir de fluxos de reciclagem. (Os materiais que causam drenagem ácida são definidos como cobre, ferro, níquel, chumbo e zinco)?
- Para o caso no qual os materiais são adquiridos de fornecedores: a embalagem contém substâncias tóxicas ou perigosas que possam vazar a partir dele se descarte inadequado ocorre?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Para o caso no qual os materiais são adquiridos a partir de fornecedores: nenhum efluente líquido é gerado a partir dos resíduos de extração de recursos ou durante a produção dos materiais?
- Para o caso no qual os componentes de fornecedores e sub-sistemas são usados: nenhum resíduo líquido é gerado durante o transporte, desembalagem, ou a utilização deste produto?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais cuja extração ou purificação envolve a geração de grandes quantidades de resíduos líquidos? (Esta categoria inclui papel, carvão e materiais provenientes da biomassa).
- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais cuja extração ou purificação envolve a geração de resíduos líquidos tóxicos? (Estes materiais são definidas como alumínio, cobre, ferro, chumbo, zinco, níquel).
- Os materiais utilizados minimizam a necessidade de limpeza que envolve uma grande quantidade de água ou que gera resíduos líquidos que necessitam de métodos especiais de destinação?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 1,5

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Ambiental: Emissões Gasosas

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os materiais utilizados causam emissões substanciais de gases tóxicos, fumaça ou gases de efeito estufa no meio ambiente sendo que alternativas adequadas estão disponíveis. (Estes materiais são definidos como alumínio, cobre, ferro, chumbo, níquel, zinco, papel e concreto)?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são produzidos resíduos gasosos durante a extração de recursos ou a produção dos materiais?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo é concebido para minimizar a utilização de materiais cuja extração ou purificação envolve a geração de grandes quantidades de resíduos de hidrogênio gasoso (tóxicos ou de outro modo)? (Tais materiais são definidos como alumínio, cobre, ferro, chumbo, zinco, níquel).
- O projeto do sistema evita o uso de materiais de consumo cujo transporte para a instalação irá resultar em significativas resíduos gasosos?
- O armazenamento em longo prazo dos materiais não causa a emissão de gases tóxicos, fumaça ou gases de efeito estufa no meio ambiente?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 2,1

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Ambiental: Ecologia / Materiais

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A implantação do sistema requer quantidades relativamente grandes de materiais que são restritos, tóxicos e / ou radioativos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Materiais utilizados na implantação do sistema possuem ciclo de vida fechado (produção, reciclagem, reaproveitamento)?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O projeto da implantação do sistema evita o uso de materiais que estão em oferta restrita?
- O uso de material tóxico e/ou radioativo é evitado ou minimizado durante a implantação do sistema?
- O tratamento químico de materiais e componentes é minimizado durante a implantação do sistema?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 2,2

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A utilização de energia na instalação dos equipamentos é extremamente alta?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- O processo de instalação dos equipamentos requer uso de energia mínima ou nula?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação do sistema é concebida para minimizar a utilização de energia elétrica?
- A instalação do sistema não requer a utilização de outras formas de energia, tais como: térmica, nuclear?
- Durante a implantação do sistema são feitas opções por ações que minimizem o uso de energia?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 2,3

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os resíduos sólidos são gerados em grande quantidade no transporte e instalação do sistema?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os resíduos sólidos do transporte e instalação do sistema são raros, sendo que mais que 90% são reutilizados / reciclados?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Os resíduos sólidos gerados no transporte e instalação do sistema não são tóxicos ou radioativos?
- Os resíduos sólidos gerados no transporte e instalação do sistema podem ser reciclados, reutilizados, em pelo menos 50% do total?
- Os resíduos sólidos gerados no transporte e instalação do sistema não necessitam de grandes áreas para armazenamento nem de locais específicos para tal?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 2,4

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Ambiental: Efluentes Líquidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os efluentes líquidos são gerados em grande quantidade no transporte e instalação do sistema?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os efluentes líquidos do transporte e instalação do sistema são raros ou nulos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Os efluentes líquidos gerados no transporte e instalação do sistema podem ser facilmente destinados?
- Se solventes ou óleos são utilizados no transporte e instalação dos equipamentos de processo, é a sua utilização minimizada e têm sido investigadas alternativas?
- Se a água é utilizada no transporte e instalação dos equipamentos de processo, é a sua utilização minimizada e têm sido investigadas alternativas?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 2,5

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Ambiental: Emissões Gasosas

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As emissões gasosas são geradas em grande quantidade no transporte e instalação do sistema?
- São emitidos gases tipo CFCs no transporte e instalação do sistema?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- As emissões gasosas do transporte e instalação do sistema são raras ou nulas?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Têm sido minimizada a emissão de gases de efeito estufa gerados nas atividades de transporte e/ou instalação do sistema?

- Os gases emitidos nas atividades de transporte e/ou instalação do sistema não possuem propriedades tóxicas?
- São empregadas avaliações de inventário das emissões atmosféricas nas atividades de transporte e/ou instalação do sistema?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 3,1

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Ambiental: Ecologia / Materiais

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- São utilizadas grandes quantidades de produtos tóxicos e/ou escassos nas operações principais do processo?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são utilizados produtos tóxicos e/ou escassos nas operações principais do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O uso de materiais tóxicos é evitado ou minimizado nas operações principais do processo?
- O projeto do sistema é feito para evitar o uso de grande variedade de materiais nas operações principais do processo?
- O projeto do sistema é feito para evitar o uso de grande quantidade de água nas operações principais do processo?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 3,2

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- O consumo de energia nas operações principais do processo é muito elevado?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Quantidade insignificante de energia é utilizada nas operações principais do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- As operações principais do processo envolvem o uso de energia eficiente, tal como motores de velocidade variável (inversores de frequência)?
- As operações principais do processo são concebidas para minimizar a utilização de energia intensiva, tal como diferenciais de aquecimento elevados, motores pesados, arrefecimento extensivo, etc.?
- As operações principais do processo técnicas para minimizar o desperdício de energia, usando trocadores de calor, co-geração, etc.?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 3,3

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Grandes quantidades de resíduos sólidos são geradas nas operações principais do processo?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não é gerado resíduo sólido nas operações principais do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A utilização de resíduos sólidos nas operações principais do processo foi minimizada e os materiais reutilizados na maior medida possível?
- Há oportunidade de venda dos resíduos sólidos como insumos em outros processos?
- A utilização e os tipos de embalagem nas operações principais do processo foram minimizados?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 3,4

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Ambiental: Efluentes Líquidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Grandes quantidades de efluentes líquidos são geradas nas operações principais do processo?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não é gerado efluente líquido nas operações principais do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A utilização de solventes ou óleos nas operações principais do processo foi minimizada e têm sido investigados substitutos para este uso?
- Há oportunidade de venda dos efluentes líquidos como insumos em outros processos?
- O projeto das operações principais do processo foi concebido para utilizar a quantidade máxima de líquido reciclado em vez de materiais virgens?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 3,5

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Ambiental: Emissões Gasosas

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Grandes quantidades de emissões gasosas são geradas nas operações principais do processo?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não é gerada emissão gasosa nas operações principais do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A utilização de gases tipo CFC foi minimizada e têm sido investigados substitutos para este uso?
- A geração de gases de efeito estufa foi minimizada nas operações principais do processo?
- O projeto foi concebido para abater/tratar as emissões atmosféricas que venham a ser geradas nas operações principais do processo?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 4,1

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Ambiental: Ecologia / Materiais

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- São utilizadas grandes quantidades de produtos tóxicos e/ou escassos nas manutenções preventivas do sistema?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não são utilizados produtos tóxicos e/ou escassos nas manutenções preventivas do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O uso de materiais tóxicos é evitado ou minimizado nas manutenções preventivas do sistema?
- O projeto do sistema é feito para evitar o uso de grande variedade de materiais nas manutenções preventivas do sistema?
- O projeto do sistema é feito para evitar o uso de grande quantidade de água nas manutenções preventivas do sistema?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 4,2

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- O consumo de energia nas manutenções preventivas do sistema é muito elevado?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Quantidade insignificante de energia é utilizada nas manutenções preventivas do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- As manutenções preventivas do sistema envolvem o uso de apenas 1 tipo de energia?
- As manutenções preventivas do sistema são concebidas para otimizar a utilização de energia?
- São elaborados procedimentos para minimizar o desperdício de energia durante as manutenções preventivas do sistema?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 4,3

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Grandes quantidades de resíduos sólidos são geradas nas manutenções preventivas do sistema?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não é gerado resíduo sólido nas manutenções preventivas do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A utilização de resíduos sólidos nas manutenções preventivas do sistema foi minimizada e os materiais reutilizados na maior medida possível?
- Há oportunidade de venda dos resíduos sólidos como insumos em outros processos?
- A utilização e os tipos de embalagem nas manutenções preventivas do sistema foram minimizados?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 4,4

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Ambiental: Efluentes Líquidos

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Grandes quantidades de efluentes líquidos são geradas nas manutenções preventivas do sistema?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não é gerado efluente líquido nas manutenções preventivas do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A utilização de solventes ou óleos nas manutenções preventivas do sistema foi minimizada e têm sido investigados substitutos para este uso?
- Há oportunidade de venda dos efluentes líquidos como insumos em outros processos?
- Os efluentes gerados nas manutenções preventivas do sistema são corretamente destinados?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 4,5

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Ambiental: Emissões Gasosas

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Grandes quantidades de emissões gasosas são geradas nas manutenções preventivas do sistema?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não é gerada emissão gasosa nas manutenções preventivas do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A geração de gases de efeito estufa foi minimizada nas manutenções preventivas do sistema?
- A geração de gases tóxicos é inexistente nas manutenções preventivas do sistema?
- O projeto foi concebido para abater/tratar as emissões atmosféricas que venham a ser geradas nas manutenções preventivas do sistema?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 5,1

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Ambiental: Ecologia / Materiais

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os equipamentos de processo contêm quantidades significativas de mercúrio, amianto, cádmio ou zinco que não são claramente identificados e facilmente removíveis?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- A diversidade de materiais é minimizada, os produtos são fáceis de desmontar e todas as partes são recicláveis?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Os diferentes materiais são fáceis de identificar e separar?
- Os equipamentos de processo são livres de bateria livre e de componentes contendo PCB ou PCT (por exemplo, em capacitores e transformadores)?
- As principais peças plásticas estão livres de retardadores de chama polibromados e de metais pesados (corantes, estabilizantes, condutores, etc.)?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 5,2

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Ambiental: Uso de Energia

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos de processo usam energia intensiva (em comparação a outros produtos que desempenham a mesma função), devido ao seu peso, construção e / ou complexidade?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- A utilização de energia para a reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos de processo é mínima?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O processo foi concebido com o objetivo de minimizar o uso de energia nas etapas de desmontagem dos equipamentos?
- O processo foi projetado para um alto nível de reutilização de materiais, evitando a reciclagem/descarte/destinação?
- A necessidade de energia para o transporte dos equipamentos do processo para a reciclagem/descarte/destinação foi minimizada?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 5,3

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Ambiental: Resíduos Sólidos

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Os equipamentos de processo consistem essencialmente em materiais sólidos não recicláveis, tais como borracha, fibra de vidro e polímeros mistos?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Os equipamentos de processo podem ser facilmente remodelados e reutilizados, sendo facilmente desmontados e com 100% de reciclagem/descarte/destinação no fim da sua vida?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Os equipamentos processo foram montados com elementos de fixação, tais como clips ou suportes mecânicos, ao invés de ligações químicas (géis, compostos de envasamento) ou soldas?
- São todos os componentes plásticos identificados por marcas ISO quanto ao seu conteúdo? Se o equipamento processo consiste em peças de plástico há um dominante (> 80% em peso) das espécies?
- Os equipamentos de processo podem ser alugados ao invés de adquiridos (comprados)?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 5,4

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Ambiental: Efluentes Líquidos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os equipamentos de processo contêm ou podem gerar na etapa de reciclagem/descarte/destinação efluentes líquidos não recicláveis?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os equipamentos do processo não utilizam líquidos operacionais (tais como óleos, refrigerantes, ou fluidos hidráulicos) e agentes de limpeza ou solventes?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Os efluentes líquidos contidos nos equipamentos do processo podem ser recuperados durante a desmontagem?
- A etapa de desmontagem dos equipamentos do processo não gera efluentes líquidos?
- As etapas de reciclagem/descarte/destinação dos materiais não geram efluentes líquidos?

ELEMENTO DA MATRIZ AMBIENTAL: 5,5

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Ambiental: Emissões Gasosas

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os equipamentos de processo contêm ou produzem emissões gasosas que são dissipadas para a atmosfera no fim da sua vida?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os equipamentos de processo não contêm substâncias perdidas à evaporação/sublimação (exceto água) e substâncias não-voláteis são utilizadas para a reciclagem/descarte/destinação?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A etapa de desmontagem dos equipamentos do processo gera emissões gasosas?
- As etapas de reciclagem/descarte/destinação dos materiais geram emissões gasosas?
- As principais peças plásticas estão livres de retardadores de chama polibromados, de metais pesados (corantes, estabilizantes, condutores, etc.) e de tintas a base de poliuretano, os quais gerariam emissões atmosféricas tóxicas?

Apêndice 2 – Diretrizes para Determinação dos Conceitos na Avaliação de Saúde e Segurança

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 1,1

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Físicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os fornecedores não estão em conformidade com os regulamentos estaduais e federais de saúde e segurança aplicáveis aos riscos físicos dos materiais?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- O provisionamento dos materiais para o processo não remete a riscos físicos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Esforços foram feitos pelos fornecedores para evitar acidentes durante o transporte dos materiais?
- O descarregamento dos materiais é feito de forma adequada, de forma a minimizar a chance de ocorrência de acidentes?
- Os materiais foram armazenados de forma adequada, que minimize a chance de ocorrência de acidentes enquanto não forem instalados?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 1,2

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Químicos / Biológicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os fornecedores não estão em conformidade com os regulamentos estaduais e federais de saúde e segurança aplicáveis aos riscos químicos/biológicos dos materiais?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- O provisionamento dos materiais para o processo não remete a riscos químicos/biológicos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Esforços foram feitos pelos fornecedores para evitar acidentes durante o transporte dos materiais?
- Caso haja algum acidente com danos aos materiais, foram tomadas todas as medidas relacionadas à contenção dos riscos químicos/biológicos?
- Os materiais foram armazenados de forma adequada, que minimize a chance de ocorrência de liberações químicas enquanto não forem instalados?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 1,3

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Elétricos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os fornecedores não estão em conformidade com os regulamentos estaduais e federais de saúde e segurança aplicáveis a riscos elétricos (choques) dos materiais?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- O provisionamento dos materiais para o processo não remete a riscos elétricos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Esforços foram feitos pelos fornecedores para evitar riscos de choques elétricos durante o transporte dos materiais, tais como instalação de materiais isolantes, aterramentos?
- O descarregamento dos materiais não causa riscos de choques elétricos em função das características dos materiais?
- Os materiais enquanto armazenados (antes da sua instalação) não fornecem riscos de choques elétricos?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 1,4

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Ergonômicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os fornecedores não estão em conformidade com os regulamentos estaduais e federais de saúde e segurança aplicáveis às questões ergonômicas relacionadas aos materiais (produção, armazenamento, transporte)?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- O provisionamento dos materiais para o processo não remete a riscos ergonômicos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Esforços foram feitos pelos fornecedores para minimizar os riscos ergonômicos durante o transporte dos materiais, tais como fornecer ferramentas e condições de trabalho adequadas aos motoristas e ajudantes?
- O descarregamento dos materiais é feito seguindo-se os procedimentos ergonômicos adequados, utilizando-se talhas, muncks, guinchos e/ou demais acessórios que evitem esforço excessivo por parte dos trabalhadores?
- Os materiais foram armazenados de forma adequada, que minimize a necessidade de movimentações constantes, retirada de alturas elevadas ou grandes deslocamentos dos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 1,5

Estágio Ciclo de Vida: Provisionamento de Recursos

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos de Ruído

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Os fornecedores não estão em conformidade com os regulamentos estaduais e federais de saúde e segurança aplicáveis a emissão de ruído durante o transporte e a entrega dos materiais?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- O provisionamento dos materiais para o processo não remete a emissões de ruído?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos 3 itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- Esforços foram feitos pelos fornecedores para evitar emissão de nível elevado de ruído durante o transporte dos materiais?
- O descarregamento dos materiais não remete a níveis elevados de ruídos?
- Os materiais enquanto armazenados (antes da sua instalação) não impactam nas ondas sonoras locais, podendo causar perturbações sonoras?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 2,1

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Físicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A montagem do sistema ocasiona riscos físicos aos trabalhadores e pessoas próximas, com razoável possibilidade de queda de materiais, tombamentos e/ou trombadas?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos físicos e de acidentes durante a implementação do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação dos equipamentos de maior peso e/ou dimensões é feita com auxílio de talhas, muncks, guinchos e/ou demais acessórios que evitem esforço excessivo por parte dos trabalhadores?
- Não há previsão de realização de trabalho em altura elevada, valendo-se de andaimes, escadas, plataformas ou outros meios de acesso?
- Não há previsão de realização de trabalho em espaço confinado que remeta riscos físicos aos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 2,2

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Químicos / Biológicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A montagem do sistema ocasiona riscos químicos/biológicos aos trabalhadores e pessoas próximas, com razoável possibilidade de vazamentos e contatos com produtos tóxicos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos químicos/biológicos durante a implementação do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação dos materiais que possam causar vazamento de conteúdo ou liberação de substâncias tóxicas é feita de forma a minimizar a ocorrência destas situações?
- O projeto do sistema foi feito visando minimizar a chance de vazamentos durante a instalação dos equipamentos, bem como criou medidas de contingência para situações deste gênero?
- Os trabalhadores dispõem de meios propícios à contenção de eventuais vazamentos de produtos durante a implementação do processo?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 2,3

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Elétricos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A montagem do sistema ocasiona riscos elétricos aos trabalhadores e pessoas próximas, através da manipulação de alta tensão e muitas interligações elétricas em redes energizadas?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os riscos elétricos são mínimos durante a implementação do processo, sendo a maior parte (ou a totalidade) da montagem feita com os equipamentos desenergizados?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação dos painéis elétricos é feita por trabalhadores qualificados e com certificados e habilitações próprios para a função?
- Os trabalhos de ligações elétricos nos painéis de controle, nos equipamentos e nos instrumentos são feitos com o sistema desenergizado?
- Todos os pontos de energia elétrica durante a implementação do processo (tais como tomadas de uso geral, ferramentas, iluminação) são corretamente instalados seguindo-se normas técnicas?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 2,4

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Ergonômicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A montagem do sistema remete a riscos ergonômicos aos trabalhadores, devido às características dos equipamentos, condições do local de trabalho e/ou falta de ferramentas/acessórios?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos ergonômicos (ou estes são de menor magnitude) durante a implementação do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação dos equipamentos de maior peso e/ou dimensões é feita com auxílio de talhas, muncks, guinchos e/ou demais acessórios que evitem esforço excessivo por parte dos trabalhadores?
- A instalação do sistema não requer posições incômodas aos trabalhadores, tais como atuar agachado (trabalhos abaixo do piso), atuar em cima de escadas (trabalhos em pequena altura), atuar entre máquinas ou peças móveis?
- Os equipamentos do processo, bem como unidades acessórias (tubulações, instrumentação) podem ser facilmente instalados, não sendo necessária força excessiva por parte dos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 2,5

Estágio do Ciclo de Vida: Implementação do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos de Ruído

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A montagem do sistema gera níveis elevados de ruído, acima dos limites permitidos pela legislação aplicável ao local?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são previstas emissões de níveis elevados de ruído durante a implementação do processo?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A instalação dos equipamentos de maior peso e/ou dimensões não remete a níveis de ruído acima dos permitidos pela legislação aplicável ao local?
- Os trabalhadores possuem dispositivos de proteção auricular compatíveis com a redução necessária dos níveis de ruído a que estão submetidos?
- A implementação do processo não remete a níveis de ruído que estejam fora dos limites legais para o entorno do empreendimento, englobando o zoneamento da região (residencial, comercial, industrial)?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 3,1

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Físicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A operação do sistema ocasiona riscos físicos aos trabalhadores e pessoas próximas, com razoável possibilidade de queda de materiais, tombamentos e/ou trombadas?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos físicos e de acidentes durante a operação do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O funcionamento dos equipamentos do processo possui pouca probabilidade de remeter a quedas de nível, projeções de materiais, desprendimentos ou outras ações que possam gerar riscos físicos aos trabalhadores e pessoas próximas?
- O projeto do sistema foi feito objetivando um layout adequado à operação do processo, com distanciamentos adequados e facilidade de acesso aos itens manipuláveis e/ou lidos?
- A implementação do processo foi feita de forma adequada, garantindo a boa fixação dos equipamentos, a boa vedação das peças e o bom funcionamento do sistema, minimizando os riscos físicos aos trabalhadores e pessoas próximas?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 3,2

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Químicos / Biológicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A operação do sistema ocasiona riscos químicos/biológicos aos trabalhadores e pessoas próximas, com razoável possibilidade de vazamentos e contatos com produtos tóxicos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos químicos/biológicos durante a operação do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O funcionamento dos equipamentos do processo possui pouca probabilidade de remeter a vazamentos e/ou contato com produtos tóxicos que possam gerar riscos químicos/biológicos aos trabalhadores e pessoas próximas?
- O projeto do sistema foi feito objetivando um layout adequado à operação do processo, com contenções nos locais com possibilidade de vazamentos e facilidade de acesso aos itens manipuláveis e/ou lidos?

- A implementação do processo foi feita de forma adequada, garantindo a boa fixação dos equipamentos, a boa vedação das peças e o bom funcionamento do sistema, minimizando os riscos químicos/biológicos aos trabalhadores e pessoas próximas?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 3,3

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Elétricos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A operação do sistema ocasiona riscos elétricos aos trabalhadores e pessoas próximas, com presença de itens energizados (sem devida proteção) ou necessidade constante de acesso ao interior dos painéis elétricos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os riscos elétricos são mínimos (ou nulos) durante a operação do sistema, não sendo previstos acesso a itens energizados?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- O acesso aos painéis elétricos (de controle e de distribuição) é feito exclusivamente por pessoal qualificado e com habilitação para tal?
- Todos os itens (painéis, equipamentos, instrumentos) energizados, possuem proteções adequadas que impeçam qualquer contato acidental com as partes energizadas?
- O projeto e a implantação do sistema garantiram aterramento adequado do sistema, bem como especificaram conexões e terminais de acordo com as normas legais pertinentes?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 3,4

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Ergonômicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- A operação do sistema remete a elevados riscos ergonômicos aos trabalhadores, devido às características dos equipamentos, condições do local de trabalho e/ou falta de ferramentas/acessórios?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos ergonômicos (ou estes são de menor magnitude) durante a operação do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A operação do sistema não acarreta movimentos repetitivos frequentemente e ou que causem desconforto aos trabalhadores?
- A operação do sistema não requer posições incômodas aos trabalhadores, tais como atuar agachado (trabalhos abaixo do piso), atuar em cima de escadas (trabalhos em pequena altura), atuar entre máquinas ou peças móveis?
- A operação do sistema não requer esforços físicos consideráveis por parte dos trabalhadores, tais como levantamento de elementos pesados, sem disponibilidade do uso de talhas, muncks, guinchos e/ou demais acessórios que evitem esforço excessivo?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 3,5

Estágio do Ciclo de Vida: Operações Principais do Processo

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos de Ruído

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- A operação do sistema gera níveis elevados de ruído, acima dos limites permitidos pela legislação aplicável ao local?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não são previstas emissões de níveis elevados de ruído durante a operação do sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A operação do sistema não se caracteriza por eventos pontuais de emissão de elevado nível de ruído, tais como martelletes, golpes em superfície metálica, desenergização de precipitadores eletrostáticos, etc.?
- Os trabalhadores possuem dispositivos de proteção auricular compatíveis com a redução necessária dos níveis de ruído a que estão submetidos?
- A operação do processo não remete a níveis de ruído que estejam fora dos limites legais para o entorno do empreendimento, englobando o zoneamento da região (residencial, comercial, industrial)?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 4,1

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Físicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As manutenções preventivas no sistema ocasionam riscos físicos aos trabalhadores, com razoável possibilidade de quedas, tombamentos e/ou trombadas?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos físicos e de acidentes durante as manutenções preventivas no sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A realização das manutenções preventivas no sistema possui pouca probabilidade de remeter a quedas de nível, projeções de materiais, desprendimentos ou outras ações que possam gerar riscos físicos aos trabalhadores?
- O projeto do sistema foi feito objetivando um layout adequado, possibilitando facilidade de acesso e retirada dos equipamentos passíveis de manutenção?
- Os equipamentos do processo requerem pouca manutenção preventiva e estas são facilmente realizáveis, sem necessidade de grandes intervenções?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 4,2

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Químicos / Biológicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As manutenções preventivas no sistema ocasionam riscos químicos/biológicos aos trabalhadores, razoável possibilidade de vazamentos e contatos com produtos tóxicos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos químicos/biológicos durante as manutenções preventivas no sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A realização das manutenções preventivas no sistema possui pouca probabilidade de remeter a vazamentos que possam gerar riscos químicos/biológicos aos trabalhadores?

- A realização das manutenções preventivas no sistema possui pouca probabilidade de remeter os trabalhadores a contato com produtos tóxicos?
- A realização das manutenções preventivas no sistema possui pouca probabilidade de remeter a situações que possam gerar riscos químicos/biológicos ao meio ambiente e pessoas próximas, tais como grandes vazamentos e derramamentos?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 4,3

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Elétricos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As manutenções preventivas no sistema ocasionam riscos elétricos aos trabalhadores, com presença de itens energizados (sem devida proteção) ou necessidade constante de acesso ao interior dos painéis elétricos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Os riscos elétricos são mínimos (ou nulos) durante as manutenções preventivas no sistema, não sendo previstos acesso a itens energizados?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A realização das manutenções preventivas no sistema é feita sempre com os itens desenergizados e utilizando-se dispositivos de bloqueio para re-acionamento (*tag out*)?
- A manutenção nos painéis elétricos (de controle e de distribuição) é feita exclusivamente por pessoal qualificado e com habilitação para tal?
- Todos os itens (painéis, equipamentos, instrumentos) energizados possuem proteções adequadas que impeçam qualquer contato acidental com as partes energizadas?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 4,4

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Ergonômicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As manutenções preventivas no sistema remetem a elevados riscos ergonômicos aos trabalhadores devido às características dos equipamentos, condições do local de trabalho e/ou falta de ferramentas/acessórios?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos ergonômicos (ou estes são de menor magnitude) durante as manutenções preventivas no sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- As manutenções preventivas no sistema não acarretam movimentos repetitivos frequentemente e ou que causem desconforto aos trabalhadores?
- As manutenções preventivas no sistema não requerem posições incômodas aos trabalhadores, tais como atuar agachado (trabalhos abaixo do piso), atuar em cima de escadas (trabalhos em pequena altura), atuar entre máquinas ou peças móveis?
- As manutenções preventivas no sistema não requerem esforços físicos consideráveis por parte dos trabalhadores, tais como levantamento de elementos pesados, sem disponibilidade do uso de talhas, muncks, guinchos e/ou demais acessórios que evitem esforço excessivo?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 4,5

Estágio do Ciclo de Vida: Manutenções Preventivas

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos de Ruído

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- As manutenções preventivas no sistema geram níveis elevados de ruído, acima dos limites permitidos pela legislação aplicável ao local?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são previstas emissões de níveis elevados de ruído durante as manutenções preventivas no sistema?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- As manutenções preventivas no sistema não se caracterizam por eventos pontuais de emissão de elevado nível de ruído, tais como marteletes, golpes em superfície metálica, desenergização de precipitadores eletrostáticos, etc.?
- Os trabalhadores possuem dispositivos de proteção auricular compatíveis com a redução necessária dos níveis de ruído a que estão submetidos?
- As manutenções preventivas no sistema não remetem a níveis de ruído que estejam fora dos limites legais para o entorno do empreendimento, englobando o zoneamento da região (residencial, comercial, industrial)?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 5,1

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Físicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos acarretam em elevados riscos físicos aos trabalhadores, envolvendo cortes, choques, falhas catastróficas?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos físicos e de acidentes durante os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A desmontagem final dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a acidentes e riscos físicos, sendo feita de acordo com procedimentos pré-estabelecidos?
- Os eventos que precipitam a fase final de vida para os equipamentos (embalagem, carregamento, transporte) representam baixos riscos físicos de explosões, acidentes, incêndios, ou falhas estruturais?
- A realização dos processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a cortes, choques, falhas catastróficas ou outras ações que possam gerar riscos físicos aos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 5,2

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Químicos / Biológicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos acarretam em elevados riscos químicos/biológicos aos trabalhadores, envolvendo vazamentos e/ou contato com produtos tóxicos?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos químicos/biológicos durante os processos de reciclagem / descarte / destinação dos equipamentos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A desmontagem final dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a vazamentos e contatos com produtos tóxicos, sendo feita de acordo com procedimentos pré-estabelecidos?
- Os eventos que precipitam a fase final de vida para os equipamentos (embalagem, carregamento, transporte) representam baixos riscos químicos/biológicos?
- A realização dos processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a vazamentos, contato com produtos tóxicos ou outras ações que possam gerar riscos químicos/biológicos aos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 5,3

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Elétricos

Condições Negativas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 0*)

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos acarretam em elevados riscos elétricos aos trabalhadores, envolvendo contato com partes energizadas, desmontagens em redes com energia?

Condições Positivas ocorrem? (*Se sim, o elemento da matriz recebe 4*)

- Não são reconhecidos riscos elétricos durante os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A desmontagem final dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a choques elétricos e/ou contato com partes energizadas, sendo feita de acordo com procedimentos pré-estabelecidos?
- Os eventos que precipitam a fase final de vida para os equipamentos (embalagem, carregamento, transporte) representam baixos riscos elétricos?
- A realização dos processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a choques elétricos, contato com partes energizadas ou outras ações que possam gerar riscos elétricos aos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 5,4

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos Ergonômicos

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos acarretam em elevados riscos ergonômicos aos trabalhadores, devido às características dos equipamentos, condições do local de trabalho e/ou falta de ferramentas/acessórios?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são reconhecidos riscos ergonômicos (ou estes são de menor magnitude) durante os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A desmontagem final dos equipamentos possui pouca probabilidade de causar riscos ergonômicos aos trabalhadores, sendo feita de acordo com procedimentos pré-estabelecidos?
- Os eventos que precipitam a fase final de vida para os equipamentos (embalagem, carregamento, transporte) representam baixos riscos ergonômicos?
- A realização dos processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a movimentos repetitivos, posições inadequadas, esforços excessivos ou outras ações que possam gerar riscos ergonômicos aos trabalhadores?

ELEMENTO DA MATRIZ SAÚDE-SEGURANÇA: 5,5

Estágio do Ciclo de Vida: Finalização / Destinação Final

Preocupação Saúde e Segurança: Riscos de Ruído

Condições Negativas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 0)*

- Os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos geram níveis elevados de ruído, acima dos limites permitidos pela legislação aplicável ao local?

Condições Positivas ocorrem? *(Se sim, o elemento da matriz recebe 4)*

- Não são previstas emissões de níveis elevados de ruído durante os processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos?

Se nenhuma das condições acima se aplica, complete o *checklist* abaixo. Contabilize quantos dos itens abaixo são características do processo (*resultado final = elemento da matriz*)

- A desmontagem final dos equipamentos possui pouca probabilidade de emitir níveis elevados de ruído?

- Os eventos que precipitam a fase final de vida para os equipamentos (embalagem, carregamento, transporte) emitem baixos níveis de ruído?
- A realização dos processos de reciclagem/descarte/destinação dos equipamentos possui pouca probabilidade de remeter a níveis de ruído que estejam fora dos limites legais para as atividades pertinentes?

Apêndice 3 – Memorial de Cálculo – Balanços de Massa e Energia – Cenários Hipotéticos

Apêndice 4 – Memorial de Cálculo – Correção de pH

Apêndice 5 – Memorial de Cálculo – Dimensionamento Equipamentos – Cenários Hipotéticos

Seguem informações a respeito do dimensionamento de cada equipamento:

Rota Tecnológica A: Adsorção por Zeólitas:

- Colunas de Adsorção (CA-201A/B e CA-202A/B): dimensionamento, materiais e características de cada coluna são geralmente definidos pelo fornecedor. Para a estimativa do custo, foram consideradas as informações do processo provenientes dos cálculos de Balanço de Massa, a partir das quais foram recebidas cotações de fornecedores do Estado de São Paulo. O custo estimado foi a média dos valores das cotações recebidas.
- Tancagem: material requisitado polipropileno (PP) cinza, com agitação mecânica promovida por bomba+hélice em aço inox posição vertical (quando necessário), fundo plano, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca.
- Bombas Centrífugas (BC-201 e BC-202): mono estágio, carcaça em alumínio, rotor em aço inox ou ferro fundido, vedações em Teflon, com motor elétrico trifásico acoplado, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Dosadoras (BD-211 a BD-214): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento magnético, grau de proteção IP-55 ou superior.

Rota Tecnológica B: Adsorção por Biossorventes:

- Colunas de Adsorção (CA-301A/B e CA-302A/B): dimensionamento, materiais e características de cada coluna são geralmente definidos pelo fornecedor. Para a estimativa do custo, foram consideradas as informações do processo provenientes dos cálculos de Balanço de Massa, a partir das quais foram recebidas cotações de fornecedores do Estado de São Paulo. O custo estimado foi a média dos valores das cotações recebidas.

- Tancagem: material requisitado polipropileno (PP) cinza, com agitação mecânica promovida por bomba+hélice em aço inox posição vertical (quando necessário), fundo plano, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca.
- Bombas Centrífugas (BC-301 e BC-302): mono estágio, carcaça em alumínio, rotor em aço inox ou ferro fundido, vedações em Teflon, com motor elétrico trifásico acoplado, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Dosadoras (BD-311 a BD-314): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento magnético, grau de proteção IP-55 ou superior.

Rota Tecnológica C: Precipitação Química:

- Tancagem: material requisitado polipropileno (PP) cinza, com agitação mecânica promovida por bomba+hélice em aço inox posição vertical (quando necessário), com difusor de ar tipo fixo tubular feito em plástico ou aço inox (quanto necessário), fundo plano, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca.
- Tanques Adensadores (TQ-106A/B): material requisitado polipropileno (PP) cinza, fundo cônico, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca, com pés de sustentação em aço carbono.
- Decantador Lamelar (DL-101): material requisitado polipropileno (PP) reforçado, com módulo lamelar em PVC, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída sobrenadante, saída lodo), com lamelas em aço inox, inclinação lamelas aproximadamente 60°.
- Filtro-Prensa (FL-101): tipo semi-automático (acionamento manual e movimentação placas com motor hidráulico), material de construção aço carbono, material placas polipropileno (PP), com fechamento hidráulico motorizado, com bandeja para coleta sobrenadante, eficiência mínima de desidratação do lodo de 75%, 30 placas de 500 X 500 mm para os cenários I e III e 20 placas de 400 X 400 mm para os cenários II e IV. Neste caso

específico, foram considerados 2 filtros-prensa em paralelo em função da vazão deste cenário hipotético (5000 L/h).

- Bomba Centrífuga (B-103): mono estágio, carcaça em alumínio, rotor em aço inox ou ferro fundido, vedações em Teflon, com motor elétrico trifásico acoplado, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Dosadoras (B-111 a B-114): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento magnético, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Diafragma (B-101, B-102): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento pneumático, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Compressor de Ar (CP-101): modelo tipo rotativo parafuso, acoplado a tanque pulmão em aço carbono com volume mínimo 200 litros, acoplado a sistema de tratamento do ar comprimido (filtros e secadores), com pressostato de segurança, com motor trifásico de 10 CV de potência, pressão máxima de ar 9 barg, de acordo com requisitos de segurança da NR-13.

Rota Tecnológica D: Osmose Reversa:

- Sistema de Osmose Reversa (CA-501): dimensionamento, materiais e características de cada sistema são geralmente definidos pelo fornecedor. Para a estimativa do custo, foram consideradas as informações do processo provenientes dos cálculos de Balanço de Massa, a partir das quais foram recebidas cotações de fornecedores do Estado de São Paulo. O custo estimado foi a média dos valores das cotações recebidas.
- Tancagem: material requisitado polipropileno (PP) cinza, com agitação mecânica promovida por bomba+hélice em aço inox posição vertical (quando necessário), fundo plano, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca;

- Bombas Centrífugas (BC-501 a BC-503): mono estágio, carcaça em alumínio, rotor em aço inox ou ferro fundido, vedações em Teflon, com motor elétrico trifásico acoplado, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Dosadoras (BD-511 a BD-514): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento magnético, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bomba Diafragma (BD-501): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento pneumático, grau de proteção IP-55 ou superior.

Rota Tecnológica E: Flotação Iônica:

- Colunas de Flotação (CA-601 e CA-602): dimensionamento, materiais e características de cada coluna são geralmente definidos pelo fornecedor. Para a estimativa do custo, foram consideradas as informações do processo provenientes dos cálculos de Balanço de Massa, a partir das quais foram recebidas cotações de fornecedores do Estado de São Paulo. O custo estimado foi a média dos valores das cotações recebidas.
- Tancagem: material requisitado polipropileno (PP) cinza, com agitação mecânica promovida por bomba+hélice em aço inox posição vertical (quando necessário), fundo plano, com bocais padrões em fornecimento (entrada, saída, drenagem, inspeção) do tipo rosca.
- Bombas Centrífugas (BC-601 a BC-603): mono estágio, carcaça em alumínio, rotor em aço inox ou ferro fundido, vedações em Teflon, com motor elétrico trifásico acoplado, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bombas Dosadoras (BD-611 a BD-614): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento magnético, grau de proteção IP-55 ou superior.
- Bomba Diafragma (BD-601): tipo diafragma, vedações e diafragma em Teflon, hermeticamente fechada, acionamento pneumático, grau de proteção IP-55 ou superior.

- Soprador de Ar (SP-601): modelo tipo compressor radial, duplo estágio, com motor elétrico trifásico de 15 CV de potência, carcaça em alumínio, rotor em ferro fundido, grau de proteção IP-55 ou superior, grau de isolamento F.

Apêndice 6 – Resultados da Avaliação Econômica – Cenários Hipotéticos

Apêndice 7 – Matrizes da Avaliação Ambiental, de Saúde e Segurança – Cenários Hipotéticos

Anexo 1 – Riscos Associados aos Metais

Metal	Toxicidade
Antimônio	Dermatites, keratinis, conjuntivite e ulceração nasal, possível carcinógeno humano
Arsênio	Queimaduras e secura da boca e da garganta, disfagia, vômitos, dermatose, câibras musculares, edema facial e anormalidades cardíacas, cânceros do pulmão, pele, bexiga, rins e fígado, danos ao sistema respiratório, cardio-vascular, nervoso e hematopoético, morte
Berílio	Doença pulmonar, beriliose, substância cancerígena, citotoxicidade (impacta função da enzima, síntese de DNA, fosforilação de proteínas e divisão celular)
Cádmio	Danos aos rins, necrose e disfunção renal, edema pulmonar e pneumonia, doença Itai-Itai, câncer da próstata e do pulmão
Cromo	Irritação da pele, dor de cabeça, náuseas, diarreia, vômito, problemas renais e no fígado, insuficiência renal, irritação do trato respiratório, enfisema, bronquite crônica, broncopneumonia, câncer de pulmão
Cobre	Fraqueza, letargia e anorexia, dor abdominal, cólicas, náuseas, diarreia, vômitos, cirrose hepática, doença de Wilson, danos nos túbulos renais, necrose hepática, colapso vascular
Mercúrio	Perda de memória, demência, déficit de atenção, ataxia, disfagia, tontura, irritabilidade, cegueira e surdez, perturbações da função motora fina, gengivite, irritação gastrointestinal, disfunção renal, altera a homeostase cardiovascular normal, diminui a imunidade geral do organismo, esclerose múltipla, edema pulmonar, diminui a taxa de fertilidade
Chumbo	Déficits de memória e de aprendizagem, pressão alta, insônia e anorexia, irritabilidade muscular, encefalopatia, tremores e ataxia, danos neurológicos, hematológicos e aos sistemas renal, danos à fertilidade, nefropatia crônica
Níquel	Dor de cabeça, dermatite, náuseas, dermatite alérgica, asma crônica, tosse, fibrose pulmonar, doenças cardio-vasculares e renais, câncer nasal e pulmonar
Selênio	Selenosis (perda e fragilidade de cabelo e unhas), problemas gastrointestinais, erupção cutânea, odor de alho, anemia hipocrômica, leucopenia, fraqueza, convulsões, alterações do sistema nervoso
Prata	Pigmentação irreversível da pele (argyria), olhos (argyrosis), superior (nariz e garganta) e inferior (peito), irritação das vias respiratórias, bronquite, enfisema e redução de volume pulmonar
Tálio	Fadiga, cefaléia, insônia, náuseas, vômitos, queda de cabelo, gastroenterite, alopecia, síndrome de pés queimados, ataxia, convulsões, delírio, alucinações, taquicardia, hipotensão, coma
Zinco	Depressão, letargia, sinais neurológicos como convulsões e ataxia, aumento da sede, irritação gastrointestinal e vômitos

Fonte: Adaptada de Blais et al (2008).

Anexo 2 – Tecnologias para Tratamento de Efluentes Contaminados por Metais Pesados

Tipo de Tecnologia	Exemplos da Tecnologia
Precipitação Química	Precipitação como hidróxido metálico, carbonato ou fosfato, reação de oxidação/redução
Bioprecipitação	Wetland construída, bioreator (bactérias redutoras de sulfato)
Troca Iônica	Resina sintética (sulfônico, tiocarbamato, carboxílicos, tióis, hidroxila, grupos amida), quelante de troca de resina (fosfônico, aminophosphonic, iminodiacetate, grupos de oxima), resina impregnada de solvente (DEHPA, PEIMPA), material natural (zeólita, argila)
Adsorção	Carvão ativado granulado, alumina ativada, a lignina, a quitosana, alginato, zeólita, argila, fly-ash, turfa, lã, algodão, óxido naturais
Biossorção	Agro-industrial de biomassa (casca de fruta / cereal), silvicultura (casca, serradura), biomassa de algas, bactérias, fungos, plantas terrestres e aquáticos (fito-filtração ou fito-acumulação), lodo de esgoto, fermento
Separação Física	Microfiltração, ultrafiltração, nanofiltração, osmose reversa, evaporação por membrana, cristalização, destilação
Separação Eletroquímica	Eletrocoagulação, eletrodeposição, eletrodialise, per-oxidação eletroquímica
Extração por Solvente	Bis-(2-etil-hexul) ácido fosfórico (D2EHPA), bis-(2,4,4-trimetilpentil) ácido fosfônico, hydroxyoximes, tri-n-octylmethylammonium
Flotação	Flotação ar dissolvido, flotação sortiva
Cementação	Ferro, alumínio

Fonte: Adaptada de Blais et al (2008).