

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS
Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais
Curso de Especialização em Engenharia de Recursos Minerais

MONOGRAFIA

**Utilização, Reúso e Gerenciamento da Água nas Usinas de
Beneficiamento de Minério de Ferro**

Aluna: Carol de Freitas Esteves

Orientador: Prof. George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte

Junho 2013

Carol de Freitas Esteves

**Utilização, Reúso e Gerenciamento da Água nas Usinas de
Beneficiamento de Minério de Ferro**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial para obtenção do título de Pós-Graduação em Engenharia de Recursos Minerais.

Área de concentração: Processamento de Minérios de Ferro

Professor orientador: George Eduardo Sales Valadão

Belo Horizonte

Junho 2013

AGRADECIMENTOS

- Aos meus pais e ao meu noivo Mateus Henriques pela motivação e apoio constante.
- Ao George Eduardo Sales Valadão, meu orientador, pela sua atenção e paciência durante a preparação do trabalho.
- Aos membros da Banca Examinadora, pela leitura do texto e pelas sugestões oferecidas ao trabalho.
- Aos colegas de sala que dividiram comigo momentos de grande aprendizado.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1 Uso da água na mineração do minério de ferro	12
3.2 Balanço de massas e metalúrgico	12
3.3 Balanço de água.....	17
3.4 Água na Moagem	19
3.5 Água no Peneiramento.....	22
3.6 Água na Classificação	26
3.6.1 Ciclonação.....	26
3.6.2 Classificação Espiral.....	29
3.7 Água na Separação Magnética	32
3.8 Água na Flotação	35
3.9 Sistema de drenagem industrial	40
3.9.1 Cenário 1 – Paradas de emergência.....	40
3.9.2 Cenário 2 – Regime contínuo de operação de resíduo	41
3.9.3 Caixas de retenção de resíduos	42
3.10 Legislação federal de recursos hídricos	43
3.11 Legislação de reúso de água	44
3.12 Reutilização/Recirculação da água na mineração	46
3.12.1 Recuperação de água dos espessadores	47
3.12.2 Recuperação de água dos filtros	49
3.12.3 Recuperação de água da barragem de rejeitos.....	51
3.13 Efluentes no processamento mineral	54
3.14 Qualidade da água recuperada/reutilizada no processamento mineral	55
3.15 Tratamento da água no beneficiamento mineral.....	56
3.15.1 Processos físicos	59
3.15.2 Processos químicos.....	59
3.15.3 Processos biológicos.....	59
3.16 Gerenciamento de recursos hídricos através da integração de processos.....	59
4. ESTUDO DE CASO	62
4.1 Fluxograma de Processo c/ Balanço de Massas	65
4.2 Balanço de Água Macro	73

5. CONCLUSÕES.....	76
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	77
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Balanço Macro de Água (ECM, 2012)	18
Figura 3.2: Representação esquemática de um moinho de bolas (SALES, 2009)	20
Figura 3.3: Fluxograma esquemático para circuito fechado de moinho de bolas (SALES, 2009).....	21
Figura 3.4: Sprays de água nas peneiras vibratórias (Arquivo Pessoal, 2011).....	23
Figura 3.5: Grelha Fixa (a), Peneira Rotativa (b), Peneira Vibratória Horizontal (c), Peneira Banana (d) (METSO, 2013)	24
Figura 3.6: Constituição de uma peneira vibratória inclinada (MSR, 2013).....	25
Figura 3.7: Desenho esquemático das seções e/ou partes de um hidrociclone (SALES, 2009).....	27
Figura 3.8: Variáveis operacionais e as forças de atuação no hidrociclone (SALES, 2009)	28
Figura 3.9: Fluxograma de engenharia esquemático para alimentação de uma bateria de hidrociclones (Arquivo Pessoal, 2012).....	29
Figura 3.10: Desenho Esquemático Classificador Espiral (Adaptado Engendrar, 2013)	30
Figura 3.11: Classificador Espiral ITM D Pico (Arquivo pessoal, 2011)	31
Figura 3.12: Desenho esquemático do concentrador Jones (Adaptado WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).....	33
Figura 3.13: Desenho esquemático em perspectiva do concentrador Jones (Adaptado (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006)	33
Figura 3.14: Desenho esquemático sobre a distribuição de água no concentrado da separação magnética (ECM, 2012).....	35
Figura 3.15: Desenho esquemático de uma coluna de flotação (VIANA, 2012)	36
Figura 3.16: Coluna de flotação em teste de laboratório para minério de ferro (Arquivo pessoal, 2009)	37
Figura 3.17: Bancos de Células de Flotação (VIANA, 2012)	37
Figura 3.18: Fluxograma de processo – drenagem industrial (ECM, 2012)	42
Figura 3.19: Caixa de contenção de resíduos Casa de Pedra CSN (ECM, 2012)	43
Figura 3.20: Desenho esquemático de um espessador contínuo convencional (LUZ <i>et al.</i> , 2010).....	48
Figura 3.21: <i>Overflow</i> do Espessador de Lamas, Mina de Brucutu (Arquivo Pessoal, 2011).....	48

Figura 3.22: Desenho esquemático do ciclo da filtragem (Adaptado TORR-ENGENHARIA, 2013).....	50
Figura 3.23: Desenho esquemático de um conjunto de filtragem (Arquivo Pessoal, 2011)	50
Figura 3.24: Método de montante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)	52
Figura 3.25: Método de jusante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004).....	52
Figura 3.26: Método de linha de centro (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)	53
Figura 3.27: Integração de Processos (MOREIRA, 2009)	60
Figura 4.1: Diagrama de Blocos - Rota de Processo Esquemática	64
Figura 4.2: Fluxograma de Processo c/ Balanço de Massas.....	65
Figura 4.3: Captação e Distribuição de Água Nova e Recuperada das Barragens de Rejeitos	69
Figura 4.4: Gráfico - Captação de Água Nova e Recuperada	72
Figura 4.5: Balanço de Água Macro.....	73
Figura 4.6: Balanço de Produto	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Fórmulas para elaboração dos cálculos dos balanços de massas e metalúrgico (VALADÃO, 2007).....	14
Tabela 3.2: Fórmulas utilizadas para derivação parcial da equação de recuperação metalúrgica (VALADÃO, 2007).....	15
Tabela 3.3: Fórmulas utilizadas para o cálculo da variância (VALADÃO, 2007)	16
Tabela 3.4: Perdas de água de utilidades e serviço (ECM, 2012)	19
Tabela 3.5: Fórmulas utilizadas para o cálculo da vazão de água no peneiramento a úmido (GALLERY <i>et al</i> , 2007)	23
Tabela 3.6: Comparação entre os métodos construtivos de barragem de rejeitos (LUZ <i>et al.</i> , 2010).....	54
Tabela 3.7: Contaminantes e respectivas operações/tratamentos para os efluentes industriais (CIMM, 2013).....	58
Tabela 4.1: Regime Operacional da Planta	62
Tabela 4.2: Características do ROM (<i>Run of Mine</i>)	63
Tabela 4.3: Água recirculada do <i>overflow</i> dos espessadores.....	66
Tabela 4.4: Captação e distribuição de água nova e recuperada	68
Tabela 4.5: Caso Base – captação de 70% de água recuperada das barragens.....	70
Tabela 4.6: Caso 1 – captação de 0% de água recuperada das barragens	71
Tabela 4.7: Caso 2 – captação de 90% de água recuperada das barragens	71

RESUMO

As atividades do processamento mineral estão interligadas ao uso da água na maioria de suas etapas. O conhecimento sobre as aplicações e recirculação da água é possível através dos balanços de massas, metalúrgico e de água que quantificam as vazões de água necessárias para cada circuito de operação. A recuperação da água nas barragens de rejeitos, no *overflow* dos espessadores e no filtrado dos filtros, representa diminuição significativa na captação de água nova, atuando como água de processo em etapas como: peneiramento, moagem, classificação, separação magnética e flotação, bem como nas utilidades e serviços da planta. O desenvolvimento de ferramentas que possibilitam o gerenciamento dos recursos hídricos dentro da indústria está atrelado à legislação ambiental e a novas tecnologias que priorizam o uso consciente da água. O estudo de caso apresentado nesse trabalho tornou possível a quantificação da água dentro da usina de beneficiamento e evidenciou que do total de água requerida às utilizações da mina e usina, obteve-se a recuperação de 53,07% de água da barragem de rejeitos, a captação de água nova alcançou 46,93% e a recirculação foi de 87,67% de água do *overflow* dos espessadores destinada às aplicações de processo, mostrando que o reúso da água é imprescindível na indústria mineral. O reúso da água e a diminuição da geração dos efluentes aquosos, significa a redução dos custos na captação de água nova, no tratamento de efluentes industriais e no consumo de energia, contribuindo dessa maneira na otimização de todo o processo de produção e gerando aos produtos finais alto valor agregado no mercado consumidor.

Palavras-chave: Água, Utilizações, Reúso, Gerenciamento.

ABSTRACT

The activities in mining processes are connected with the use of water in most of its stages. The knowledge in applying and recycling water is possible through mass, metallurgical and water balancing in which quantify the water flow needed for each operation level. The recovery of water at tailing dams, thickener overflow and the water at the filterer represents a substantial reduction on new water flow acting as process water in stages like screening, grinding, classification, magnetic separation, flotation and plant utilities and services. The development of tools that make possible for the administration of water resources inside the industry is dependent to the legislation concerning this topic as well as new technologies, in which elevates the priority in the conscious use of water. The study presented in this work makes the quantifying of water inside the process plant possible and highlights that the total water required by the mine and plant, 53,07% water was obtained as recovery in the tailings dam, 46,93% from new water flow and 87,67% from the recycling of water from the thickener's overflow, destined to applications in the process, showing that the reutilization of water is indispensable in the mining industry. Reutilizing the water and reducing the generation of liquid waste means reduction of costs acquiring new water, treating industrial waste products, power consumption and contributes to the optimization of all industrial process tree elevating the overall inherent value of its products in the consumer market.

Keywords: Water, uses, reutilization, management.

1. INTRODUÇÃO

A água é o principal insumo utilizado em quase todas as etapas do processamento mineral, desde a captação de água nova, destinada ao *start up* (partida) da usina de beneficiamento e aplicações para etapas diferenciadas como a preparação de reagentes, selagem das bombas de polpa e água potável, até a recuperação e/ou recirculação de água na barragem de rejeitos, no *overflow* dos espessadores, e no filtrado dos filtros.

Na elaboração de uma rota de processo são desenvolvidos balanços de massas e metalúrgicos, que usualmente envolvem a quantificação de entradas e saídas de água e do minério presentes nas usinas de beneficiamento. Estes irão influenciar de maneira significativa o desenvolvimento dos projetos de mineração.

A quantificação da água necessária nas partidas e paradas da usina de beneficiamento será realizada através do balanço de água, que possibilita o cálculo sobre a vazão de água que deverá ser captada, o consumo de água necessária aos locais de utilização na usina (moagem, peneiramento, classificação, flotação, etc.) e quanto ao seu reúso dentro das etapas do circuito.

A determinação do balanço hídrico na utilização da água no processamento mineral é fundamental para o controle da quantidade e qualidade da água que será distribuída na planta.

O gerenciamento do uso da água será realizado de acordo com as aplicações legais da constituição brasileira e também através da tecnologia que busca apresentar a realidade das usinas de beneficiamento referente às utilizações e ao reúso da água no processamento mineral, com objetivos de maximização do reúso da água e a diminuição da geração dos efluentes aquosos, contribuindo para o uso racional e eficiente da água, além de agregar valor econômico aos produtos desenvolvidos a partir de ações que visam a conservação e racionalização do uso da água.

2. OBJETIVO E RELEVÂNCIA

O objetivo deste trabalho visa compreender o desenvolvimento dos balanços de massas e água, utilizações e reúso da água no beneficiamento do minério de ferro nas diferentes etapas do circuito, tratamento, monitoramento, gerenciamento da água e apresentar um estudo de caso baseado em uma situação real, adaptado e modificado, para exemplificar quantitativamente o consumo de água na indústria mineral.

A relevância deste estudo engloba a importância do conhecimento relativo às utilizações, reúso e gerenciamento da água, que possibilita a ação de práticas de racionalização e conservação do uso da água dentro das empresas de mineração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Uso da água na mineração do minério de ferro

A água é um dos insumos mais utilizados nas atividades de mineração e de grande valor econômico e ambiental. Sua utilização engloba vários processos no beneficiamento de minérios, que empregam a separação a úmido em operações como: cominuição (moagem), classificação (ciclonagem), separação magnética, flotação, pelotização e outras (ANA, 2006).

Por se tratar de um recurso escasso e de extrema importância para o meio ambiente, o uso da água deve ser racionalizado dentro da indústria. Dessa forma, torna-se importante a recuperação da água em espessadores, barragens de rejeitos e filtros, que representa a redução na captação de água nova, minimização na geração de efluentes para o meio ambiente e redução dos custos operacionais, otimizando a relação entre consumo de água e uso racional dentro da usina.

O controle da qualidade da água que entra no circuito de beneficiamento deve ser realizado e especificado de acordo com as aplicações da mesma dentro do processo, bem como nos efluentes aquosos gerados que serão descartados no meio ambiente após o devido tratamento físico, químico e biológico.

3.2 Balanço de massas e metalúrgico

Para o desenvolvimento dos projetos de mineração é fundamental a elaboração do balanço de massas e metalúrgico, que consistem nos cálculos de entrada (alimentação), saídas (produtos finais) e erro de fechamento (perdas) no processamento mineral.

A concentração dos minérios envolve uma separação de espécies minerais que comumente é representada em dois produtos: concentrado e rejeito. O concentrado apresenta somente o elemento útil, enquanto que o rejeito contém o elemento não útil (VALADÃO, 2007).

As características dos vários fluxos de um processo na usina de beneficiamento determinam a qualidade dos produtos finais ou intermediários após tempos variados de operação, são elas: percentagem de sólidos, vazão de água, distribuições granulométricas, granulo químicas e mineralógicas, dentre outras, essas variáveis podem ser determinadas continuamente através de amostragens sistemáticas realizadas dentro de um mesmo período de análise, segundo relatório da CEMI, indisponível para acesso.

Para a elaboração dos balanços de massas e metalúrgico devem ser levados em conta os critérios de produção e operação da usina, o que torna importante a procura de referências em processos conhecidos, sendo decisivos para o fechamento e elaboração dos mesmos a definição das cargas circulantes no circuito e o fechamento do balanço de água (ECM, 2012).

A quantificação da recuperação mássica e metalúrgica é realizada através de equações, como pode-se analisar na Tabela 3.1, sua determinação está relacionada a uma incerteza, visto que a avaliação das massas (por pesagem) e dos teores (por análise química) poderá conter erros inerentes ao processo de coleta de informações (VALADÃO, 2007).

Tabela 3.1: Fórmulas para elaboração dos cálculos dos balanços de massas e metalúrgico (VALADÃO, 2007)

Função do cálculo	Fórmula
Determinação das massas de entrada e saída no balanço	$A = C + E$
Determinação das massas e teores de entrada e saída no balanço	$Aa = Cc + Ee$
Recuperação em massa	$R_{mássica} = \frac{C}{A} = \frac{(a - e)}{(c - e)}$
Recuperação metálica	$R_{metálica} = \frac{Cc}{Aa} = \frac{c(a - e)}{a(c - e)}$
Relação de enriquecimento	$R_e = \frac{c}{a}$
Razão de concentração	$R_c = \frac{A}{C}$
Onde	
<p>A = massa da alimentação C = massa do concentrado E = massa do rejeito a = teor de uma determinada espécie i na alimentação c = teor da espécie i no concentrado e = teor da espécie i no rejeito</p>	

As correções dos erros presentes nos cálculos das recuperações são realizadas através da variação de R em relação aos teores da alimentação, concentrado e rejeito, onde obtém-se a derivação parcial da equação referente a recuperação metálica (Tabela 3.2), e a variância presente na determinação de R (VR) será fornecida pela equação na Tabela 3.3,

onde V_a , V_c e V_e são as variâncias associadas a determinação dos teores a , c , e (VALADÃO, 2007).

Tabela 3.2: Fórmulas utilizadas para derivação parcial da equação de recuperação metalúrgica (VALADÃO, 2007)

Função do cálculo	Fórmula
Determinação da variação da recuperação metálica em relação aos teores da alimentação, concentrado e rejeito	$\frac{\partial R}{\partial a} = \frac{100 \cdot ce}{a^2(c - e)}$
	$\frac{\partial R}{\partial c} = \frac{100 \cdot e(a - e)}{a(c - e)^2}$
	$\frac{\partial R}{\partial e} = \frac{100 \cdot c(c - a)}{a(c - e)^2}$
Onde	
<p>a = teor de uma determinada espécie i na alimentação c = teor da espécie i no concentrado e = teor da espécie i no rejeito ∂ = derivada parcial</p>	

Tabela 3.3: Fórmulas utilizadas para o cálculo da variância (VALADÃO, 2007)

Função do cálculo	Fórmula
Determinação da variância associada ao cálculo de R (VR)	$VR = \left(\frac{\partial R}{\partial a}\right)^2 \cdot Va + \left(\frac{\partial R}{\partial c}\right)^2 \cdot Vc + \left(\frac{\partial R}{\partial e}\right)^2 \cdot Ve$
Onde	
<p>a = teor de uma determinada espécie i na alimentação c = teor da espécie i no concentrado e = teor da espécie i no rejeito ∂ = derivada parcial Va = variância associada à determinação do teor de alimentação Vc = variância associada à determinação do teor do concentrado Ve = variância associada à determinação do teor do rejeito</p>	

O erro será aproximadamente 2σ (σ = desvio padrão), para um intervalo de confiança de 95%, considerando-se uma distribuição normal (VALADÃO, 2007).

A análise de separação refere-se a quantificação da qualidade da separação da operação de beneficiamento. Essa avaliação pode ser feita através da fórmula de Índice de Seletividade (IS) proposta por *Gaudin* (VALADÃO, 2007).

Quando se dispõe de um número maior de dados que o necessário para o fechamento de um balanço de massas tem-se o balanço redundante. Essa condição possibilita a avaliação e o monitoramento das etapas de beneficiamento, pois é necessário a redundância de dados para o ajuste matemático das informações adquiridas, o que reduz o erro inerente ao processo de amostragem manual ou automática, segundo relatório da CEMI, indisponível para acesso.

O uso de sistemas inteligentes, através das ferramentas de programação matemática e *softwares*, contribui para o desenvolvimento de métodos matemáticos apurados para ajustes dos dados da planta, simulação e controle das diversas operações unitárias, adequando o funcionamento e qualidade de produção na usina.

3.3 Balanço de água

Para a quantificação da água necessária ao beneficiamento mineral é desenvolvido o balanço de água macro, onde são identificados os consumos gerais de água da usina, estando os mesmos correlacionados aos balanços de massas e metalúrgico do minério.

Nos projetos de mineração o balanço de água macro compreende as entradas, que são representadas, comumente, pela água recuperada da barragem de rejeitos, espessadores e dos filtros, bem como água nova captada e água contida no ROM (*Run of Mine*), representada pela umidade.

As saídas de água, que comumente englobam o *underflow* dos espessadores de rejeito/lamas, água contida no produto final, perdas internas e externas, utilidades e serviços que atendem, por exemplo, a selagem das bombas de polpa da usina, *make up* (reposição) nas torres de resfriamento, preparação de reagentes, água potável, aspersão de pilhas e abatimento de pó.

Um exemplo de balanço de água esquemático é mostrado Figura 3.1, nele estão calculadas as entradas e saídas de água que devem apresentar o mesmo valor em m^3/h de vazão, essa condição indica o fechamento do balanço de água.

Nesse balanço de água, a recuperação de água da barragem de rejeitos/lamas foi considerada igual a 55% (ECM, 2012).

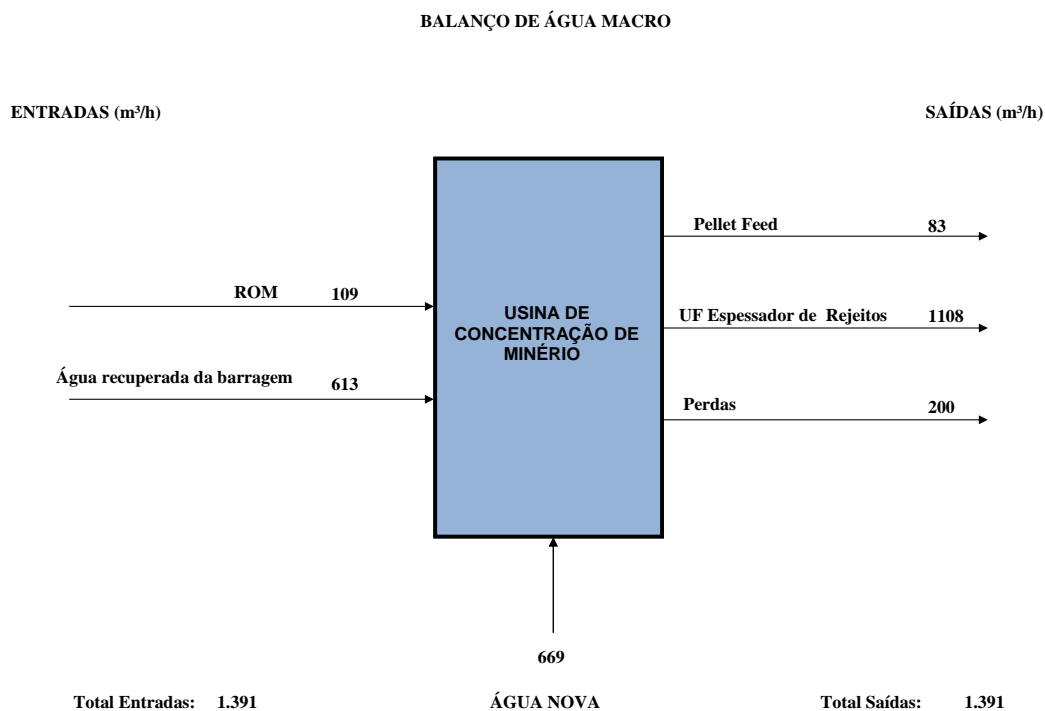


Figura 3.1: Balanço Macro de Água (ECM, 2012)

Para cada tipo de função/aplicação são utilizados critérios que avaliarão a vazão (m^3/h) e a qualidade da água exigidas no circuito requerido (Tabela 3.4).

Na ilustração da Tabela 3.4, utilizada principalmente para o cálculo das perdas de água de utilidades e serviço, constam informações sobre as aplicações de água, os números de pontos de distribuição que deverão ser atendidos, a vazão unitária e total requerida para cada utilização, a simultaneidade, ou seja, quantos pontos de consumo serão utilizados ao mesmo tempo, a vazão média de consumo, calculada a partir da multiplicação entre a vazão total e a simultaneidade, a recuperação que existe em cada aplicação, e as perdas de água durante o processo (ECM, 2012).

Tabela 3.4: Perdas de água de utilidades e serviço (ECM, 2012)

UTILIDADES E SERVIÇO - USINA							
Aplicação	Número	Q unit. (m ³ /h)	Q total (m ³ /h)	Simultaneidade	Q média (m ³ /h)	Recuperação	Perdas (m ³ /h)
Serviço	200,0	6,5	1.300,0	7,5%	97,5	60,0%	39,0
Selagem de bombas de polpa	44,0	2,8	122,8	100,0%	122,8	90,0%	12,3
Reposição de torre de resfriamento	2,0	5,9	11,8	100,0%	11,8	0,0%	11,8
Água potável	1,0	5,2	5,2	100,0%	5,2	0,0%	5,2
Preparação de reagentes					136,8	100,0%	0,0
Aspersão			100,0	100,0%	100,0	0,0%	100,0
Total					474,1		168,3

A fonte de água que abastecerá as necessidades da usina é de extrema importância para a viabilidade do empreendimento mineral, determinando até mesmo a localização da usina de beneficiamento, dessa forma é fundamental a análise crítica da qualidade e quantidade da água utilizada nas diferentes operações de processamento mineral.

3.4 Água na Moagem

Dentre as utilizações e distribuições da água destaca-se a etapa da moagem, que será alimentada com minério e água de diluição e, eventualmente, soda cáustica para aumento de dispersão da polpa e diminuição das taxas de desgaste dos corpos moedores (ECM, 2012).

A moagem compreende as operações de cominuição na granulometria abaixo de 19,05 mm e é realizada através dos mecanismos de compressão, impacto e abrasão (CHAVES e PERES, 2012).

Os moinhos de bolas, de barras e de seixos, compreendem os equipamentos mais importantes e de grande aplicação na etapa de cominuição de minério de ferro. São constituídos por um corpo cilíndrico que gira em torno de seu eixo, sendo revestidos internamente por material metálico ou de borracha. Os munhões sustentam todo o moinho (carcaça, revestimento, tampas, corpos moedores, minério e água contidos no seu interior) e giram dentro de mancais (Figura 3.2) (CHAVES e PERES, 2012).

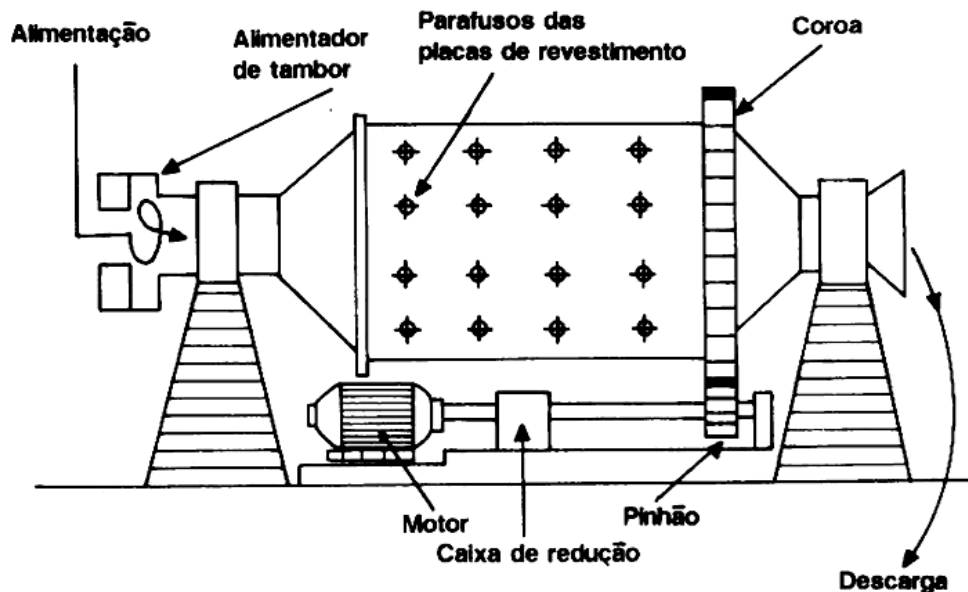


Figura 3.2: Representação esquemática de um moinho de bolas (SALES, 2009)

A granulometria da alimentação e a percentagem de sólidos requerida no moinho estarão interligados à quantidade de água de diluição que será acrescentada durante a etapa.

Como várias etapas do processamento mineral, a moagem possui como variáveis de controle operacional a taxa de alimentação, granulometria da alimentação e do produto moído, percentagem de carga circulante e de sólidos, grau de enchimento do moinho, que devem ser muito bem estabelecidas dentro de parâmetros de produção adotados para a obtenção do produto moído (SALES, 2009).

No caso da moagem de bolas utiliza-se uma percentagem de sólidos, em peso, variando de 65 a 80%, dependendo do tipo de minério (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). É notório que a água de diluição tem grande importância para a formação da polpa na etapa da moagem a úmido, possibilitando também o transporte do produto da moagem para as etapas subsequentes, através de bombeamento.

A malha de controle do circuito da moagem, conforme esquematizado na Figura 3.3, será determinada a partir das necessidades de tamanho da alimentação e do produto, sendo influenciada pelas variáveis operacionais (SALES, 2009):

- a) taxa de alimentação: normalmente controlada em função da granulometria do produto moído;
- b) granulometria da alimentação (F_{80}): normalmente controlada na operação unitária que antecede a moagem;
- c) granulometria do produto moído (P_{80}): normalmente controlada na operação unitária subsequente a moagem;
- d) % de carga circulante (cc): controlada pela pressão e percentagem de sólidos na alimentação da ciclona que fecha circuito com o moinho;
- e) grau de enchimento do moinho: controla o nível de enchimento do moinho (reposição da carga moedora).

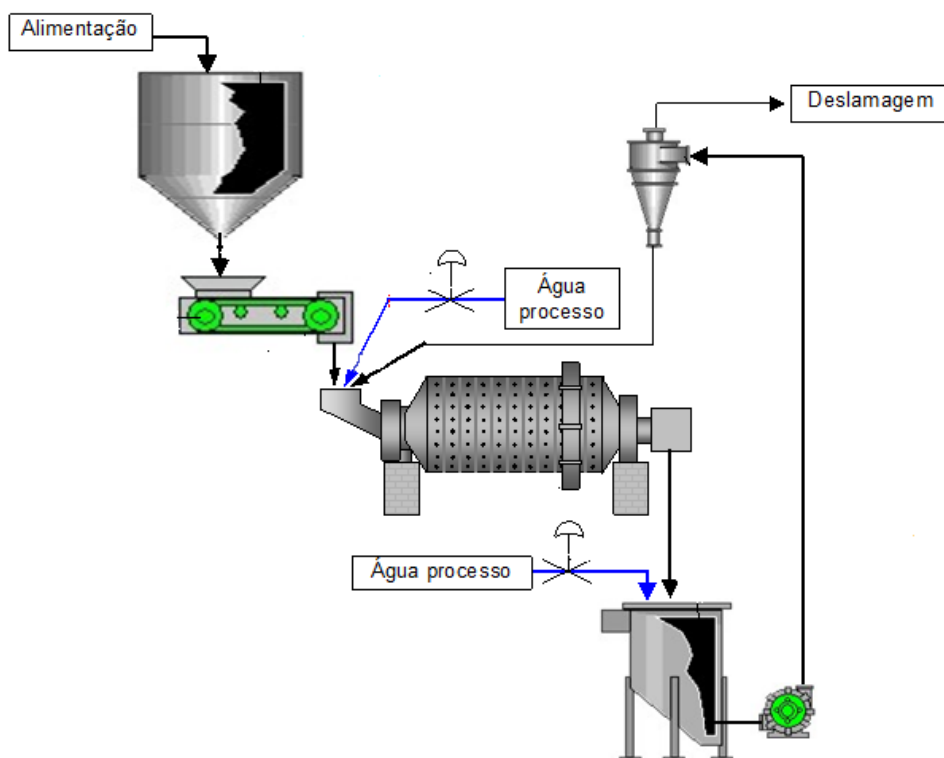


Figura 3.3: Fluxograma esquemático para circuito fechado de moinho de bolas (SALES, 2009)

A água de processo necessária para a diluição da alimentação total do moinho será adicionada (abertura da válvula) a partir dos dados coletados sobre: as taxas de

alimentação nova e da carga circulante (cc) em t/h, as densidades da polpa e percentagens de sólido correspondente a cada alimentação.

A água de diluição da classificação será acionada na caixa de polpa, que recebe o produto da moagem, mediante ao controle do nível de polpa na mesma, possibilitando a adequação da percentagem de sólidos requerida para a alimentação da classificação da moagem de bolas.

3.5 Água no Peneiramento

O peneiramento é a operação de separação de uma população de partículas em duas frações de tamanhos diferentes, mediante a sua apresentação a um gabarito de abertura fixa e predeterminada. Os dois produtos são denominados *undersize* (passante) e *oversize* (retido) (CHAVES e PERES).

O peneiramento pode ser “a seco” quando é realizado com o material na sua umidade natural, e “a úmido” ou “via úmida” quando o material é alimentado na forma de polpa ou recebe água adicional por meio de *sprays* (espargidores) convenientemente dispostos sobre os *decks* de peneiramento (CHAVES e PERES).

Segundo CORREIA (2010), a adição de água no peneiramento a úmido facilita a passagem de finos através da tela de peneiramento, colaborando para separar o minério grosso do fino.

No peneiramento a úmido são utilizados jatos de água através de bicos instalados em tubos transversais com pressão entre 1 e 3 atm (Figura 3.4).



Figura 3.4: *Sprays* de água nas peneiras vibratórias (Arquivo Pessoal, 2011)

A vazão de água para a peneira (V) pode ser calculada pela equação mostrada na Tabela 3.5:

Tabela 3.5: Fórmulas utilizadas para o cálculo da vazão de água no peneiramento a úmido (GALLERY *et al*, 2007)

Função do cálculo	Fórmula
Determinação da vazão de água no peneiramento	$V = K_p \cdot C$
Onde	
K_p = fator (1 – 1,5 material limpo, e 1,5 – 3 material com argila)	
C = capacidade da peneira em m^3/h	

Os peneiramentos industriais a seco são realizados, normalmente, em frações granulométricas até 6 mm, podendo atingir frações granulométricas até 1,7 mm com eficiência razoável de peneiramento. A úmido, o peneiramento industrial compreende

uma granulometria de até 0,4 mm, sendo que recentemente tem sido possível peneirar partículas mais finas, da ordem de 50 μm (CORREIA, 2010).

Os equipamentos de peneiramento compreendem: as grelhas (fixas e vibratórias), as peneiras DSM, rotativas (*trommel*), vibratórias horizontais, vibratórias inclinadas e de alta frequência (Figura 3.5).

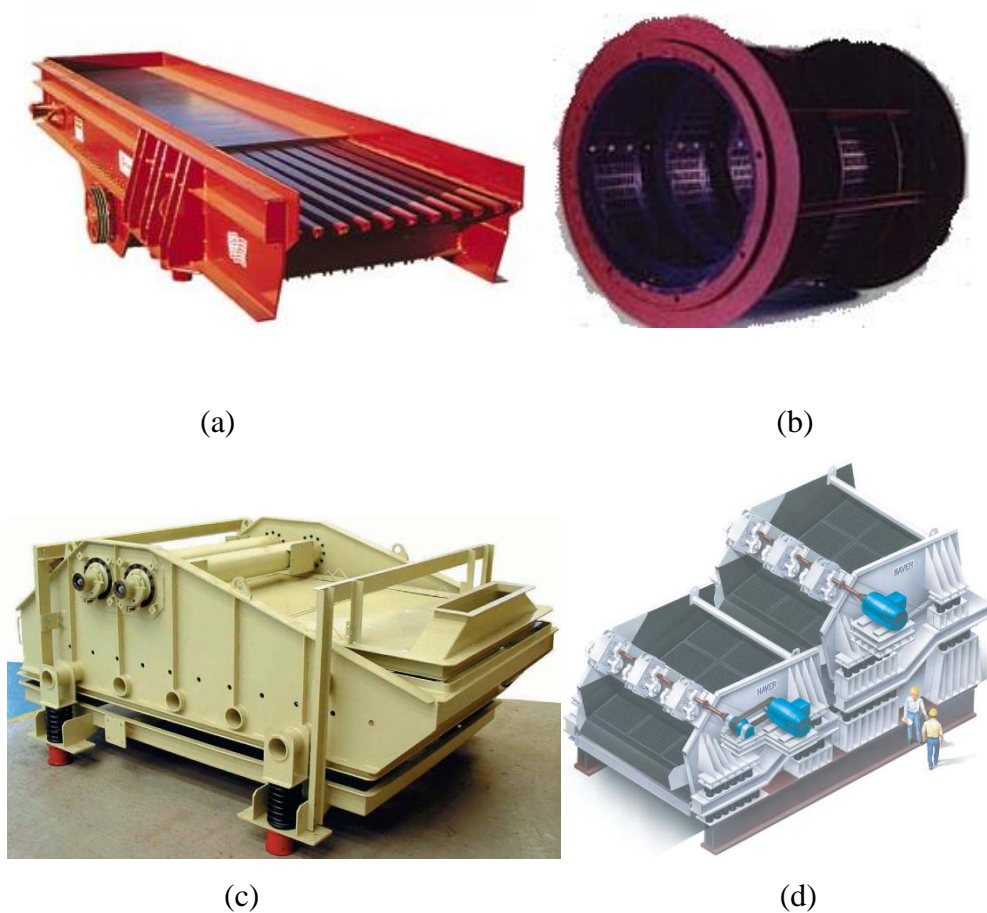


Figura 3.5: Grelha Fixa (a), Peneira Rotativa (b), Peneira Vibratória Horizontal (c), Peneira Banana (d) (METSO, 2013)

As peneiras vibratórias (Figura 3.6) são constituídas por um chassi robusto, apoiado em molas, um mecanismo acionador do movimento vibratório e um, dois ou três suportes para as telas (*decks*) (CHAVES e PERES).

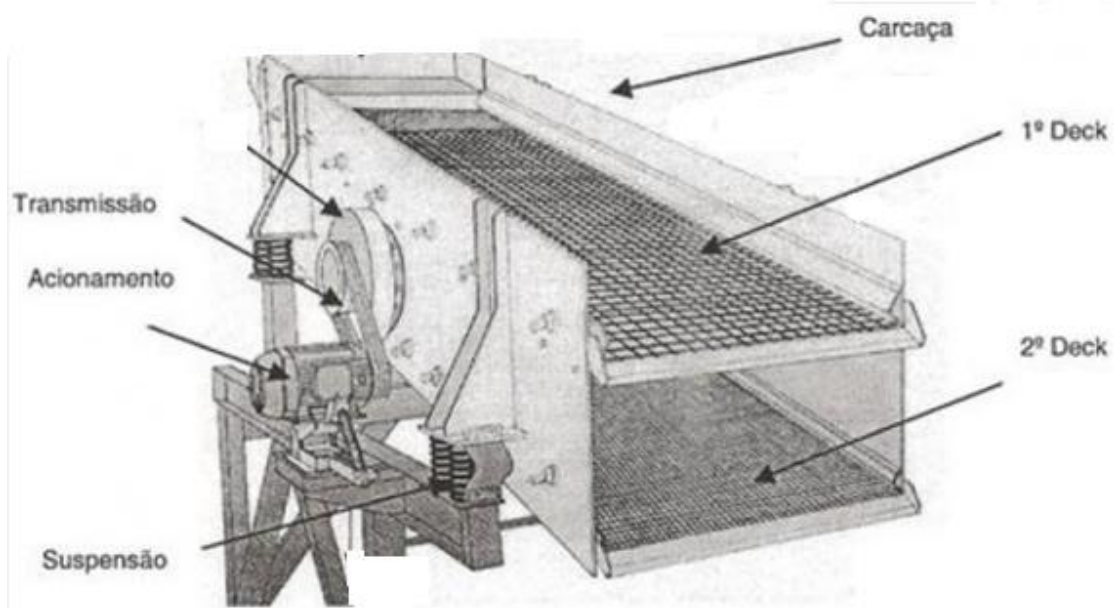


Figura 3.6: Constituição de uma peneira vibratória inclinada (MSR, 2013)

Um dos mecanismos que influenciam no peneiramento é a estratificação da camada de material, nele as partículas menores tendem a escoar pelos espaços vazios existentes entre as partículas maiores, dessa maneira a ação da vibração deve estratificar o leito de modo que as partículas maiores fiquem por cima e as menores por baixo (GALLERY *et al*, 2007).

É importante avaliar os fatores que influenciam no comportamento das partículas, tais como:

- a) a área e a forma da superfície de peneiramento;
- b) o tipo de superfície;
- c) a inclinação da superfície;
- d) a umidade do material;
- e) a forma da partícula;
- f) a granulometria da alimentação;

- g) o fluxo da alimentação e a espessura da camada de material sobre a superfície;
- h) o ângulo de incidência da alimentação.

Para a escolha do tipo de peneira vibratória convencional, os fabricantes de equipamentos levam em consideração aspectos como: massa de alimentação; granulometria da alimentação; densidade aparente do material; tamanho máximo na alimentação (*top size*); umidade; forma das partículas; tipo de peneiramento (a seco ou a úmido); *layout* da usina; produtos finais (GALERY *et al*, 2007).

3.6 Água na Classificação

A classificação é a separação de uma população original (denominada “alimentação”) em duas outras populações, que diferem entre si através da distribuição relativa dos tamanhos das partículas que as constituem: população grossa (composta por partículas com dimensões superiores às da alimentação) e fina (composta por partículas com dimensões menores às da alimentação) (CHAVES, 2007).

A operação de classificação é realizada pela ação do meio fluido em movimento dentro do aparelho, de forma que a fração grosseira afunde podendo ser retirada por baixo do equipamento (*underflow*) e a fração fina seja arrastada pela corrente fluida, sendo descarregada por cima do aparelho (*overflow*) (CHAVES, 2007).

Os equipamentos de classificação atuam em faixas granulométricas em que o peneiramento industrial mostra baixa eficiência e utiliza a gravidade ou a centrifugação, são representados por equipamentos como: classificadores hidráulicos, os mecânicos e os hidrociclones (GALERY *et al*, 2007).

3.6.1 Ciclonagem

Os hidrociclones apresentam vasta aplicação na atividade de tratamento mineral. Dentre elas podem ser citadas (SAMPAIO, 2007):

- a) no circuito fechado de moagem, com a classificação da alimentação da moagem;

- b) na deslamagem de minérios para alimentação da flotação, para a remoção de partículas menores que $10\ \mu\text{m}$;
- c) nas operações de desaguamento.

A configuração dos hidrociclones (Figura 3.7), compreende um vaso com parte em formato cilíndrico e parte em formato cônico, dotado de uma abertura de entrada, onde é efetuada a alimentação e duas aberturas de saída, sendo que a saída da extremidade inferior da porção cônica é denominada *apex* (*underflow*) e a saída na posição central da base superior da porção cilíndrica é chamada *vortex finder* (*overflow*) (CHAVES, 2007).

Para a classificação de granulometria fina, entre $837\ \mu\text{m}$ e $2\ \mu\text{m}$, os hidrociclones são equipamentos muito utilizados na atualidade nas indústrias de mineração (GALERY *et al*, 2007).

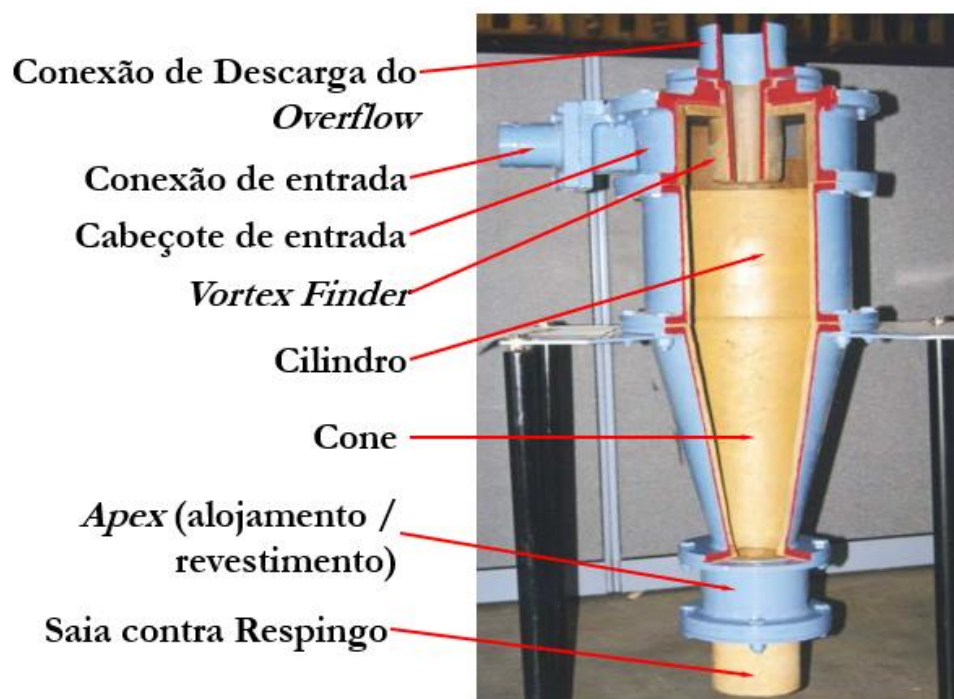


Figura 3.7: Desenho esquemático das seções e/ou partes de um hidrociclone (SALES, 2009)

As etapas de classificação da moagem de bolas e a deslamagem utilizam comumente água de diluição na alimentação das baterias de hidrociclones, o *overflow* dessa classificação é composto por material muito fino, que poderá ser encaminhado para a barragem de lamas (ECM, 2012).

As variáveis operacionais existentes no funcionamento dos hidrociclones (Figura 3.8) podem ser estabelecidas pelos seguintes itens:

- percentagem de sólidos na alimentação: o aumento dessa variável tende a aumentar o diâmetro de corte. Assim, quanto maior o valor desta variável, as partículas mais grossas enfrentarão mais obstáculos para atravessar a zona de centrifugação;
- distribuição granulométrica na alimentação: determina a relação entre as frações retida e passante na malha de classificação, ou seja, os sólidos residuais no *overflow*, que determinarão o diâmetro de classificação;
- pressão da alimentação: aumentando a pressão da alimentação significa maior chance de decantação centrífuga às partículas menores, diminuindo o diâmetro de corte.

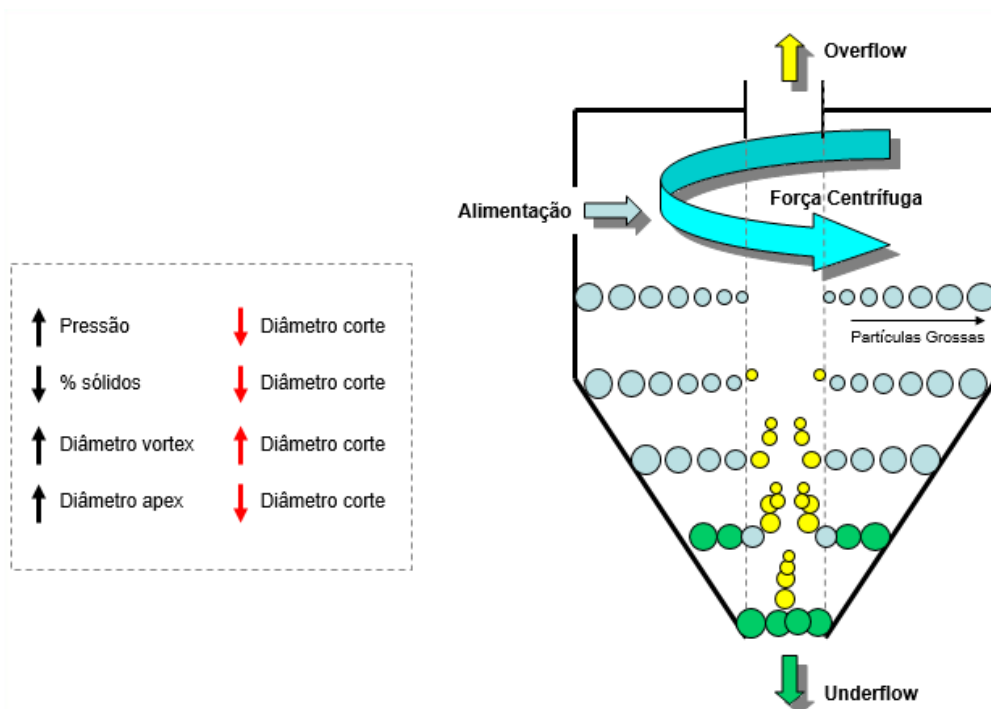


Figura 3.8: Variáveis operacionais e as forças de atuação no hidrociclone (SALES, 2009)

O controle da percentagem de sólidos está correlacionado à adição de água de diluição na alimentação das baterias de hidrociclones, logo, é de grande interesse estabelecer o

melhor parâmetro de execução para essa variável, pois ela irá impactar diretamente a eficiência do processo.

A malha de controle da operação dos hidrociclones (Figura 3.9) será trabalhada através da abertura ou fechamento da válvula de adição de água na caixa de bomba, relacionando a percentagem de sólidos e a densidade da polpa na alimentação do(s) hidrociclone(s) com o nível de polpa na caixa de bomba.

O *set point* da malha, geralmente inserido pelo operador de campo, indicará qual será a posição da válvula de adição de água para diluição da polpa (ARAÚJO, 2010).

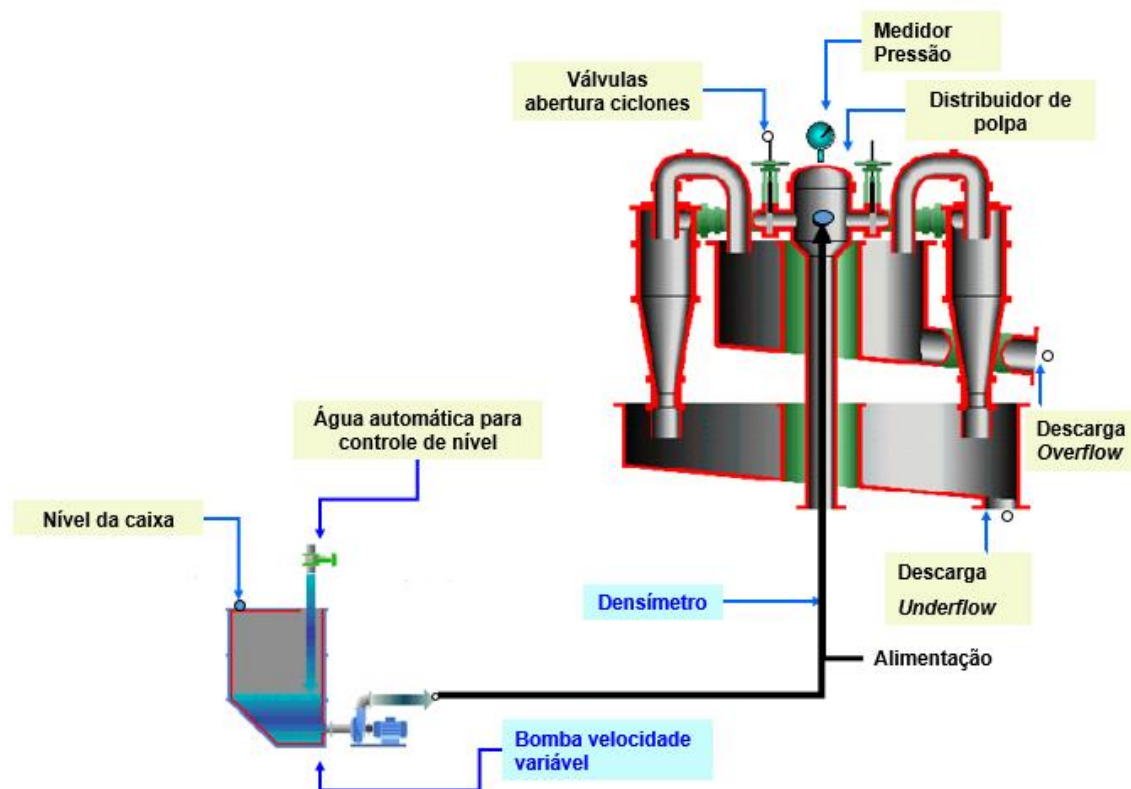


Figura 3.9: Fluxograma de engenharia esquemático para alimentação de uma bateria de hidrociclones (Arquivo Pessoal, 2012)

3.6.2 Classificação Espiral

Os classificadores espirais são equipamentos que apresentam grande simplicidade e robustez, utilizados para separações granulométricas que compreendem a uma faixa de 0,8 mm a 44 μm (GALLERY *et al*, 2007).

São constituídos de um tanque, sendo que em seu interior encontra-se um eixo envolvido por uma ou mais hélices, as quais, girando, mantêm a polpa em suspensão. Essas hélices, têm a função de remover o material sedimentado do fundo da calha (Figura 3.10) (CORREIA, 2010).

O conjunto como um todo apresenta vários níveis de inclinação, sendo esta uma variável de processo. O classificador em espiral é normalmente caracterizado pelo diâmetro da espiral (CORREIA, 2010).

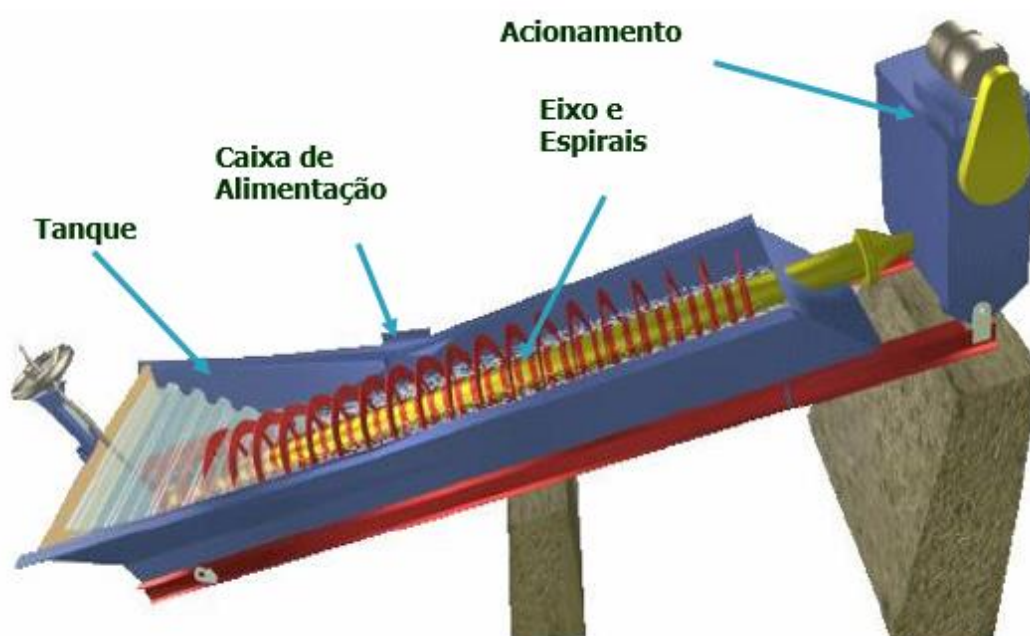


Figura 3.10: Desenho Esquemático Classificador Espiral (Adaptado Engendrar, 2013)

O material mais fino transborda pelo vertedouro (*overflow*), ao passo que o material grosseiro afunda, sendo arrastado calha acima pela espiral e descarregado como *underflow* (Figura 3.11). Nas usinas de beneficiamento de ferro é empregado para controle da moagem e também para a obtenção de *Sinter Feed* (GALERY *et al*, 2007).



Figura 3.11: Classificador Espiral ITM D Pico (Arquivo pessoal, 2011)

As principais variáveis compreende (SALES, 2009):

- a) inclinação: variável de processo, alterando com a mudança da altura dos apoios das aparas do equipamento de 10° a 20° ;
- b) área de transbordo do classificador: é uma das variáveis que afetam a capacidade. Pode ser modificada variando-se a inclinação das paredes laterais do tanque;
- c) imersão da espiral: variando-se a imersão da espiral no banho, varia a agitação induzida por ela no volume de polpa imediatamente junto à superfície do banho, exatamente no ponto onde ela descarrega pelo vertedouro do *overflow*. Se aumentada a altura do vertedor, o que propicia maior submersão, resultará um sistema menos turbulento com classificação mais fina;
- d) diluição da polpa: quanto maior a percentagem de sólidos na alimentação mas grosso será o tamanho do corte.

A adição de água no classificador espiral compreende o ajuste da percentagem de sólidos, impactando na qualidade do *overflow* e na recuperação mássica do *underflow*.

3.7 Água na Separação Magnética

A separação magnética é uma técnica que pode ser utilizada tanto a seco como a úmido, em geral, o método a seco é utilizado para granulometria grossa e o a úmido para mais finas.

É um método de concentração que trabalha com a propriedade dos minerais que ocorre em resposta a existência de um campo magnético, denominada susceptibilidade magnética (LUZ *et al.*, 2010).

De acordo com a susceptibilidade magnética de cada material existem: aqueles que são atraídos pelo campo magnético, que dividem-se em ferromagnéticos, quando atraídos fortemente pelo campo e paramagnéticos que são atraídos fracamente e os que são repelidos por ele, denominados diamagnéticos (LUZ *et al.*, 2010).

A concentração magnética atende amplo campo de aplicação, sendo utilizada em vários tipos de minerais ferrosos e não ferrosos, na remoção de impurezas magnéticas presentes nos minerais industriais, na purificação de águas residuais, na reciclagem de metais contidos em resíduos industriais, dentre outras (LUZ *et al.*, 2010).

No caso do minério de ferro o processo de concentração magnética realizará a separação entre os minerais paramagnéticos (óxidos de ferro) e minerais diamagnéticos (silicatos), utilizando a separação magnética a úmido de alta intensidade, o concentrador tipo Jones (Figura 3.12).

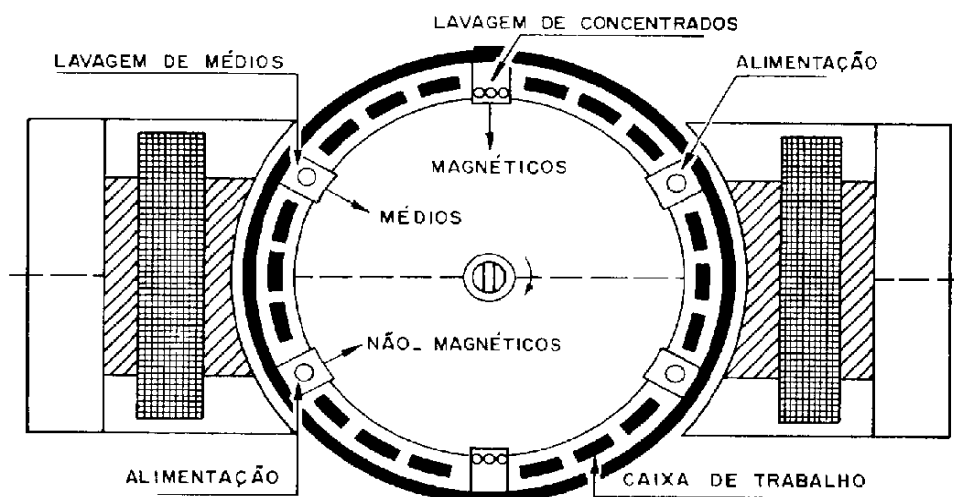


Figura 3.12: Desenho esquemático do concentrador Jones (Adaptado WILLS e NAPIER-MUNN, 2006)

No concentrador tipo Jones (Figura 3.13) existe um anel rotativo (carrossel), que atravessa um campo magnético, no qual são instaladas as matrizes, a alimentação atravessará uma região com campo de alta intensidade.

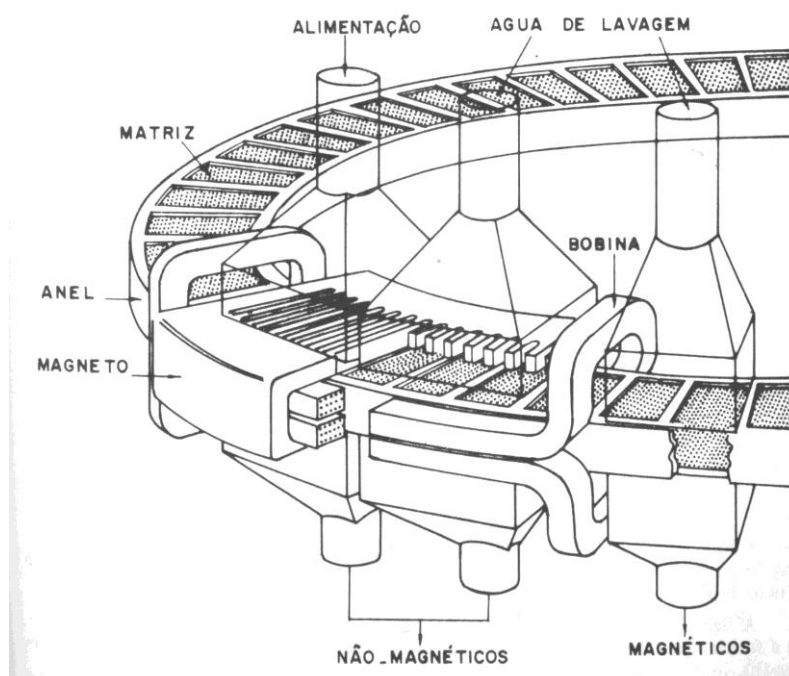


Figura 3.13: Desenho esquemático em perspectiva do concentrador Jones (Adaptado (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006)

Mediante a rotação contínua do equipamento as partículas mistas são descartadas da matriz através de um jato de água de baixa pressão, as não magnéticas são descartadas por arraste hidráulico e pela gravidade (rejeito) e as partículas magnéticas são atraídas pelo magnetismo e ficam aderidas às placas de imantação (concentrado), estas serão desprendidas da matriz após a aplicação de um jato de água de alta pressão em um ponto onde o campo magnético é praticamente nulo (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

A seletividade da separação é influenciada pelas variáveis operacionais que auxiliam no controle do processo, tais como: intensidade de campo magnético, elemento de conversão de fluxo, taxa de alimentação, percentagem de sólidos na polpa, velocidade do anel rotativo ou rotor e descarga das partículas magnéticas (LUZ *et al.*, 2010).

Na separação magnética de média e alta intensidade trabalha-se geralmente com a percentagem de sólidos na alimentação variando de 38 a 48% e a água de lavagem, em m³/h/t, que será adicionada para desprender o concentrado retido nas placas do separador magnético, dependerá do controle das variáveis operacionais, bem como a relação do teor de ferro na alimentação do equipamento, conforme o desenho esquemático Figura 3.14 (ECM, 2012).

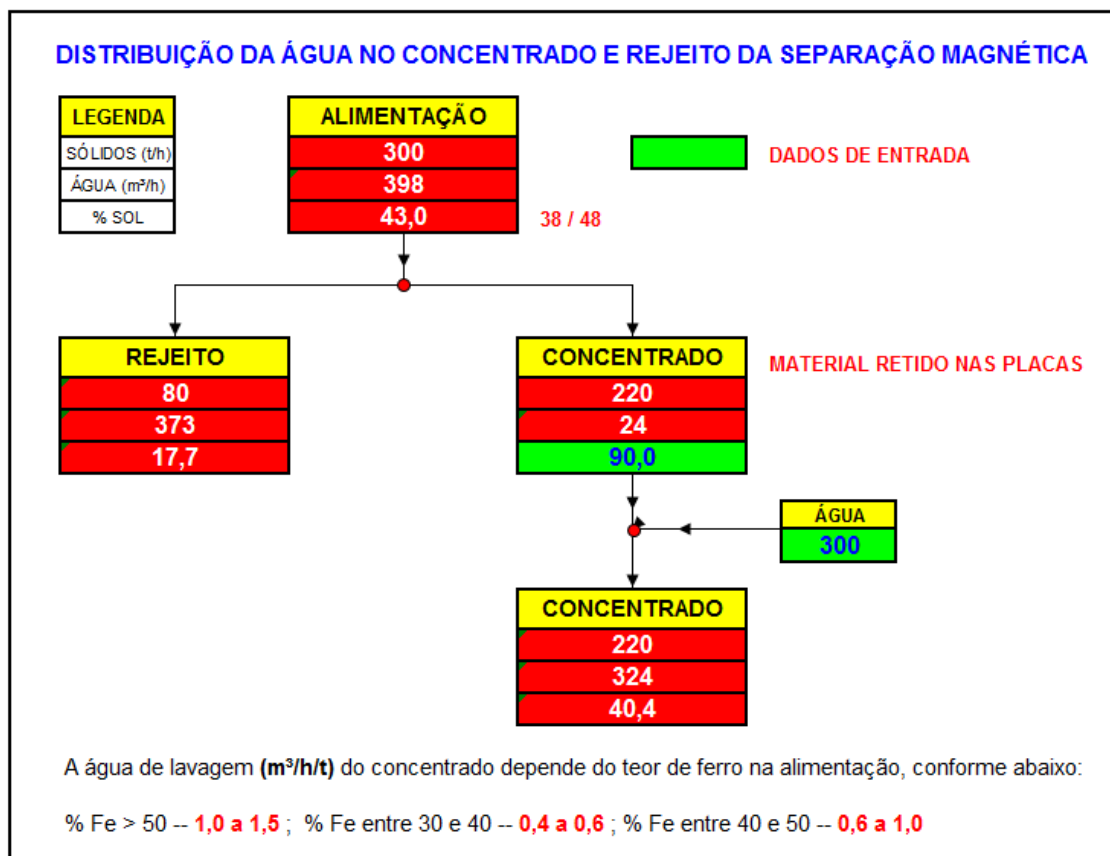


Figura 3.14: Desenho esquemático sobre a distribuição de água no concentrado da separação magnética (ECM, 2012)

3.8 Água na Flotação

A flotação é uma etapa de concentração que explora diferenças das propriedades físico-químicas da superfície dos minerais. Trabalha com misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa (polpa). A seletividade do processo de flotação é obtida através de distintos graus de hidrofobicidade (aversão a água) que as espécies minerais possuem (PERES e ARAUJO, 2009).

A substância hidrofóbica é aquela cuja superfície é essencialmente não polar, o que indica maior afinidade com o ar que com a água, enquanto que a substância hidrofílica é aquela cuja superfície é polar, demonstrando maior afinidade com a água que com o ar (PERES e ARAUJO, 2009).

Como na natureza poucas são as espécies minerais naturalmente hidrofóbicas, torna-se necessária a adição de reagentes químicos para que ocorra a diferenciabilidade entre as

espécies. Isso é possível mediante a capacidade das partículas hidrofóbicas se prenderem a bolhas de gás e assim a densidade do conjunto partícula-bolha torna-se menor que a do fluido e o conjunto se desloca verticalmente para a superfície, onde fica retido e é separado numa espuma, enquanto que as partículas das demais espécies minerais mantém inalterada a sua rota (LUZ *et al.*, 2010).

Desta maneira, as partículas hidrofobizadas serão arrastadas junto às bolhas de ar ao ponto mais alto do equipamento (célula mecânica e coluna de flotação), enquanto que as partículas hidrofílicas afundarão, por gravidade, no fundo do equipamento, de onde poderão ser retiradas e direcionadas para outros estágios de flotação, conforme Figura 3.15, Figura 3.16 e Figura 3.17 (BALTAR, 2008).

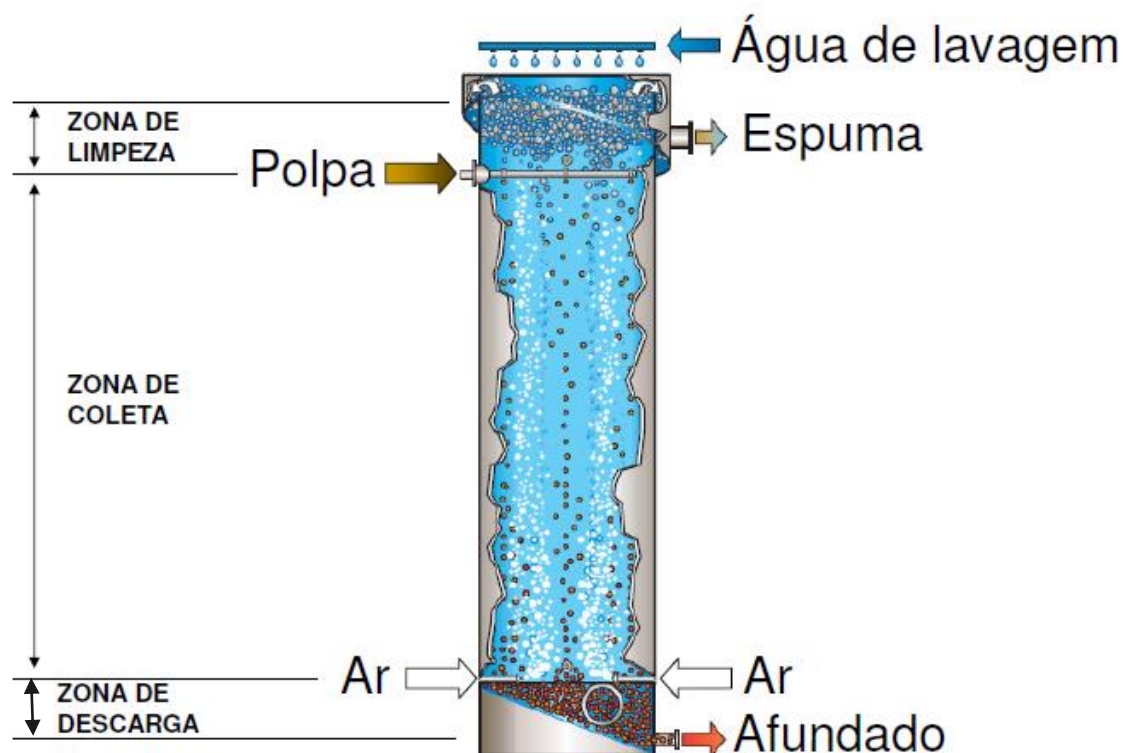


Figura 3.15: Desenho esquemático de uma coluna de flotação (VIANA, 2012)



Figura 3.16: Coluna de flotação em teste de laboratório para minério de ferro (Arquivo pessoal, 2009)



Figura 3.17: Bancos de Células de Flotação (VIANA, 2012)

É extremamente importante a compreensão dos reagentes químicos que são utilizados no processo de flotação, eles possuem a função de induzir e inibir a afinidade das partículas

minerais pelas bolhas de ar, e podem ser denominados como coletores, espumantes, depressores, ativadores e modificadores de pH (ANA, 2006).

Os coletores são reagentes que agem na interface sólido-líquido, alterando a superfície mineral, que realiza a modificação do caráter hidrofílico da partícula para hidrofóbico, sua estrutura molecular é composta de uma porção de natureza apolar (covalente) e de outra porção de natureza polar (iônica). A parte polar pode apresentar diversas funções e a parte apolar é sempre uma cadeia orgânica, de comprimento variável, podendo ser linear, ramificada e até cíclica (LUZ *et al.*, 2010).

Os espumantes são compostos tenso-ativos heteropolares, não ionizáveis, que apresentam um grupo polar e uma cadeia hidrocarbônica, sendo capazes de se adsorverem na interface água/ar. Sua principal função na flotação é a redução da tensão superficial na interface água/ar, aumentando a resistência das bolhas, tornando-as mais dispersas e estáveis, melhorando as condições para coleta das partículas que foram hidrofobizadas (LUZ *et al.*, 2010).

Os modificadores são reagentes orgânicos ou inorgânicos que possuem como objetivo melhorar a seletividade e/ou recuperação durante a flotação, eles apresentam funções distintas, tais como (PERES e ARAUJO, 2009):

- a) modulação do pH: realizada através da adição de ácidos e bases;
- b) modulação do Eh: importante na flotação de sulfetos, envolve a adição de redutores e oxidantes;
- c) controle do estado de agregação da polpa: mediante adição de dispersantes e agregantes (coagulantes e floculantes);
- d) ativação: pela adição de reagentes capazes de tornar mais eficaz e/ou seletiva a ação dos coletores;

- e) depressão: pela adição de reagentes capazes de inibir a ação do coletor e hidrofilar a superfície dos minerais que corresponderão ao material afundado da flotação.

No caso da flotação de minério de ferro a rota de processo mais utilizada é a catiônica reversa utilizando como coletor a amina que desenvolve a função de coletor-espumante e o amido gelatinizado é utilizado como depressor e soda cáustica para controle do pH, que deve estar em torno de 10,5 para minério de ferro.

A composição química da água é uma variável de controle da flotação, pois a água utilizada no processo de flotação pode conter alta concentração de íons mediante os processos de dissolução da polpa, provocando mudanças significativas na concentração iônica da água, ocorrendo essa situação na água nova e na água recuperada de espessadores e barragens de rejeitos (ANA, 2006).

Os íons presentes na polpa originados pela dissolução de determinadas espécies minerais (Fe^{3+} , Ca^{2+} , Al^{3+}), exercem ação depressora indesejável, a remoção desses íons deve ser realizada antes da ação do coletor, que ocorrerá pela adição de reagentes denominados sequestradores, que precipitam os íons existentes na polpa (LUZ *et al.*, 2010).

O processo de recirculação da água que contém os reagentes da etapa de flotação intensifica a presença desses reativos, o que influencia na recuperação no minério nestas etapas de concentração (ANA, 2006). Deve ser realizado um tratamento adicional antes da reciclagem da água, com o objetivo de remover a concentração iônica das espécies minerais constituintes da polpa.

A presença de compostos orgânicos e inorgânicos, e até mesmo de resíduos sólidos contidos na água de reciclagem podem inviabilizar a flotação, podendo causar sérios danos no processo, tais como: a formação de complexos entre os metais e os íons dos coletores, ambos dissolvidos no meio aquoso, o que reduz o efeito coletor dos íons e a existência de certos cátions no meio aquoso (LUZ *et al.*, 2010).

Assim, é de extrema importância as análises de laboratório para conhecer as características químicas e físicas da água utilizada na etapa da flotação, através da

realização de ensaios com a água que alimentará o circuito e a água que será descartada na etapa final do processo de flotação. Esse controle evitará futuros transtornos nas operações industriais e manterá a qualidade de recuperação metalúrgica do minério (LUZ *et al.*, 2010).

3.9 Sistema de drenagem industrial

O sistema de drenagem industrial é uma rede de canaletas e tubulações que permitem o escoamento do resíduo sólido gerado em uma planta de beneficiamento, direcionando-o para um tanque de contenção ou para uma barragem de rejeitos (ECM, 2012).

A drenagem industrial compreende dois cenários de atuação, são eles (ECM, 2012):

- a) cenário 1 (um): paradas de emergência (em caso de queda de energia);
- b) cenário 2 (dois): regime contínuo de operação de resíduo (sistema de monitoramento e controle do resíduo gerado na usina por meio de uma rota definida de processo).

O sistema de drenagem industrial não promove o aumento da recuperação em massa nas etapas de beneficiamento. Ele atua minimizando as perdas no circuito, contribuindo para a redução de resíduos sólidos que são encaminhados para as barragens de rejeitos.

3.9.1 Cenário 1 – Paradas de emergência

São paradas não programadas ocasionadas por quedas de energia ou interrupção de um determinado fluxo correspondendo a um nó do processo, o que acarreta a parada dos equipamentos pela lógica de controle (intertravamento) (ECM, 2012).

Quando ocorre a parada de emergência as canaletas recebem toda a vazão instantânea relativa ao nó onde ocorreu o intertravamento e demais nós da usina, estes direcionam os fluxos de polpa à caixa de contenção de resíduos ou para a barragem de rejeitos.

3.9.2 Cenário 2 – Regime contínuo de operação de resíduo

Compreende as vazões instantâneas que são referentes as descargas de caixas de bombas, tubulações e vazamentos.

O gerenciamento do regime contínuo de operação de resíduo consiste nas seguintes premissas (ECM, 2012):

- a) criar um fluxograma de processo com balanço de massas por área (Figura 3.18), por exemplo moagem, classificação, flotação, etc;
- b) adotar a percentagem de sólidos média de descarga da área;
- c) retornar o material grosso não concentrado para o circuito de moagem;
- d) dimensionar as bombas de polpa com 10% de *overflow* das caixas de bomba;
- e) direcionar o *overflow* das caixas de bomba para a caixa de retenção de resíduos;
- f) dividir a caixa de resíduo em dois compartimentos;
- g) instalar bombas verticais para fazer a limpeza dos compartimentos;
- h) direcionar o fluxo das bombas verticais para uma caixa dotada de bombas horizontais;
- i) direcionar os fluxos das bombas horizontais para a caixa de bomba da descarga dos moinhos quando estes existirem;
- j) dimensionar o sistema para uma vazão que não ultrapassa a 80% do volume de água de repolpagem injetada na caixa de bomba da descarga do moinho;

- k) partir da premissa que 10% da massa alimentada por área corresponde a perda. Este valor deverá ser ajustado para atender o volume de 80% da água de repolpagem da caixa de bomba do moinho primário;
- l) o balanço de massas deverá entrar no fluxograma de processo da moagem como fluxo alternativo (eventual).

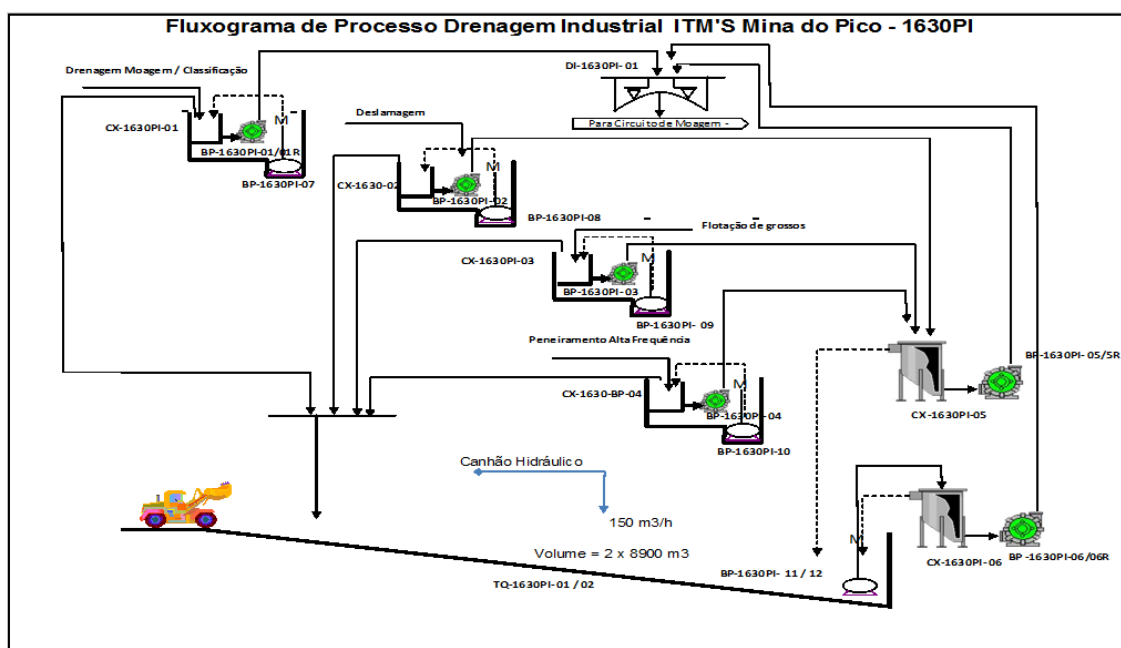


Figura 3.18: Fluxograma de processo – drenagem industrial (ECM, 2012)

3.9.3 Caixas de retenção de resíduos

Caixas ou tanques de contenção de resíduos são bacias de concreto ou uma cava em terreno natural, que tenham capacidade de armazenar até duas vezes e meia o volume de descarga de uma planta de beneficiamento (Figura 3.19) (ECM, 2012).



Figura 3.19: Caixa de contenção de resíduos Casa de Pedra CSN (ECM, 2012)

Para o dimensionamento de uma caixa de contenção de resíduos são adotadas as seguintes premissas (ECM, 2012):

- a) acesso para pá mecânica;
- b) inclinação máxima da rampa em 12%;
- c) capacidade de armazenamento de 2,5 vezes a descarga da usina;
- d) quantificação dos volumes de polpa contidos nas caixas de bombas e tubulações.

3.10 Legislação federal de recursos hídricos

A Política Nacional de Recursos Hídricos pode ser compreendida e estudada na Lei Federal nº 9.433, de 08/01/1997 (SETTI *et al.*, 2000), essa representa a adequação do uso da água com relação a real situação desse recurso que é cada vez mais escasso e que requer etapas de tratamento mais avançadas e onerosas.

Segundo SETTI (2000) os aspectos relevantes da Lei nº 9.433 colaboram como instrumentos essenciais para o gerenciamento do uso da água:

- a) plano nacional de recursos hídricos, que desenvolve a atualização e consolidação dos Planos Diretores de Recursos Hídricos, estes são elaborados por bacia hidrográfica;
- b) outorga de direito de uso dos recursos hídricos, a partir do qual o usuário recebe autorização, concessão ou permissão para utilização da água, incentiva o uso racional dos recursos hídricos;
- c) cobrança pelo uso da água, promove a racionalização do consumo da água e ações de reutilização/reciclagem da água em processos que estejam de acordo com a qualidade da mesma, promovendo a valorização econômica e ambiental do recurso hídrico;
- d) enquadramento dos corpos de água em classes de uso, que possibilita a correlação entre a gestão da quantidade e a gestão da qualidade da água, indicando as características químicas, físicas e biológicas do local de captação da água primária até aos efluentes gerados dos processos que utilizam a água como insumo;
- e) sistema nacional de informações sobre recursos hídricos, sistema de banco de dados que é responsável pela coleta, organização, crítica, divulgação de informações relacionadas aos recursos hídricos e o balanço hídrico realizado para cada manancial e bacia, sendo fonte de informações para os gestores, usuários e sociedade sobre a realidade dos recursos hídricos disponíveis no meio ambiente.

3.11 Legislação de reúso de água

A conscientização sobre a escassez dos recursos hídricos prioriza o uso racional da água reutilizada na indústria, sendo a água insumo que é utilizado na maioria das etapas da mineração. Os fundamentos jurídicos e condicionantes legais para o reúso de água possibilitam a determinação da qualidade da água, que é específica para cada tipo de atividade (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A legislação de reúso da água compreende a lei 9433/97: Lei de recursos hídricos; resolução 54/2005 do CNRH: Critérios sobre reúso e a NBR 13.969/97: Reúso da água.

A lei de recursos hídricos determina a utilização racional e integrada dos recursos hídricos; a realização de metas de racionalização de uso, enfatizando a melhor qualidade para os recursos hídricos; o incentivo da racionalização do uso da água através da cobrança desse insumo.

O regime de outorga de direitos do uso de recursos hídricos aplicado ao reúso da água possibilita ao usuário a dispensa de qualquer autorização por parte do poder público, visto que a reutilização desse não está enquadrada na concessão do recurso (MANCUSO e SANTOS, 2003).

É indiscutível que a reutilização ou reúso é uma das formas de redução da captação de água, favorecendo o aumento da oferta e colaborando para a preservação ambiental, além do reaproveitamento dos efluentes industriais no processo produtivo interno da indústria (MANCUSO e SANTOS, 2003).

A cobrança pelo uso da água utiliza critérios bem particulares para o desenvolvimento do cálculo do valor a ser cobrado, essa será realizada em dois momentos cumulativamente: captação e lançamento (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Para a determinação dos valores de cobrança na captação leva-se em consideração “o volume retirado e seus regimes de variação”, enquanto que no lançamento deve-se considerar “o volume lançado e seu regime de variação e as características físico-químicas, biológicas e de toxicidade do afluente”, visto que a água resultante das utilizações no processo da indústria certamente possuirá novas características qualitativas (MANCUSO e SANTOS, 2003).

Assim, na captação o valor será fixado ao metro cúbico de água captada, enquanto que no lançamento será avaliado a qualidade da água, sendo possível que não haja cobrança ao usuário (MANCUSO e SANTOS, 2003).

3.12 Reutilização/Recirculação da água na mineração

O desafio na mineração corresponde a necessidade de recuperação da água utilizada nos processos de tratamento do minérios. Torna-se de extrema importância o reúso e a reciclagem da água, mediante a realidade da escassez de água, as limitações ambientais sobre a utilização das fontes de água e os elevados custos de captação e tratamento desse insumo indispensável ao processo industrial do beneficiamento de minérios.

Segundo MANCUSO e SANTOS (2003) pode-se identificar as formas de reutilização da seguinte forma:

- a) reúso direto planejado de água: estando os efluentes devidamente tratados, esses são lançados diretamente do ponto de descarga ao qual correspondem até o local do reúso, dessa maneira não são descarregados no meio ambiente;
- b) reciclagem de água: trata-se do reúso interno da água, antes de ser descarregada em um sistema de tratamento, sendo utilizada como fonte complementar de abastecimento do uso original, correspondendo ao caso particular de reúso direto.

O reúso da água na indústria da mineração compreende os benefícios ambientais, tais como a redução do lançamento de efluentes industriais em cursos d'água e redução da captação de água nova; econômicos que englobam a adequação das empresas com relação ao respeito dos padrões e normas ambientais estabelecidos pelos órgãos fiscalizadores.

Dessa forma, torna-se possível a melhor inserção dos produtos brasileiros nos mercados internacionais, mudanças nos padrões de produção e consumo, redução dos custos de produção; aumento da competitividade do setor minerário, habilitação para receber incentivos e coeficientes redutores dos fatores da cobrança pela utilização da água; e sociais que compreende a ampliação na geração de empregos diretos e indiretos e melhoria da imagem da empresa perante à sociedade, com reconhecimento de empreendimentos socialmente responsáveis e conscientemente ambientais (HESPANHOL *et al.*, 2006).

Na atividade da mineração a água que é reutilizada/reciclada retorna ao processo após tratamento ou não, apresentando características físicas e químicas coerentes as aplicações em que serão utilizadas. A reciclagem compreende a água dos espessadores, dos filtros, dos sistemas de recuperação, das bacias de rejeitos, entre outros (ANA, 2006).

3.12.1 Recuperação de água dos espessadores

O espessamento é uma operação do beneficiamento mineral que consiste na separação sólido-líquido das polpas, que trabalha com sedimentação em grande escala, sendo que a operação é realizada no equipamento mecânico denominado espessador (CHAVES, 2010).

O espessador recebe uma polpa diluída (entre 5 e 10% de sólidos) e tem como objetivo adensar (*underflow*) os produtos da usina, sendo eles: concentrado final, lamas e rejeitos, com percentagem de sólidos (entre 50 e 75%) que permita o bombeamento para os respectivos destinos dos mesmos (CHAVES, 2010) e a recuperação/recirculação de água (VALADÃO, 2007).

Os equipamentos utilizados na indústria da mineração são construídos em aço ou em concreto armado e são classificados em: espessadores convencionais; espessadores de alta capacidade; espessadores de lamela; cones de sedimentação (VALADÃO, 2007). Nesse trabalho será abordado somente o espessador convencional.

O espessador convencional (Figura 3.20), é um tanque circular sendo que a alimentação do mesmo é feita na área central, em que um dispositivo reduz a energia cinética da polpa, o que possibilita o espalhamento homogêneo do material e a sedimentação do sólido.

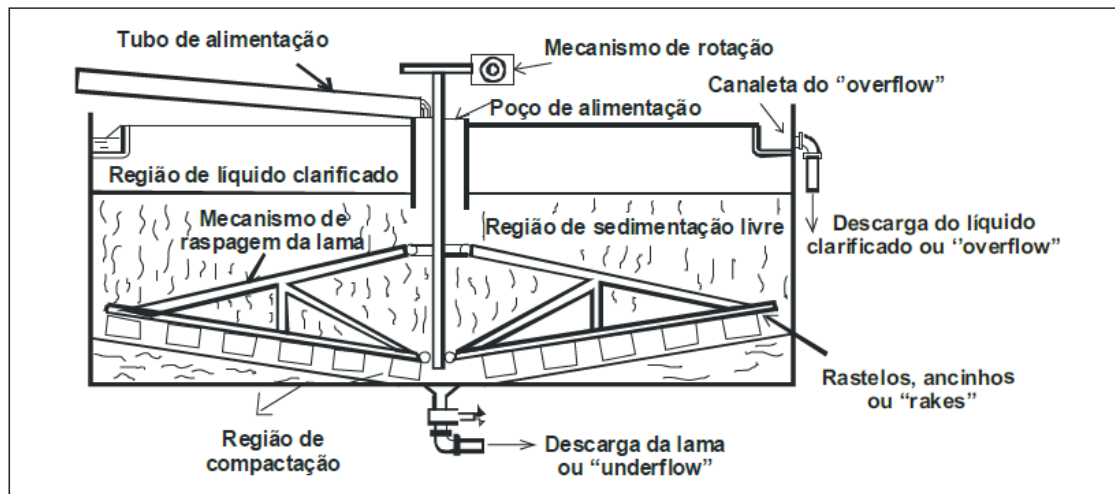


Figura 3.20: Desenho esquemático de um espessador contínuo convencional (LUZ *et al.*, 2010)

Tem-se os componentes do equipamento identificados da seguinte forma: parte superior cilíndrica, sendo o diâmetro maior que a altura; parte inferior representada por cone raso, com apex direcionado para baixo; calha interna ou externa ao tanque, com objetivo de coleta do *overflow*; calha de alimentação; passarela para mecanismo de giro de braços e pás; sistema de remoção do *underflow* (VALADÃO, 2007).

Assim como o *underflow* do espessador prepara o material adensado para as etapas subsequentes de operação, o *overflow* corresponde a água que será recuperada/recirculada no processo, sendo encaminhada, geralmente, por gravidade para o reservatório de água recuperada da planta de beneficiamento e deste reservatório a água poderá ser bombeada para suas utilizações dentro do processo (Figura 3.21).



Figura 3.21: *Overflow* do Espessador de Lamas, Mina de Brucutu (Arquivo Pessoal, 2011)

Objetivando melhorar a qualidade da água recuperada do *overflow* e a percentagem de sólidos no *underflow* do espessamento, realiza-se a adição de coagulantes e floculantes na alimentação do equipamento, assim as micro partículas serão aglomeradas e possuirão massa suficiente para afundarem mediante a ação do campo gravitacional, essas micro partículas são denominadas coloides com tamanho entre 1 μm e 1nm (REIS, 2010).

3.12.2 Recuperação de água dos filtros

A filtragem é uma operação de separação sólido-líquido que é caracterizada pela passagem de uma determinada polpa através de um meio filtrante, onde ocorrerá a retenção do sólido, denominada torta, e a passagem do líquido, denominado filtrado, seu objetivo compreende a retirada de água de concentrados e rejeitos finais, preparando o produto final para as especificações do mercado (VALADÃO, 2007).

A ação externa aplicada sobre as partículas, através do meio filtrante será obtida através de: gravidade, vácuo, pressão ou centrifugação (VALADÃO, 2007).

No beneficiamento mineral são comumente utilizados os filtros a vácuo, que realizam o desaguamento do produto final (concentrados e rejeitos). No caso do minério de ferro a umidade máxima especificada pelo mercado consumidor corresponde a 10% (90% de sólidos em peso), sendo esse um parâmetro determinístico na qualidade da filtragem obtida no processo.

A operação é contínua e sempre cíclica, sendo o ciclo da filtragem composto pelas seguintes fases (Figura 3.22) (CHAVES, 2010):

- a) formação da torta: acumulação de determinado volume de minério junto ao meio filtrante;
- b) secagem: aspiração da água contida na torta pelo meio filtrante;
- c) descarga: estando a torta desaguada esta será descarregada através do sistema de sopro na tela (inversão do fluxo de ar), assim a torta é despreendida da tela e o poro é desobstruído.

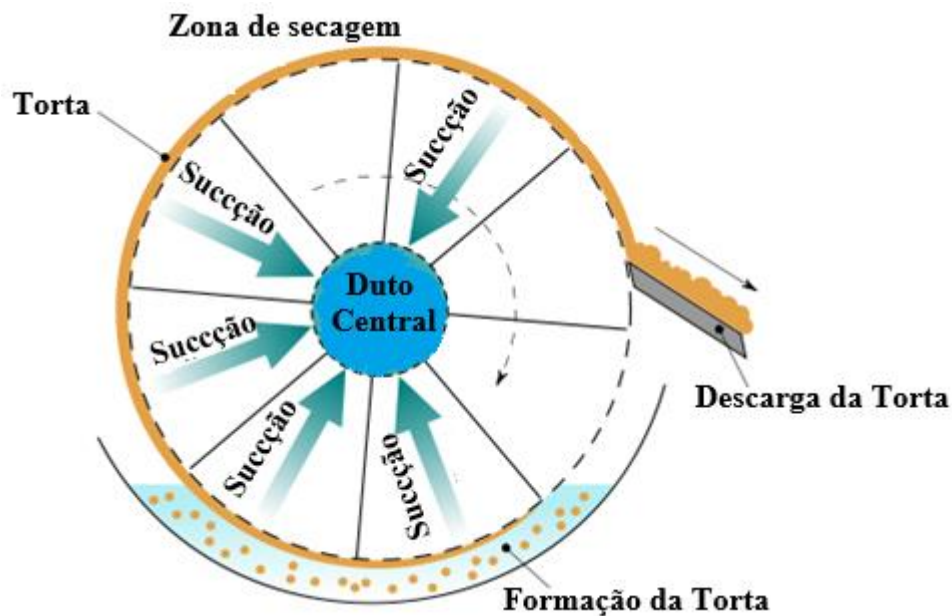


Figura 3.22: Desenho esquemático do ciclo da filtragem (Adaptado TORRENGENHARIA, 2013)

São fatores que influenciam a filtragem a viscosidade, temperatura, densidade da polpa, espessura da torta e velocidade média do ciclo da filtragem (SAMPAIO *et al.*, 2007).

O circuito de filtragem é constituído do filtro, dos sistemas de transporte do filtrado e da torta (*filter cake*), da linha de vácuo e da bomba de vácuo (Figura 3.23) (CHAVES, 2010).

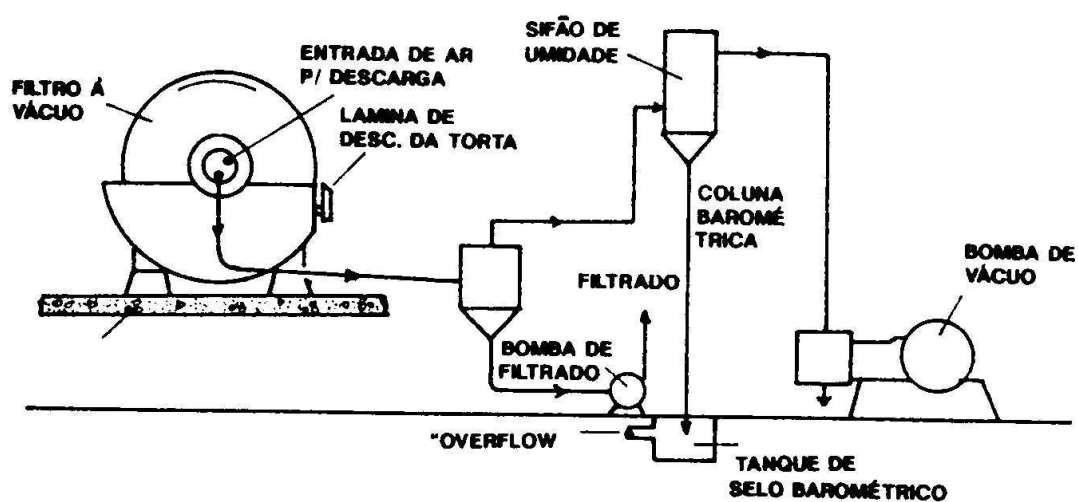


Figura 3.23: Desenho esquemático de um conjunto de filtragem (Arquivo Pessoal, 2011)

A torta desaguada, comumente, é encaminhada para um transportador de correia e deste será transferida para o pátio de produtos, enquanto que o filtrado poderá retornar ao tanque de alimentação da filtragem ou para a alimentação do espessador de concentrado.

3.12.3 Recuperação de água da barragem de rejeitos

Os rejeitos produzidos no beneficiamento mineral, que passaram por todas as etapas de tratamento, são encaminhados, através de bombeamento ou por gravidade para a barragem de rejeitos, que é uma construção destinada a contenção dos resíduos gerados na mineração e possibilita a recirculação de água para a usina.

As barragens podem ser construídas através dos materiais provenientes do solo, estéreis ou o próprio rejeito (ARAÚJO, 2006). Algumas premissas são adotadas para sua construção, tais como: separação da fração grossa e fina, mediante diferenças quanto as propriedades geotectônicas; controle da granulometria; desenvolvimento de sistemas de drenagem; compactação dos materiais que compõe a estrutura de contenção; proteção superficial da barragem e outras.

A água recuperada da barragem corresponde a um percentual de água nova que não será captada, pois a água de recuperação da barragem irá suprir parte das necessidades da água de processo para a usina.

A construção das barragens compreende sucessivos alteamentos que serão desenvolvidos ao longo do tempo, com o objetivo de atender o volume de rejeitos que será gerado no decorrer da vida útil da mina. Além de economicamente atraente, o tipo de construção da barragem por alteamentos sucessivos demonstra grande flexibilidade construtiva, em razão da variação de volumes de rejeitos que poderão ser armazenados, favorecendo as flutuações do mercado que afetam diretamente a produção (LUZ, *et al.*, 2010).

Um dique de partida é construído e a partir desse serão realizados os alteamentos, que são compostos por materiais compactados originados de áreas de empréstimo, ou com o próprio rejeito, mediante a utilização de três métodos: montante, jusante ou linha de centro (ARAÚJO, 2006).

O método a montante apresenta-se econômico e de simples aplicação na construção das barragens de rejeitos e o ponto de partida na execução deste método compreende o desenvolvimento do dique de partida, comumente de material argiloso ou enrocamento compactado (Figura 3.24) (ARAÚJO, 2006).

O rejeito é lançado em direção a montante da linha de simetria do dique através de ciclones ou pequenas tubulações denominadas “*spigots*”, formando dessa forma a praia de deposição.

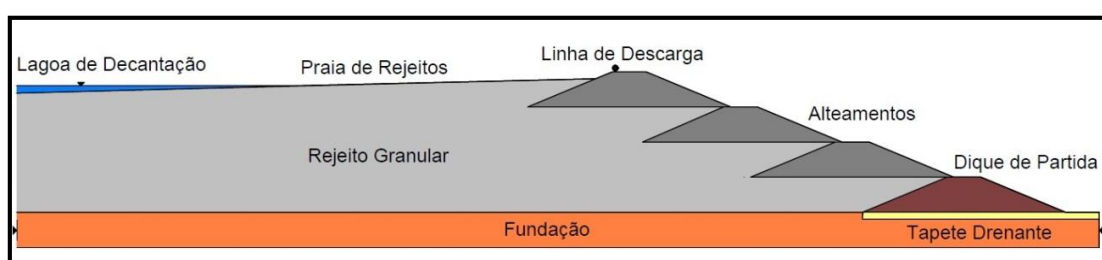


Figura 3.24: Método de montante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

Na etapa inicial do método a jusante é realizada a construção de um dique de partida, normalmente de solo ou enrocamento compactado. Após esse procedimento os alteamentos que serão realizadas ao longo da operação da usina serão realizados a jusante do dique de partida (Figura 3.25).

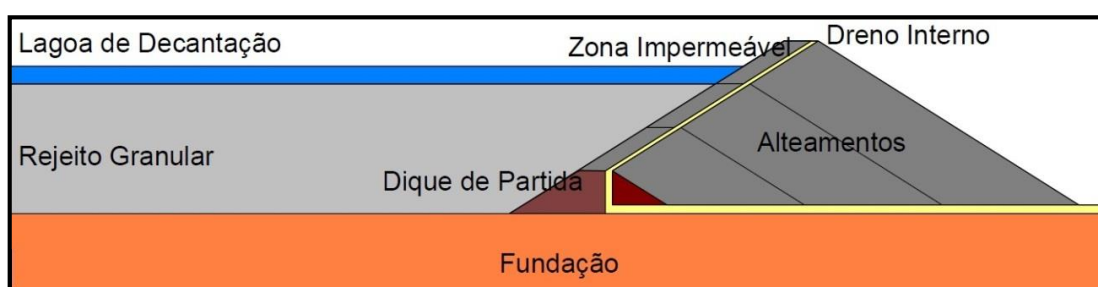


Figura 3.25: Método de jusante (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

O método por linha de centro encontra-se intermediário entre o método da linha de montante e o da linha de jusante, inclusive em relação aos custos. Inicialmente é construído um dique de partida (dique inicial) e os rejeitos são lançados periféricamente a montante do mesmo, formando uma praia, conforme Figura 3.26.

O alteamento que se segue será realizado lançando-se os rejeitos sobre a praia anteriormente formada e sobre o talude de jusante do dique de partida. Neste processo, o eixo da crista do dique inicial e dos diques resultantes dos sucessivos alteamentos são coincidentes (LUZ *et al.*, 2010).

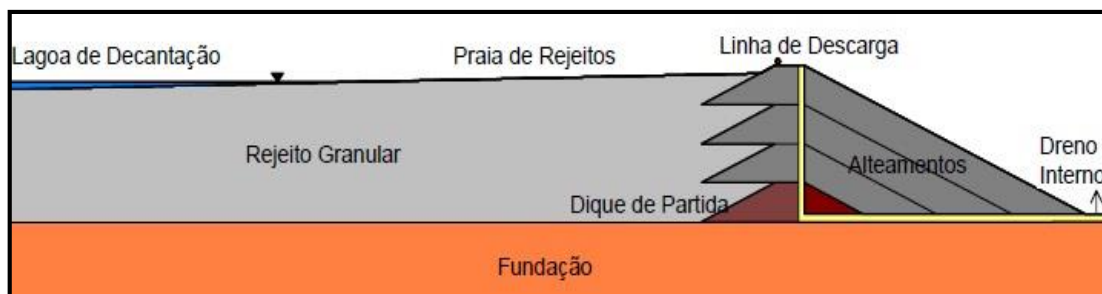


Figura 3.26: Método de linha de centro (ALBUQUERQUE FILHO, 2004)

A Tabela 3.6 compara as vantagens e desvantagens atribuídas a cada método adotado.

Essa comparação é determinante para a escolha do que poderá ser aplicado na construção da barragem de rejeitos.

Tabela 3.6: Comparação entre os métodos construtivos de barragem de rejeitos (LUZ *et al.*, 2010)

	Método de Montante	Método de Jusante	Método de Linha de Centro
Características Gerais	<p>É o mais antigo e o mais empregado na atualidade.</p> <p>Lançamento a partir da crista por <i>spigots</i> (as frações grossas se depositam junto ao corpo da barragem).</p> <p>Também podem ser utilizados hidrociclones.</p>	<p>Construção de dique inicial impermeável e barragem de pé.</p> <p>Separação dos rejeitos na crista do dique através de hidrociclones.</p> <p>Barragem com dreno interno e impermeabilização a montante.</p>	<p>Variação do método de jusante.</p>
Vantagens	<p>Menor custo e maior velocidade de alteamento.</p>	<p>Maior segurança.</p> <p>Compactação de todo o corpo da barragem.</p>	<p>Variação do volume de <i>underflow</i> em relação ao método a jusante.</p>
Desvantagens	<p>Maior probabilidade de instabilidade em virtude da existência de finos não adensados próximo ao corpo da barragem.</p> <p>Baixa compactidade do material.</p> <p>Possibilidade de liquefação.</p>	<p>Necessidade de grandes quantidades de <i>underflow</i> (problemas nas primeiras etapas).</p> <p>Deslocamento do talude de jusante (proteção superficial só no final da construção).</p>	<p>Pode ser necessário estender os trabalhos de compactação a montante do eixo da barragem.</p>

3.13 Efluentes no processamento mineral

O beneficiamento mineral gera os efluentes líquidos provenientes de sólidos em suspensão, resíduos de reagentes químicos utilizados no tratamento de minérios, principalmente na flotação.

É necessário a realização de análises que avaliem as características e propriedades físico-químicas das águas residuais geradas nas etapas de beneficiamento, compreendendo

sólidos em suspensão e reagentes oriundos dos processos de flotação, a identificação das condições dos efluentes gerados representa a principal fonte de informação para a escolha dos tratamentos e monitoramento ideais para cada destinação/aplicação da água de processo (LUZ *et al.*, 2010).

A toxicidade dos reagentes e dos íons é diferenciada havendo classes de muito tóxico, como os coletores tiólicios (por exemplo, xantatos), sulfonatos, aminas e cianetos, de moderados, como os espumantes à base de álcool e, de não tóxicos, como o polipropileno glicol (LUZ *et al.*, 2010).

A utilização de outros reagentes como os floculantes e coagulantes, para auxílio na sedimentação de sólidos suspensos na etapa de espessamento de concentrado, lamas e rejeitos, poderão apresentar na água recuperada dos espessadores quantidades residuais de íons de cobre, zinco, sais solúveis de amina, e outros.

3.14 Qualidade da água recuperada/reutilizada no processamento mineral

São muitas as variáveis e imprevistos existentes nas operações da usina de beneficiamento, mediante a essa situação é de extrema importância o conhecimento técnico sobre os elementos mineralógicos dissolvidos na água e a influência destes no desenvolvimento do processo (ANA, 2006).

Em razão da obtenção de informações sobre a qualidade da água fornecida ao sistema de operação, torna-se necessária a utilização de métodos de monitoramento da água de reciclagem e também da água nova.

É fundamental o controle sobre a água no beneficiamento de minérios, principalmente nos processos de flotação, que conduz a utilização de parâmetros que possibilitarão o acompanhamento diário através do monitoramento das áreas, como por exemplo: sólidos em suspensão, variações de Eh e pH, reação e dissolução dos minerais, reagentes residuais (LUZ *et al.*, 2010).

As características da água recuperada/reutilizada ou nova serão definidas conforme a aplicação da mesma no circuito operacional, tendo como parâmetros de análise o efeito que será causado na operação de interesse (ANA, 2006).

O conhecimento da composição química da água e dos materiais contidos nela fornecerá a base de implantação dos sistemas de tratamento e monitoramento da água nova e de recirculação.

Essa composição química da água varia de acordo com a operação da usina. Em consequência dessas variações o sistema de análise química deve ser contínuo, representando maior segurança para o monitoramento das modificações inerentes ao processo (ANA, 2006).

A utilização de um banco de dados referente a água que alimenta e recircula a planta é fundamental para a análise sobre os aspectos da qualidade da água de processo que é diferente em cada etapa da operação industrial.

3.15 Tratamento da água no beneficiamento mineral

Após a utilização da água no processo do tratamento de minérios, ela poderá ser descartada ou reciclada no circuito da usina para os sistemas de tratamento dos efluentes industriais, que compreendem a adequação da água para sua aplicação em determinadas funções na indústria mineral.

Os efluentes gerados na mineração deverão ser analisados nas características físicas, químicas e biológicas, sendo que a partir dos dados coletados o método de tratamento da água será determinado.

Haverá casos em que a água recirculada será utilizada para reposição de água nas caixas de bombas (diluição). Para usos como abatimento de pó nos transportadores de correia, aspersão nas estradas da mina, lavagem de pisos e máquinas, um simples tratamento preliminar atenderia às necessidades de aplicação da água reciclada.

Em situações como a da água utilizada para preparação de reagentes na etapa de flotação deverão ser adotados critérios mais específicos de tratamento dos efluentes gerados nessa etapa de concentração.

Os variados processos de tratamento que poderão ser adotados levam em consideração fatores como: legislação ambiental regional; clima; cultura local; custos de investimento e operacionais, características do efluente tratado e possibilidade de reúso dos efluentes tratados (GIORDANO, 1999).

O lançamento indevido dos efluentes industriais compromete a qualidade da água e do solo, o que causa a contaminação e poluição do meio ambiente.

A Tabela 3.7 exemplifica os diferentes tipos de contaminantes e seus respectivos tratamentos, que englobam processos de operação físicos, químicos e biológicos nos efluentes industriais.

Tabela 3.7: Contaminantes e respectivas operações/tratamentos para os efluentes industriais (CIMM, 2013)

Contaminantes	Operação ou Tratamento
Sólidos suspensos	<ul style="list-style-type: none"> - Gradeamento - Remoção de areia - Sedimentação - Filtração - Flotação - Adição de polímeros químicos - Coagulação/Sedimentação - Sistemas naturais
Orgânicos biodegradáveis	<ul style="list-style-type: none"> - Lodos ativados - Reatores de filme fixo: filtros biológicos e contactadores biológicos
Orgânicos voláteis	<ul style="list-style-type: none"> - <i>Stripping</i> - Tratamento de gás pós-<i>stripping</i> - Adsorção por carvão
Patogênicos	<ul style="list-style-type: none"> - Cloração - Cloreto de bromo - Ozonação - Radiação UV - Sistemas naturais
Nutrientes (Nitrogênio)	<ul style="list-style-type: none"> - Nitrificação e desnitrificação com culturas em suspensão ou filme fixo - <i>Stripping</i> de amônia - Troca iônica - Cloração - Sistemas naturais
Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Adição de sais metálicos - Coagulação/Sedimentação com cal - Remoção biológica - Remoção química-biológica - Sistemas naturais
Nitrogênio e Fósforo	<ul style="list-style-type: none"> - Remoção de nutrientes biológica
Orgânicos refratários	<ul style="list-style-type: none"> - Adsorção por carvão - Ozonação - Sistemas naturais
Metais Pesados	<ul style="list-style-type: none"> - Precipitação química - Troca iônica - Sistemas naturais
Sólidos dissolvidos orgânicos	<ul style="list-style-type: none"> - Troca iônica - Osmose reversa - Eletrodialise

3.15.1 Processos físicos

Os processos de tratamento classificados como físicos estão relacionados as características do contaminante, tais como: tamanho das partículas, peso específico, viscosidade, etc. Esses processos são desenvolvidos pelos seguintes métodos de tratamento: gradeamento, sedimentação, filtração, flotação, regularização/equalização, etc (CIMM, 2013).

3.15.2 Processos químicos

Os processos de tratamento químicos estão correlacionados com as características químicas dos contaminantes e reagentes incorporados nos efluentes. Como exemplos tem-se: coagulação, precipitação, troca iônica, oxidação, neutralização, osmose reversa, ultrafiltração (CIMM, 2013).

3.15.3 Processos biológicos

Os processos de tratamento biológicos compreendem reações bioquímicas para eliminação dos contaminantes solúveis ou coloidais. Estes podem ser anaeróbicos e aeróbicos, exemplificados pelos seguintes métodos de aplicação: lodos ativados, lagoas aereadas, biodiscos (RBC), filtro percolador, valas de oxidação, reatores sequenciais descontínuos (SBR) (CIMM, 2013).

3.16 Gerenciamento de recursos hídricos através da integração de processos

A utilização dos recursos hídricos exige a identificação e correção de ineficiências de seu uso dentro das etapas do processo industrial e essa necessidade prioriza o gerenciamento sistemático sobre as várias etapas dos processos de produção.

A complexidade que envolve a minimização de efluentes gerados pela indústria, a eficiência na utilização da energia, o uso eficiente de matérias-primas e a otimização na operacionalidade do processo, pode ser resolvida através da Integração de Processos (IP),

que apresenta-se como uma ferramenta de análise e controle para a adequação do processo global e as interações entre as diferentes etapas de trabalho (PESSOA, 2008).

A Integração de Processos compreende o uso de regras heurísticas, fundamentos termodinâmicos e otimização matemática (PEREIRA, 2007), possibilitando a sistematização de tomadas de decisão relacionadas a melhora dos processos adotados na indústria (Figura 3.27).

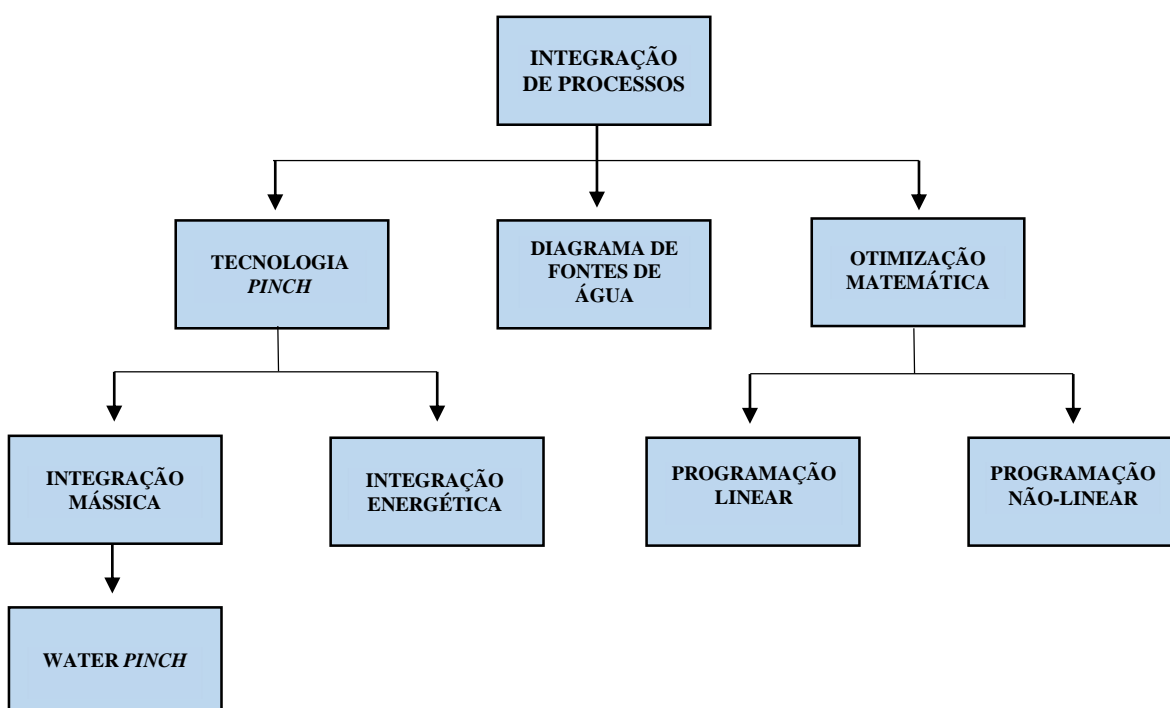


Figura 3.27: Integração de Processos (MOREIRA, 2009)

Os estudos desenvolvidos nessa área englobam técnicas de programação matemática de considerável complexidade e trabalha ainda com as metodologias sistemáticas fundamentadas na análise *pinch* e em regras heurísticas, que apresentam maior facilidade e simplicidade de cálculos, mostrando-se como vantajosas frente à programação matemática (MIRRE, 2007).

A “Tecnologia Pinch” surgiu no final da década de 70 como uma ferramenta para projetar redes de transferência de calor em um momento de crise energética mundial. Utilizando os seus princípios, os engenheiros podiam controlar as modificações do processo, direcionando o projeto para soluções que ao mesmo tempo eram termodinamicamente eficientes como também industrialmente (MOREIRA, 2009).

A tecnologia “*Water Pinch*” é uma sistemática para análise de redes de água visando à redução dos custos no processo, utilizando métodos gráficos para identificar e otimizar as melhores oportunidades de reúso, regeneração e tratamento de efluentes (MOREIRA, 2009).

Um dos métodos que pode ser utilizado para análise é o Diagrama de Fontes de Água (DFA), classe oriunda dos métodos de análise *pinch*, trata-se de um procedimento algorítmico heurístico que inclui o balanço material e energético do processo, tendo como objetivos a maximização do reúso da água e a diminuição da geração dos efluentes aquosos, contribuindo para a racionalização do uso da água e na utilização eficiente da energia empregada para o funcionamento do circuito.

O DFA foi apresentado por Castro *et al.* (1999) e foi elaborado para sistemas que apresentam um contaminante. A elaboração para novas situações foi desenvolvida por Gomes (2002), que envolvia a aplicação da metodologia para a situação de múltiplos contaminantes. O DFA foi automatizado através da elaboração de um *software* em linguagem Excel por Santos (2007), sendo denominado como MINEA (Minimização de Efluentes Aquosos) (MOREIRA, 2009).

Essa ferramenta possibilita o desenvolvimento da gestão e a melhor adequação do reúso de água na indústria, tendo como objetivo o consumo mínimo de água de forma sistemática e o reúso dos efluentes gerados no processo.

Vale ressaltar a importância da utilização de metodologias como o DFA para a determinação de metas de consumo de água, destacando que a análise e aperfeiçoamento nos cálculos de custos de investimento (captação de água nova e tratamento de efluentes gerados) e nos cálculos sobre os custos operacionais atrelados a cada etapa de desenvolvimento da indústria conferem vantagens para as empresas e para o meio ambiente (MAGALHÃES *et al.*, 2005).

4. ESTUDO DE CASO

Será apresentado como exemplo das aplicações da água dentro das usinas de beneficiamento de minério de ferro, um estudo de caso baseado em uma situação real, adaptado e modificado, que compreende a produção de 20 Mtpa (Milhões de toneladas por ano) de *Pellet Feed* (base seca).

Na elaboração de projetos de mineração são utilizadas premissas que determinam principalmente: a capacidade de produção da usina; os balanços de massas, metalúrgico e de água; considerações sobre a localização dos equipamentos mecânicos dentro da usina; posicionamento e formação da pilha pulmão, dos pátios de homogeneização e de produtos; dados sobre dosagem e consumo de reagentes e o tempo de autonomia para o reservatório de água recirculada.

As premissas de processo englobam os dados do regime operacional da planta que, como indicado na Tabela 4.1, determinarão a produção anual da planta de beneficiamento.

Tabela 4.1: Regime Operacional da Planta

Itens	Britagem Primária e Secundária em X	Britagem Primária e Secundária em Y	Britagem Terciária e Quaternária	Usina
Dias programados para produção/ano	365	365	365	365
Horas programadas/dia	24	24	24	24
Dias programados para produção/semana	7	7	7	7
Horas programadas/ano	8.760	8.760	8.760	8.760
Rendimento Operacional (%)	68,5	68,5	75	89
Horas efetivas/ano	6.001	6.001	6.570	7.796

As características do ROM (*Run of Mine*) relacionadas a granulometria e teores do minério extraído, auxiliam na elaboração de uma distribuição granulométrica, que deverá ser corrigida e ajustada para compor a alimentação da usina (Tabela 4.2).

Tabela 4.2: Características do ROM (*Run of Mine*)

Faixa Granulométrica	% Retida	Teores					
		Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	P	Mn	PPC
-50 + 6,3 mm	33,84	50,24	23,68	0,55	0,059	0,091	2,91
- 6,3 + 1,0 mm	11,52	56,91	14,30	0,83	0,068	0,191	2,97
-1,0 + 0,15 mm	12,27	39,11	40,66	0,67	0,047	0,123	1,95
-0,15 mm	42,37	38,19	41,77	1,31	0,044	0,080	1,97
Global	100,00	44,54	32,35	0,92	0,052	0,102	2,40

O diagrama de blocos (Figura 4.1) representa a rota de processo esquemática da mina e usina, utilizada para o processamento de itabiritos provenientes das minas X e Y.

Nele é possível analisar as operações realizadas, identificadas como:

- a) peneiramento (primário, secundário, terciário e quaternário);
- b) britagem (primária, secundária, terciária e quaternária);
- c) moagem (primária, secundária);
- d) deslamagem (primeiro, segundo e terceiro estágio);
- e) flotação convencional (*rougher*, *cleaner*, *re-cleaner*, *scavenger 1* e *scavenger 2*);
- f) peneiramento de alta frequência (PAF);
- g) remoagem;
- h) classificação;
- i) espessamento (rejeito, lamas e concentrado);
- j) filtração de concentrado.

Como o foco deste trabalho compreende as utilizações/aplicações e recuperação/recirculação da água nas usinas de beneficiamento de minério de ferro, será abordado com maior detalhamento a quantificação da água utilizada nas várias etapas de processamento existentes nesse estudo de caso.

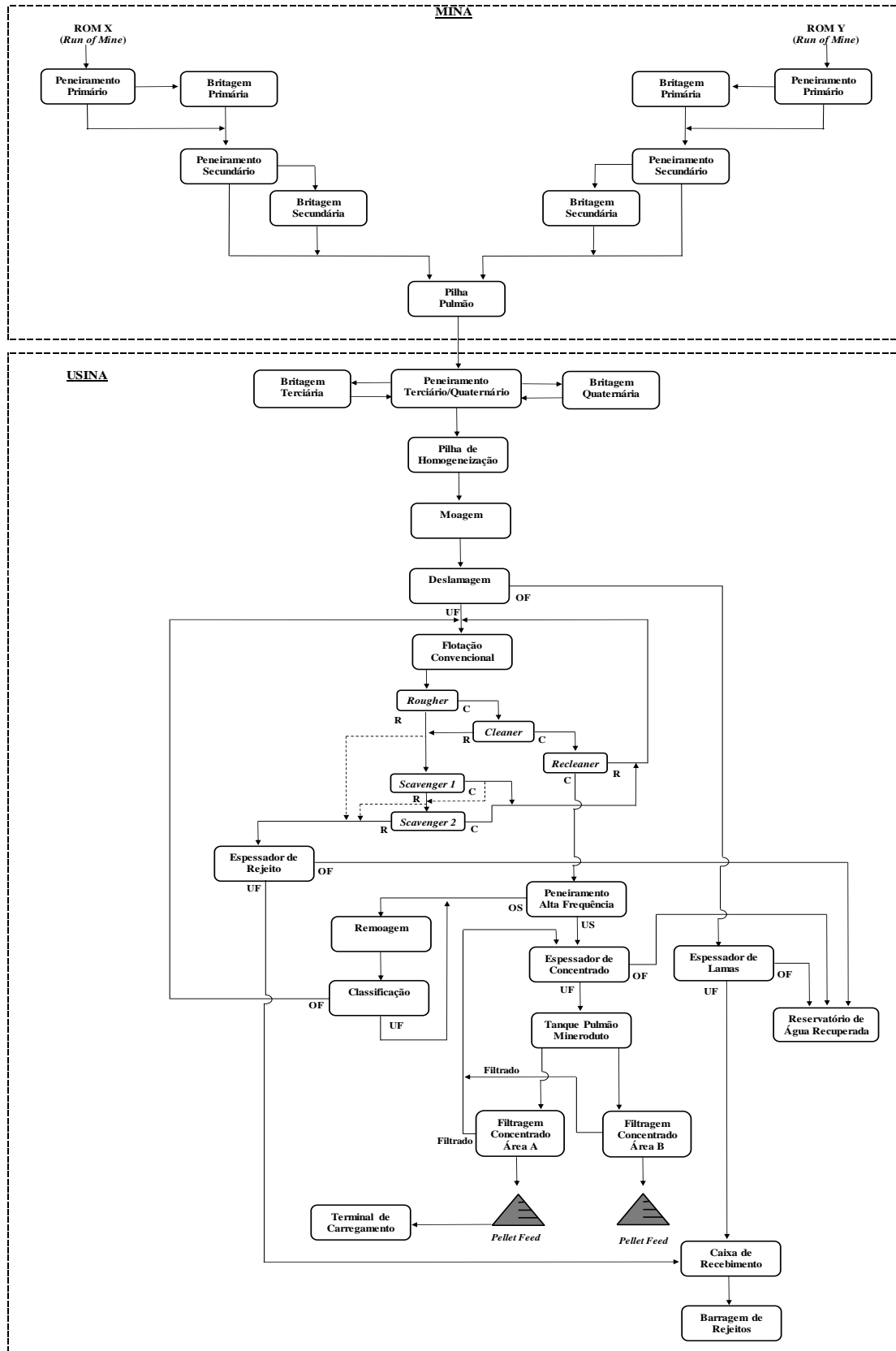


Figura 4.1: Diagrama de Blocos - Rota de Processo Esquemática

O fluxograma de processo com balanço de massas (Figura 4.2) torna possível a quantificação de água necessária no tratamento de minérios, sendo estabelecidas as vazões de água de diluição em várias etapas de processamento. A partir de definições sobre a percentagem de sólidos requerida no circuito, pode-se elaborar o cálculo de adição de água.

A água recuperada do *overflow* dos espessadores irá alimentar, através de bombeamento, a água de serviço, diluição e reposição de nível das caixas de polpa da moagem/classificação, da deslamagem, da flotação convencional e do peneiramento de alta frequência.

Na Tabela 4.3 observa-se a quantidade de água requerida para processo e a recirculação do *overflow* dos espessadores de lamas, concentrado e rejeito.

Tabela 4.3: Água recirculada do *overflow* dos espessadores

Etapa	Água de diluição para processo (m ³ /h)	Total requerido de água de processo (m ³ /h)	Origem da água de processo	Água do <i>overflow</i> dos espessadores recirculada (m ³ /h)	Total de água recirculada (m ³ /h)	Água de <i>make up</i> para processo (m ³ /h)	% Água recirculada	% Água de <i>make up</i>
Moagem e Classificação	13.473,97	25.496,01	<i>Overflow</i> Espessador de Lamas	18.530,80	22.352,73	3.143,27	87,67	12,33
Deslamagem	9.598,35		<i>Overflow</i> Espessador de Concentrado	3.328,05				
Flotação Convencional	1.411,85		<i>Overflow</i> Espessador de Rejeito	493,88				
Peneiramento de Alta Frequência	1.011,84		-	-				

A água recirculada do *overflow* dos espessadores corresponde em percentagem a 87,67% da água utilizada para as operações de moagem/classificação, deslamagem, flotação e peneiramento de alta frequência, sendo necessário, para atender a demanda de água de processo, adição de água de *make up* (reposição) correspondendo em percentagem a 12,33%, sendo esta proveniente da recuperação das barragens de rejeitos e da captação de água nova.

Além da água recirculada do *overflow* dos espessadores tem-se as captações de água nova e recuperada das barragens de rejeitos que correspondem a água necessária para o abastecimento da planta de beneficiamento.

O *underflow* do espessador de lamas juntamente com o *underflow* do espessador de rejeito serão destinados para a Barragem de Rejeitos I. Já as perdas internas e utilidades da usina serão direcionadas para a Barragem de Rejeitos II.

Nesse estudo de caso considerou-se a captação de 70% da água enviada para as Barragens I e II, sendo que a água será captada por meio de bombas verticais apoiadas em plataformas flutuantes e estação *booster* com bombas centrifugas horizontais, direcionando o fluxo das barragens de rejeitos para o reservatório elevado de água recuperada, que também receberá água nova captada, proveniente dos poços de rebaixamento de cava.

A captação de água nova, abastecerá o reservatório elevado de água recuperada e atenderá a distribuição de água potável, *make up* (reposição) do resfriamento dos moinhos, selagem das bombas de polpa da usina, preparação de reagentes, reposição do reservatório de *overflow* dos espessadores e, eventualmente, o sistema de combate a incêndio das britagens localizadas nas minas X e Y (Tabela 4.4).

A distribuição da água recuperada das barragens de rejeitos será realizada a partir do reservatório elevado e atenderá a lavagem de caminhões, aspersão de pilhas, abatimento de pó, água de serviço para a usina, utilidades das filtragens das áreas A e B, reposição do reservatório de *overflow* dos espessadores e, eventualmente, o sistema de combate a incêndio da usina (Tabela 4.4).

Tabela 4.4: Captação e distribuição de água nova e recuperada

Distribuição de Água Nova Captada	Captação de água nova (m ³ /h)	Total requerido de água nova (m ³ /h)	Distribuição de Água Recuperada das Barragens	Captação de água das Barragens (m ³ /h)	Total requerido de água recuperada (m ³ /h)
Distribuição de Água Potável	17,00	2.508,86	Lavagem de Caminhões, Aspersão de Pilha e Abatimento de Pó	236,00	2.837,59
<i>Make up</i> resfriamento dos moinhos	7,26		Água de Serviço Usina	111,32	
Selagem das bombas de polpa da usina	404,70		Utilidades Filtragem Área A	358,39	
Preparação de Reagentes	952,10		Utilidades Filtragem Área B	116,40	
<i>Make up</i> reservatório água recuperada (para processo) - água nova	1.127,80		<i>Make up</i> reservatório água recuperada (para processo) - água recuperada das barragens	2.015,47	

Conforme exemplificado na Figura 4.3 é possível analisar a captação e distribuição de água nova e recuperada das barragens de rejeitos, com a quantificação das vazões requeridas para cada aplicação distinta.

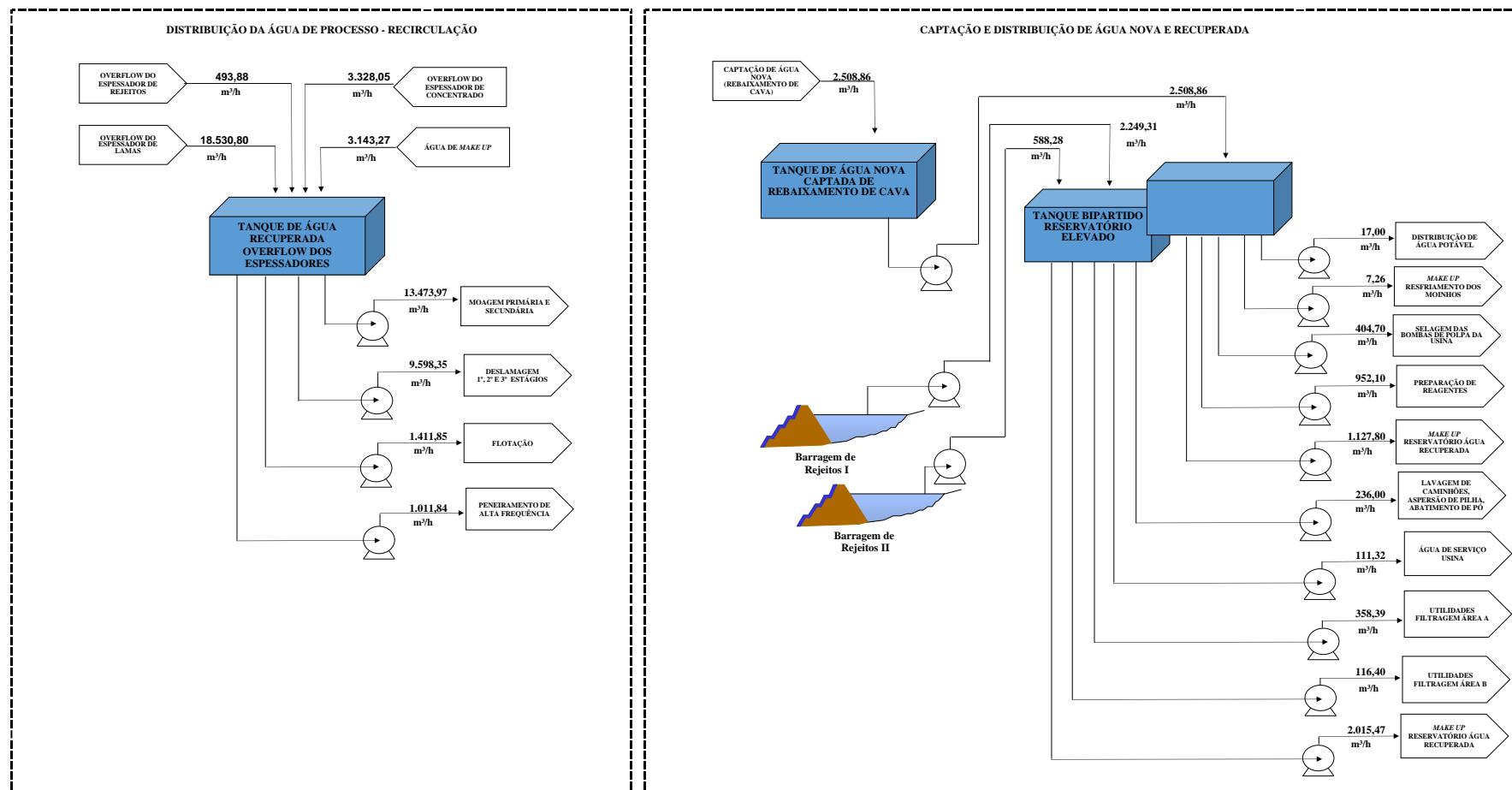


Figura 4.3: Captação e Distribuição de Água Nova e Recuperada das Barragens de Rejeitos

Para uma análise simplificada sobre o impacto que a recuperação/recirculação de água proporciona na usina, considerou-se três situações referentes a captação de água recuperada das barragens de rejeitos:

- a) caso base com 70% de água recuperada, correspondendo ao estudo de caso;
- b) caso 1 com 0% de água recuperada;
- c) caso 2 com 90% de água recuperada.

Na Tabela 4.5 observa-se no Caso Base, com captação de 70% da água enviada para as barragens, que do total de água requerida para as utilizações da mina e usina (atendidas pela captação de água nova e recuperada), com vazão equivalente a 5.346,45 m³/h, será requerida a percentagem de 46,93% de água nova captada e 53,07% de água recuperada das Barragens I e II, demonstrando que a água recuperada corresponde a mais que a metade da vazão total necessária para operação da planta.

Tabela 4.5: Caso Base – captação de 70% de água recuperada das barragens

Origem da água recuperada das Barragens	70% de Água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total de água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total requerido de água nova (m ³ /h)	Total de água requerida para todas as aplicações (m ³ /h)	% Água nova captada	% Água recuperada das Barragens
Barragem de Rejeitos I	2.249,31	2.837,59	2.508,86	5.346,45	46,93	53,07
Barragem de Rejeitos II	588,28					

A Tabela 4.6 exemplifica o Caso 1 no intuito de simular a inexistência de captação de água recuperada das barragens de rejeitos. Com relação ao total de água requerida é notória a percentagem de 100% de água nova captada, isso representa prejuízos ambientais e econômicos. Assim, certamente o empreendimento mineiro encontraria dificuldades de ser concretizado.

Tabela 4.6: Caso 1 – captação de 0% de água recuperada das barragens

Origem da água recuperada das Barragens	0% de Água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total de água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total requerido de água nova (m ³ /h)	Total de água requerida para todas as aplicações (m ³ /h)	% Água nova captada	% Água recuperada das Barragens
Barragem de Rejeitos I	0,00	0,00	5.346,45	5.346,45	100,00	0,00
Barragem de Rejeitos II	0,00					

Por fim, na Tabela 4.7 identifica-se o Caso 2, que apresenta-se como a melhor situação referente a recuperação de 90% da água enviada para as barragens de rejeitos, sendo que do total de água requerida (atendida pela captação de água nova e recuperada) tem-se a percentagem de 31,76% de água nova captada e 68,24% de água recuperada das barragens.

Tabela 4.7: Caso 2 – captação de 90% de água recuperada das barragens

Origem da água recuperada das Barragens	90% de Água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total de água recuperada das Barragens (m ³ /h)	Total requerido de água nova (m ³ /h)	Total de água requerida para todas as aplicações (m ³ /h)	% Água nova captada	% Água recuperada das Barragens
Barragem de Rejeitos I	2.891,97	3.648,33	1.698,12	5.346,45	31,76	68,24
Barragem de Rejeitos II	756,36					

É possível analisar no gráfico de linhas (Figura 4.4) a correlação entre a captação de água nova e recuperada das barragens de rejeitos e a percentagem de água recuperada. Conforme aumenta-se o percentual de água recuperada, melhor é o resultado referente a diminuição na captação de água nova.

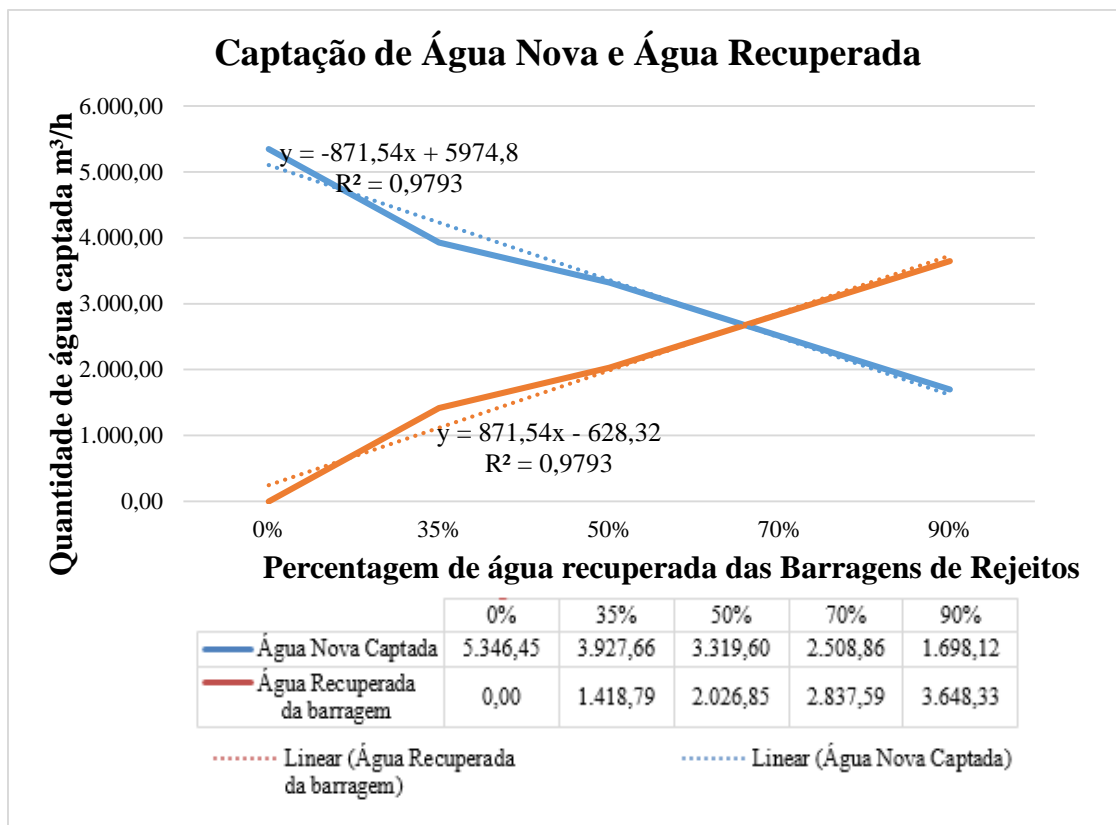


Figura 4.4: Gráfico - Captação de Água Nova e Recuperada

Esses são dados muito relevantes e que exemplificam como a recuperação da água proveniente das barragens de rejeitos é essencial para a redução da captação de água nova, diminuição na geração de efluentes e nos custos operacionais, proporcionando o equilíbrio ambiental do sistema como um todo.

4.2 Balanço de Água Macro

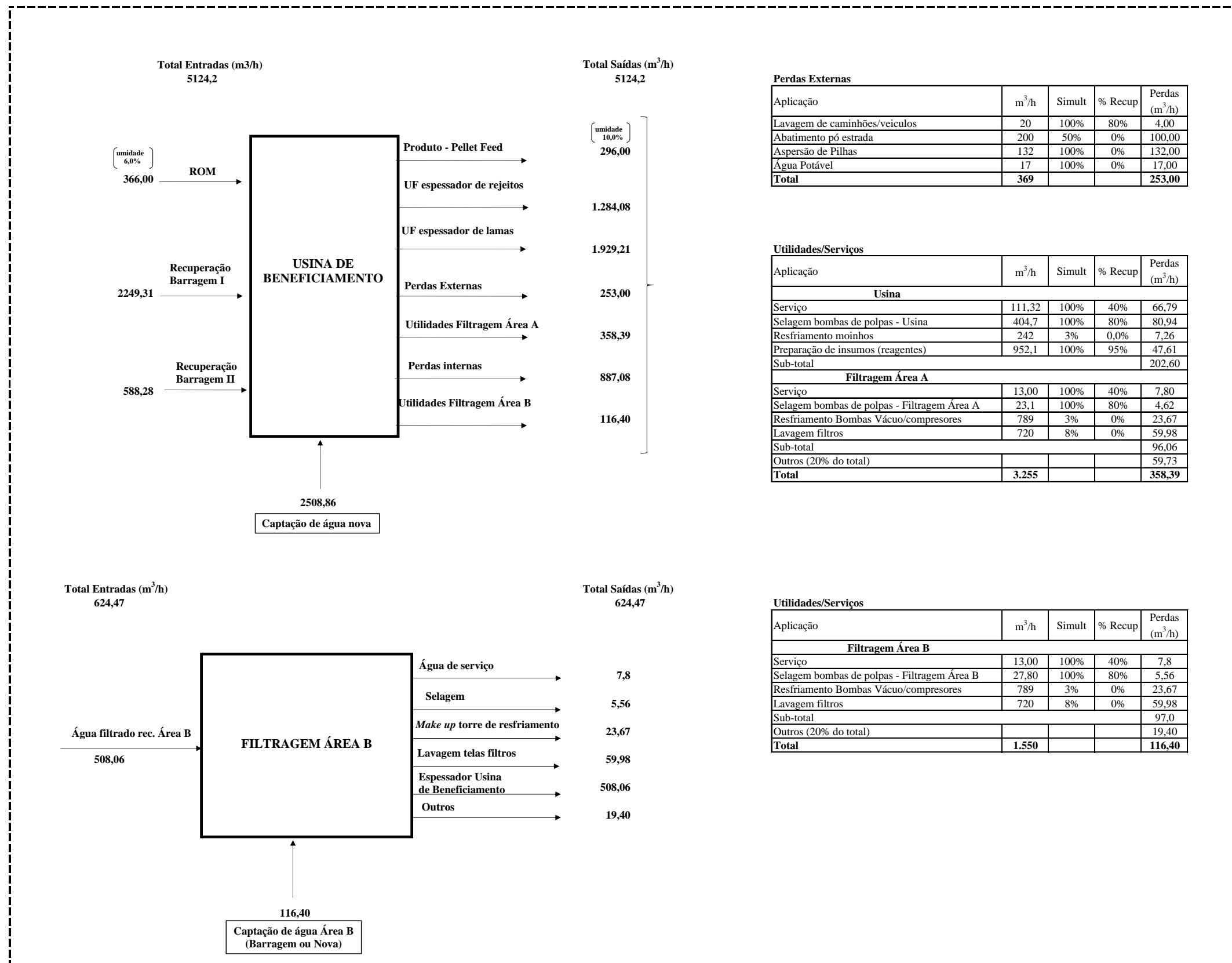


Figura 4.5: Balanço de Água Macro

O balanço de água macro (Figura 4.5) é desenvolvido atendendo os dados obtidos nos balanços de massas da usina, evidenciando as entradas e saídas de água dentro da usina de concentração.

No estudo de caso apresentado tem-se o balanço de água macro da usina de beneficiamento e da filtragem da Área B, localizada em lugar distinto da filtragem da usina (Área A). É interessante destacar que as filtrações das Áreas A e B utilizam o filtrado dos filtros recuperado durante o processo, isso exemplifica a recirculação e como esse valor impacta na redução da necessidade de novo abastecimento de água.

Como já abordado nesse trabalho, o balanço de água macro apresenta as vazões de água (m^3/h) necessárias para utilidades e serviços evidenciando: a simultaneidade de utilização da água em toda a planta de beneficiamento (pontos de consumo que demandam ao mesmo tempo de água), a recuperação característica de cada tipo de aplicação e as perdas inerentes ao processo, que está atrelada a percentagem de recuperação obtida na operação do circuito.

No estudo de caso apresentado, para a produção de 2.644,01 t/h de *Pellet Feed*, é necessária a captação de 2.508,86 m^3/h de água nova, assim para a produção de 1 t/h *Pellet Feed* é requerida uma vazão de 94,17 $\text{m}^3/\text{h/t}$ de minério processado.

O balanço de produto (Figura 4.6) determina a produção anual de *Pellet Feed* igual a 20.769.711 toneladas por ano. A partir desse dado é possível obter a quantidade de água que será utilizada para essa produção, sendo a captação de água nova equivalente a 19.560.091,38 m^3/ano .

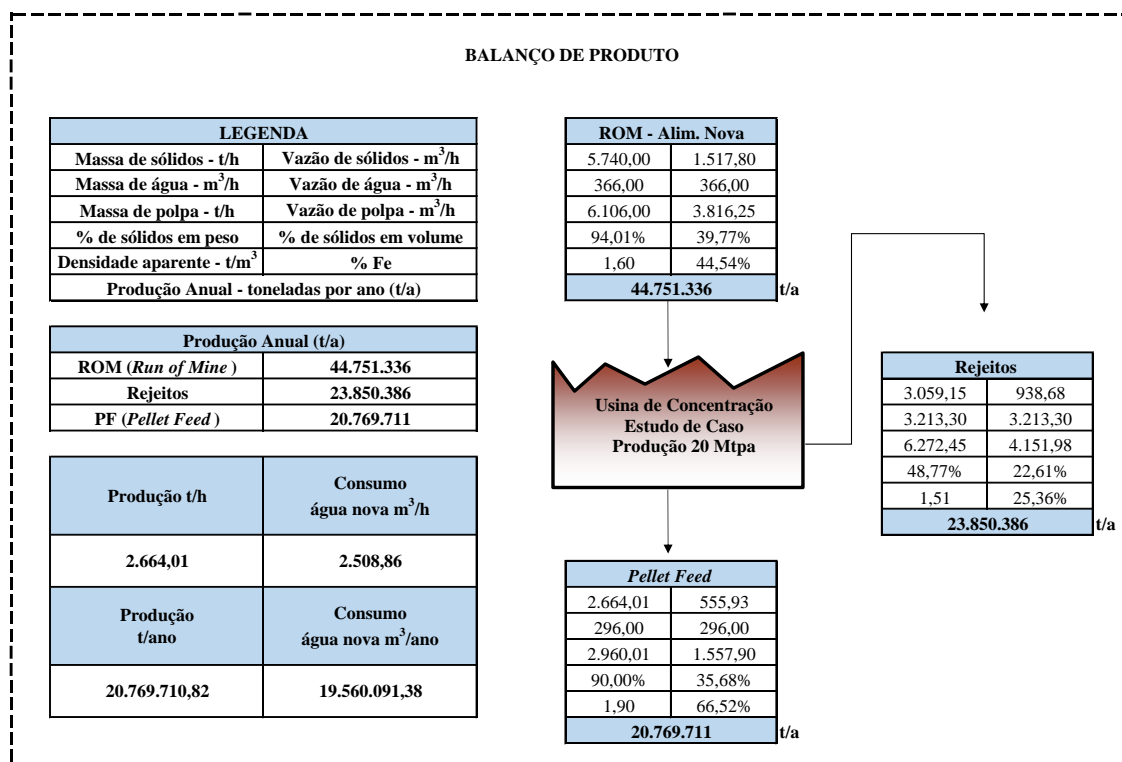


Figura 4.6: Balanço de Produto

Dessa maneira, o estudo de caso promoveu resultados condizentes com o esperado, que a recuperação e recirculação de água representam valores expressivos na água utilizada na mina e usina de beneficiamento e que o reúso reduz consideravelmente a quantidade necessária de água nova, os custos operacionais da usina e a geração de efluentes industriais.

5. CONCLUSÕES

As várias aplicações/utilizações da água nas etapas do processamento mineral devem ser muito bem determinadas através do balanço de água, a partir do qual será definida a melhor rota de processo, levando em consideração as variáveis operacionais de todo o circuito.

Como comprovado nas pesquisas desenvolvidas e nos números de recuperação/recirculação obtidos a partir do estudo de caso, a recuperação e o reúso da água na mineração torna possível a redução da captação de água nova, diminuição da geração dos efluentes aquosos, redução dos custos operacionais da planta e aumento de competitividade do setor minerário. Dessa forma, é imprescindível para a indústria priorizar a maximização do reúso da água e promover a conservação e racionalização de seu uso, essas ações agregarão, conseqüentemente, valor econômico e ambiental ao produto final gerado.

Sem dúvida alguma o gerenciamento dos recursos hídricos é uma ferramenta que visa a melhor adequação do reúso de água na indústria, tendo como objetivo o consumo mínimo de água de forma sistemática e o reúso dos efluentes gerados no processo.

Todas essas análises sobre o uso e preservação da água tornam possível o planejamento consciente e eficaz referente ao consumo dos recursos hídricos, que cada vez mais representam grandes investimentos ambientais, econômicos e sociais.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para a elaboração de trabalhos futuros destacam-se os itens abaixo.

1. A recuperação dos reagentes na água reutilizada/recirculada no circuito de beneficiamento de minério de ferro.
2. O investimento em novas tecnologias de otimização para o uso da água na indústria mineral.
3. A implantação da “pegada hídrica” nas empresas mineradoras para a quantificação de água utilizada na produção do minério de interesse.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE FILHO, L.H. Análise do comportamento geotécnico de barragens de rejeitos de minério de ferro através de ensaios de piezocone. Ouro Preto: Departamento de Engenharia Civil, 2004. 191p. (Dissertação, Mestrado, Engenharia Civil).

Agência Nacional de Águas (ANA). A gestão dos recursos hídricos e a mineração. Brasília: ANA; IBRAM 2006.

ARAUJO, L. R. Malhas de Controle Típicas no Beneficiamento a Úmido de Minério de Ferro. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2010. 51p. (Monografia, Beneficiamento Mineral).

BALTAR, C. A. M. Flotação no Tratamento de Minério. Recife: [s.n.], 2008.

CASTRO, P. *et al.* Improvements for mass-exchange networks design. Chemical Engineering Science, Lisboa, n. 54, 1999.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 3ª ed., São Paulo: Signus Editora, 2007. Volume 1.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 3ª ed., São Paulo: Signus Editora, 2010. Volume 2.

CHAVES, A. P.; PERES, A. E. C. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 5ª ed., São Paulo: Signus Editora, 2012. Volume 3.

CHAVES, A. P. Teoria e Prática do Tratamento de Minérios. 2ª ed., São Paulo: Signus Editora, 2009. Volume 4.

Classificador Espiral. Consultado em arquivo digital e parcialmente extraído do endereço: <http://www.engendrar.com.br/site/midia_center/fotos.php?cat=7&id=43/Classificador-Espiral.html>. Acesso em 11 de jun. de 2013.

CORREIA, J. C. G. Classificação e Peneiramento. In: LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; FRANÇA, S. C.A. Tratamento de Minérios. 5ª ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

ECM S.A – Projetos Industriais, Belo Horizonte 2012.

Filtragem. Consultado em arquivo digital e parcialmente extraído do endereço: <<http://www.torr-engenharia.com.br/?tag=filtragem>>. Acesso em 10 de maio de 2013.

GALERY, R.; VALADÃO, G.E.S.; MONTENEGRO, L.C.M. Separação por Tamanho. In: VALADÃO, G.E.S.; ARAUJO, A.C. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª ed. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

GIORDANO, G. Tratamento e Controle de Efluentes Industriais. Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente. UERJ, 1999.

GOMES, J.F.S. Procedimento para Minimização de Efluentes Aquosos. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro 2002. 228 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

HESPANHOL, I.; MIERZWA. J.C. Manual de Conservação e Reúso da Água na Indústria. 1ª ed. Rio de Janeiro: DIM, 2006.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; FRANÇA, S. C.A. Tratamento de Minérios. 5ª ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010.

MAGALHÃES, C.C.; DELGADO, B.E.P.C.; PESSOA, F.L.P.; QUEIROZ, E.M. Minimização de Efluentes aquosos em refinarias usando DFA – Análise da Utilização de Processos de Regeneração. In: IV Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica, 6, 2005, Rio de Janeiro.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. Reúso de Água. 1ª ed. Barueri, SP, Editora Manole, 2003.

METSO. Consultado em arquivo digital e parcialmente extraído do endereço:
<http://www.metso.com/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilhome.nsf/FR?ReadForm&ATL=/inetMinerals/Brazil/mm_Brazilcontent.nsf/WebWID/WTB-050519-2256F-2C200>.
Acesso em 20 de maio de 2013.

MIRRE, R.C. Recuperação e Reúso de Água na Indústria de Petróleo: Síntese de Redes de Transferência de Massa. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro 2007. 197 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

MOREIRA, R. C. Minimização de Efluentes em uma Unidade de Tratamento de Água Industrial. Salvador: Universidade Federal da Bahia 2009. 117 p. (Dissertação, Mestrado, Gerenciamento e Tecnologias Ambientais no processo Produtivo).

Peneira Vibratória. Consultado em arquivo digital e parcialmente extraído do endereço:
<<http://www.msr.com.br/ct/curiosidades/peneira-vibratoria>>. Acesso em 11 de jun. de 2013.

REIS, K. M. Dimensionamento de Espessadores. Ouro Preto: Escola de Minas da UFOP, 2010. 40p. (Monografia, Beneficiamento Mineral).

SALES, C. Notas de Aula da Graduação em Engenharia de Minas. João Monlevade, Brasil: Universidade do Estado de Minas Gerais, 2009.

SAMPAIO, J. A.; FRANÇA, S. C.A.; BRAGA P. F. A. Tratamento de Minérios: Práticas Laboratoriais, 1ª ed., Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2007.

SANTOS, R.P. Extensão e automatização do Diagrama de Fontes de Água usado no gerenciamento e redução do consumo de água em plantas industriais. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro 2007. 161 p. (Dissertação, Mestrado, Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos).

SETTI, A. A.; LIMA, J. E. F. W.; CHAVES, A. G. M.; PEREIRA, I.C. Introdução ao gerenciamento de recursos hídricos. 2ª ed., Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, Superintendência de Estudos e Informações Hidrológicas, 2000.

Tratamento de Água. Consultado em arquivo digital e parcialmente extraído do endereço: <[http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3669-efluentes industriais](http://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/3669-efluentes_industriais)>. Acesso em 15 de fev. de 2013.

VALADÃO, G. E.S.; ARAÚJO, A. C. Introdução ao Tratamento de Minérios. 1ª ed. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2007.

VIANA, P. R. M. Notas de Aula do Curso de Especialização em Recursos Minerais – DEMIN: EMN 555 – Flotação de Minérios de Ferro. Belo Horizonte, Brasil: Universidade Federal de Minas Gerais, 2012.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. Mineral Processing Technology. 7ª ed. Londres: Elsevier Science & Technology Books, 2006.